ISJAEE

№ 02
(419)
2024

ISSN 1608-8298
Выходит один раз в месяц
Издаётся с июля 2000 г.

Международный научный журнал
«Альтернативная энергетика и экология»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР А.Л. ГУСЕВ

Руководитель группы компаний «Водород»

452613, Башкортостан респ., г. Октябрьский, 35-й мкр., дом 9А, абонентский ящик № 33
Phone: +7(937) 229-21-01; +7(904)6720397;+382 69 260 722; whats App: +79046720397; telegram: +38269260722;

E-mail: gusev@hydrogen.ru; ceo@yaalgusev.ru; alexandergusev777@gmail.com; skype: aleksandr_tata

НАУЧНЫЙ СОВЕТ

С.М. Алдошин, акад. РАН (ИПХФ РАН, Черноголовка, Россия), зам. главного редактора ISJAEE
О.М. Алифанов, чл.-корр. РАН (МАИ, Москва, Россия)
Р.А. Амерханов, д-р техн. наук, проф. (Кубанский гос. аграрный университет, Краснодар, Россия)
М.В. Ананьев, д-р. хим. наук (ТОТЭ, ИВТЭ УрО РАН, Россия)
В.М. Андреев, проф. (ФТИ им. Иоффе, С.-Петербург, Россия)
В.М. Арутюнян, акад. НАН Армении (Ереванский гос. университет, Ереван, Армения)
А.М. Архаров, д-р техн. наук (МГТУ им. Баумана, Москва, Россия)
Э.А. Бекиров, д-р техн. наук, проф. (КФУ, Симферополь, Россия)
Д.Г. Бессарабов, канд. техн. наук, Южно-Африканский центр DST «HySA Infrastructure»
Дж. О'М. Бокрис, проф. (Гейнсвилл, США)
В.М. Бузник, акад. РАН (ИТЦ РАН, Москва, Россия)
В.А. Бутузов, д-р техн.наук («Южгеотепло», Краснодар, Россия)
Т.Н. Везироглу, д-р, проф., президент МАВЭ, зам. гл. ред. ISJAEE
Е.А. Везироглу, д-р, проф., главный редактор International Journal of Hydrogen Energy (IJHE)
И.А. Габибов, д-р техн. наук, проф., (Азербайджан)
А.Г. Галеев, д-р техн. наук, проф. (ФКП НИЦ РКП, Сергиев Посад, Россия)
А.А. Гарибов, д-р хим. наук (ИРП НАН Азербайджана)
С.А. Григорьев, д-р техн. наук (НИУ «МЭИ», Москва, Россия)
Е.А. Гудилин, чл.-корр. РАН (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия), зам. главного редактора ISJAEE
Ю.А. Добровольский, д-р хим. наук (ИПХФ РАН, Черноголовка, Россия)
А.М. Домашенко, канд. техн. наук (ОАО «Криогенмаш», Балашиха, Россия)
В.В. Елистратов, д-р техн. наук (НОЦ «Возобновляемые источники энергии» СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия)
О.Н. Ефимов, канд. хим. наук (ИПХФ РАН, Черноголовка, Россия)
А.З. Жук, д-р физ.-мат. наук (ОИВТ РАН, Москва, Россия)
М. Иоелович, д-р хим. наук (Designer Energy Company, Израиль)
Г.И. Исаков, д-р физ.-мат. наук (Институт физики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан), зам. главного редактора ISJAEE
А.Г. Забродский, академик РАН (ФТИ им. Иоффе, С.-Пб, Россия)
Ю.П. Зайков, д-р хим наук (УрФу)
Я. Клеперис, д-р физ.-мат наук (Латвийский ун-т, Рига, Латвия)
А.С. Коротеев, акад. РАН (ФГУП «Центр Келдыша», Москва, Россия)
Б.Н. Кузык, чл.-корр. РАН (НИК НЭП, Москва, Россия)
С.О. Кудря, д-р техн. наук (ИВЭ НАН Украины, Киев)
В.В. Куршева, канд. хим. наук (НТЦ «ТАТА», Саров, Россия)
А.М. Липанов, акад. РАН (УдНЦ УрО РАН, Ижевск, Россия)
В.М. Лятхер, д-р техн. наук (New Energetics, Кливленд, США)
В.А. Лопота, чл.-корр. РАН (РКК «Энергия» им. С.П. Королева, Россия)
В.В. Лунин, акад. РАН (МГУ, Москва, Россия)
М. Лутовац, акад., проф. (Университет «УНИОН», Белград, Сербия)
Р.Х. Меликов, к-т.тех.наук, (Азербайджан)
Ч. Марчеттти, проф. (Сиеци, Италия)
Г.А. Месяц, акад. РАН (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия)
Н.Н. Мхитарян, чл.-корр. НАН Украины (ИВЭ НАН Украины, Киев)
И.М. Неклюдов, акад. НАН Украины (ХФТИ, Харьков, Украина)
В.Н. Пармон, акад. РАН (Институт катализа им. Г.К. Борескова СОРАН, Новосибирск, Россия)
А.М. Пенджиев, д-р с.-х. наук (Туркменский гос. архитектурно-строительный институт, Ашхабад, Туркменистан)
Н.Н. Пономарев-Степной, акад. РАН (РНЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия)
О.С. Попель, д-р техн. наук (ОИВТ РАН, Москва, Россия)
В.Я. Попкова, д-р хим. наук (АО «Байер», Москва, Россия)
М.А. Прелас, проф. (У-т Миссури-Коламбия, Коламбия, США)
А.Ю. Раменский, канд. техн. наук, президент НАВЭ РФ (Россия, Москва), зам. гл. редактора ISJAEE
В.С. Рачук, д-р техн. наук, проф. (ОАО «КБХА», Воронеж, Россия)
И.А. Рахматуллаев, д-р физ-мат. наук, ведущий науч. сотрудник Центра передовых технологий при Министерстве инновационного развития Республики Узбекистан
П.Ф. Рзаев, д-р техн. наук (ИРП НАН Азербайджана)
В.Ф. Резцов, чл.-корр. НАНУ (ИВЭ НАН Украины, Киев)
О.М. Саламов, канд. физ.-мат. наук (ИРП НАН Азербайджана)
П. Сан-Грегуар, проф. (Университет Тулон-Вара, Франция), зам. главного редактора ISJAEE
В.А. Сафонов, д-р техн.наук, проф. (Институт ядерной энергии и промышленности СевГУ, Севастополь, Россия)
Е.В. Соломин, д-р техн. наук (Южно-Уральский гос.университет, Челябинск, Россия)
А.Я. Столяревский, д-р техн. наук (Центр КОРТЭС, Россия), зам. главного редактора ISJAEE
А.В. Стрелец, канд. техн. наук (ФГБНУ «Дирекция научно-техн. программ», Москва, Россия)
Б.П. Тарасов, канд. хим. наук (ИПХФ РАН, Черноголовка, Россия)
Т. Троциковски, д-р наук в области управления, проф. Президент Европейского научного фонда «Институт Инновации» (Польша, Варшава)
М.Д. Хэмптон, д-р, проф. (Университет центральной Флориды, США), зам. главного редактора ISJAEE
А.Ю. Цивадзе, акад. РАН (ИФХЭ им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия)
Ю.Н. Шалимов, д-р техн. наук (ВГТУ, Воронеж, Россия)
С.Е. Щеклеин, д-р техн. наук, проф. (УрФУ, Россия)

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ (2014) – 5,694. Журнал зарегистрирован Международным центром ЮНЕСКО в 2000 г. (название: «Al'ternativnaâ ènergetika i ècologiâ», краткое название: «Al'tern. ènerg. ècol.»), ISSN 1608-8298. тематика журнала одобрена Международной ассоциацией водородной энергетики (МАВЭ) и Международным центром развития водородной энергетики Департамента по вопросам промышленного развития ООН (UNIDO-ICHET). Журнал включен в диссертационный перечень ВАК. Журнал индексируется в Google Scholar (GS – 18000); в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ – 2462). Индекс Хирша за 10 лет – 12; индекс Херфиндаля по организациям авторов – 261. Журнал включен в базу данных CROSSREF (цифровой идентификатор DOI) в 2014 г.

Награды журнала: Медаль Рентгена (2007 г.), Диплом Фонда им. В.И. Вернадского и Комитета по экологии Государственной Думы ФС РФ (2007 г.), Премия «Российский Энергетический Олимп – 2008». Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Журнал включен в каталоги: «Роспечать» (индекс 20487), Объединенный каталог «Пресса России. Российские и зарубежные газеты и журналы» (индекс 41935), «Интерпочта-2003». Полные электронные версии статей представлены на сайте Научной электронной библиотеки: http://e-library.ru, на сайте Международного научного журнала АЭЭ: http://isjaee.hydrogen.ru, а также на сайте: Международного научного и образовательного портала «Водород»: http://www.hydrogen.ru.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № ФС77-21881) от 14 сентября 2005 г. Показатель Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» в рейтинге SCIENCE INDEX за 2015 г. – 11,360. Место Международного научного журнала АЭЭ в общем рейтинге SCIENCE INDEX за 2015 г. – 5; по тематике «Охрана окружающей среды. Экология человека» – 1; по тематике «Энергетика» – 1. Переводная версия журнала (IJHE) включена в SCOPUS (IF = 3,5) и Web of Science (IF = 1,5). транслитерация списка литературы по BSI.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ISJAEE

№ 02
(419)
2024

ISSN 1608-8298
1 times per month
Found in July 2000

International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF A. L. GUSEV

Leader of «Hydrogen» Group of Companies

452613, Russia, Bashkortostan Rep., Oktyabrsky, 35th mkrn., house 9a, Post Box Officce 33
Phone: +7(937) 229-21-01; +7(904)6720397;+382 69 260 722; whats App: +79046720397; telegram: +38269260722;

E-mail: gusev@hydrogen.ru; ceo@yaalgusev.ru; alexandergusev777@gmail.com; skype: aleksandr_tata

НАУЧНЫЙ СОВЕТ

S.M. Aldoshin, Acad. RAS (IPCP RAS, Chernogolovka, Russia), deputy editor-in-chief of ISJAEE
O.M. Alifanof, Member Corr. RAS (MAI, Moscow, Russia)
R.A. Amerkhanov, Prof. (Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia)
M.V. Ananyev D.Sc. (SOFC, IHTE of the UB of the RAS)
V.M. Andreev, Prof. (A.F. Ioffe PhTI of RAS, St.-Petersburg)
A.M. Arharov, Prof. (Bauman MSTU, Moscow, Russia)
V.M. Aroutiounian, Acad. NAS of Armenia (Yerevan State University, Yerevan, Armenia)
E.A. Bekirov, D.Sc., Prof. (CFU, Simferopol. Russia)
D.G. Bessarabov, Ph.D., South African National DST Center "HySa Infrastructure"
J. O'M. Bockris, Prof. (Gainesville, USA)
V.A. Butuzov, Prof. ("Uuzhgeoteplo", Krasnodar, Russia)
V.M. Buznik, Acad. RAS (ITC RAS, Moscow, Russia)
Yu.A. Dobrovolskiy, Prof. (IPCP RAS, Chernogolovka, Russia)
A.M. Domashenko, Prof. ("Kriogenmash", Balashikha, Russia)
O.N. Efimov, D.Sc. (IPCP RAS, Chernogolovka, Russia)
V.V. Elistratov, Prof. (SEC "RES", S.-Peterburg, Russia)
I.A. Gabibov, Dr. tech. Sciences, Prof. (Azerbaijan)
A.G. Galeev, Prof. (Science and Research Center of Rocket and Space Production, Sergiev Posad, Russia)
A.A. Garibov, Prof. (IRP NAS, Azerbaijan)
E.A. Goodilin, Member Corresponding RAS (FMS MSU, Moscow, Russia), deputy editor-in-chief of ISJAEE
S.A. Grigoriev, Ph.D., D.Sc. (NRU "MEI", Moscow, Russia)
M.D. Hampton, Prof. (University of Central Florida, USA), deputy editor-in-chief of ISJAEE
M. Ioelovich, D.Sc. (Designer Energy Company, Israel)
G.I. Isakov, Prof. (Institute of Physics of NAS of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan), deputy editor-in-chief of ISJAEE
J. Kleperis, D.Sc. (University of Latvia, Riga, Latvia)
A.S. Koroteev, Acad. RAS (Keldysh Research Center, Moscow, Russia)
O. Kudrya, Prof. (IRE of NAS of Ukraine, Kiev)
V.V. Kursheva, D.Sc. (STC "TATA", Sarov, Russia)
B.N. Kuzyk, Member Corresponding RAS (NIK NEP, Moscow, Russia)
A.M. Lipanov, Acad. RAS (UdSC UrB RAS, Izhevsk, Russia)
V.A. Lopota, Member Corresponding RAS (S.P. Korolev Rocket and Space Corporation "Energia", Russia)
V.V. Lunin, Acad. RAS (MSU, Moscow, Russia)
M. Lutovaz, Acad. (FPIM University "UNION", Belgrade, Serbia)
V.M. Lyatkher, Prof. (New Energetics Inc., Cleveland, USA)
R.H. Malikov, Candidate of Technical Sciences, (Azerbaijan)
Ch. Marchetti, Prof. (Sieci, Italy)
N.N. Mkhitaryan, Member Corr. NASU (IRE of NAS of Ukraine, Kiev)
G.A. Mesyats, Acad. RAS (Physics Institute of them. P. N. Lebedev of RAS, Moscow, Russia)
I.M. Neklyudov, Acad. RAS of Ukraine (KPTI, Khar'kov, Ukraine)
V.N. Parmon, Acad. RAS (Boreskov Institute of Catalysis of SD RAS, Novosibirsk, Russia)
A.M. Penjiev, Prof. (Turkmen State Architecturally-Building Institute, Ashgabat, Turkmenistan)
N.N. Ponomaryov-Stepnoy, Acad. RAS (RRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia)
O.S. Popel', Prof. (UIHT of RAS, Moscow, Russia)
V.Ya. Popkova, Prof. (A/O Bayer, Moscow, Russia)
M.A. Prelas, Prof. (Univ. of Missouri-Columbia, Columbia, USA)
V.S. Rachuk, Prof (OSC KBKhA, Voronezh, Russia)
A.Yu. Ramenskiy, Ph.D., President of the National Hydrogen Energy Association (NHEA) (Moscow, Russia), deputy editor-in-chief of ISJAEE
I.A. Rakhmatullaev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher of the Center for Advanced Technology under the Ministry of Innovative Development of the Republic of Uzbekistan
V.F. Reztsov, Member Corr. NASU (IRE of NASU, Kiev)
P.F. Rzaev, Prof. (IRP NAS, Azerbaijan)
V.A. Safonov, D.Sc., Prof. (Institute of Nuclear Energy and Industry of SevSU, Sevastopol, Russia)
P. Saint-Gregoire, Prof. (University of Toulon and Var, France), deputy editor-in-chief of ISJAEE
O.M. Salamov, PhD (IRP NAS, Azerbaijan)
Y.N. Shalimov, Prof. (VSTU, Voronezh, Russia)
S.E. Shcheklein, Prof. (UrFU, Russia)
E.V. Solomin, Prof. (South Ural State University, Russia)
A.Ya. Stolyarevsky, Prof. (Center CORTES, Russia), deputy editor-in-chief of ISJAEE
A.V. Strelets, Dr. (FCSTP, Moscow, Russia)
B.P. Tarasov, Dr. (IPCP RAS, Chernogolovka, Russia)
T. Trotsikovski, Ph.D. in Management, prof., President of the European Innovation Research (Poland, Warsaw)
A.Yu. Tsivadze, Acad. RAS (A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Moscow, Russia)
T.N. Veziroglu, Dr., Prof., Prezident of International Association for Hydrogen Energy, deputy editor-in-chief of ISJAEE
E.A. Veziroglu, Dr., Prof., editor-in-chief of International Journal of Hydrogen Energy (IJHE)
A.Z. Zhuk, Prof. (ITPhES RAS, Moscow, Russia)
Yu.P. Zaikov, Prof. (UrB RAS, Russia)
A.G. Zabrodsky, Academician RAS (A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of RAS, St.-Petersburg)

Two-year Impact Factor of Russian Science Citation Index (2014) – 5,694; h-index for 10 years – 12. Herfindahl index of the authors' organizations – 261.

The journal is registered in UNESCO in ISSN International Centre in 2000 (key title: "Al'ternativnaâ ènergetika i ècologiâ", abbreviated key title: "Al'tern. ènerg. ècol."), ISSN 1608-8298. The subjects of the journal are approved by International Association for Hydrogen Energy (IAHE). The journal has been included into the "List of leading reviewed scientific journals and editions in which the basic scientific results of dissertations on competition of scientific degrees of Doctors and Candidate of Sciences (Ph.D. and D.Sc.) should be published" according to the decision of Presidium of the Higher Certifying Commission. The journal has been included into catalogues: "Rospechat'" (20487), Joined catalogue "Press of Russia. Russian and foreign newspapers and journals" (41935), "Interpochta-2003".

Journal awards: Röntgen Medal (2007), Award of V. I. Vernadskyi fund and RF State Committee for Ecology (2007). The Premium "Russian Energetic Olympus – 2008".

The journal has been included into the abstract journal and data base VINITI; and and CROSS REF (DOI) in 2014. The journal is indexed in Google Scholar (GS – 18000); and Russian Science Citation Index (2462). Full version of papers has been presented at Scientific electronic library http://e-library.ru, web-site of International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology http://isjaee.hydrogen.ru, and International Information and Education Portal "Hydrogen" http://www.hydrogen.ru. The journal has been registered at Russian Federal Service on Supervision of Observance of the Legislation in Sphere of Mass Communications and Protection of a Cultural Heritage (Certificate PI No FC77-21881) September 14, 2005

Position of ISJAEE in SCIENCE INDEX rating for 2015 – 11,360; in General Rating for 2015 – 5; on the topic "Environmental Protection Human Ecology" – 1; on the topic "Energy" – 1 Translated version (IJHE) is included into Scopus (IF = 3,5) and Web of Science (IF = 1,5) as well as international databases.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель: Президент IAAEE А.Л. Гусев
Сопредседатель: член-корр. РАН **Е.А. Гудилин**
Члены Международного редакционного комитета (**МКР**) представлены на стр. 196-202 по закреплённым тематическим направлениям и тематическим секциям

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-КОНСУЛЬТАТИВНЫЙ СОВЕТ РЕДАКЦИИ

Председатель: акад. РАН **Н.Н. Пономарев-Степной**
Сопредседатели: академик РАН **В.Н. Пармон**
академик РАН **С.М. Алдошин**
Члены Международного научно-консультативного совета редакции (**МНКСР**) представлены на стр. 196-202 по закреплённым тематическим направлениям и тематическим секциям

СОВЕТ ЭКСПЕРТОВ

Председатель: А.Л. Гусев
Сопредседатели:
Б.П. Тарасов, А.Я. Столяревский
Р.А. Амерханов (Краснодар, Россия)
Л.Ф. Беловодский (Саров, Россия)
А.Г. Галеев (Сергиев Посад, Россия)
Е.А. Гудилин (Москва, Россия)
А.М. Домашенко (Балашиха, Россия)
О.С. Попель (Москва, Россия)
В.А. Хуснутдинов (Москва, Россия)

МЕМОРИАЛ

Я.Б. Данилевич
А.В. Елютин
С.П. Капица
В.И. Куприянов
А.А. Макаров
С.П. Малышенко
В.Е. Накоряков
В.А. Гольцов
З.Р. Исмагилов
Ю.А. Рыжов
Ю.Д. Третьяков
Ю.К. Завалишин
М.А. Казарян
Ю.А. Трутнев
В.Е. Фортов
А.Р. Щекин
Л.Ф. Гольцова

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОВЕТ РЕЦЕНЗЕНТОВ

Председатель: Т.Н. Везироглу
Р.А. Амерханов (Краснодар, Россия)
В.М. Арутюнян (Ереван, Армения)
П.Г. Бережко (Саров, Россия)
В.А. Бутузов (Краснодар, Россия)
М.В. Воробьева (Москва, Россия)
А.Г. Галеев (Сергиев Посад, Россия)
Е.А. Гудилин (Москва, Россия)
А.Л. Гусев (Саров, Россия)
А.Л. Дмитриев (Санкт-Петербург, Россия)
А.М. Домашенко (Балашиха, Россия)
О.Н. Ефимов (Черноголовка, Россия)
Г.И. Исаков (Баку, Азербайджан)
Ф. Караосман оглу (Стамбул, Турция)
Я. Клеперис (Рига, Латвия)
Ю.С. Нечаев (Москва, Россия)
А.Т. Пономаренко (Москва, Россия)
О.С. Попель (Москва, Россия)
Л.В. Спивак (Пермь, Россия)
Б.В. Спицын (Москва, Россия)
А.Я. Столяревский (Москва, Россия)
Е.М. Тарараева (Москва, Россия)
Б.П. Тарасов (Черноголовка, Россия)
Г.Л. Хорасанов (Обнинск, Россия)
М.Д. Хэмптон (Орландо, США)
Ю.М. Шульга (Черноголовка, Россия)
Ю. Шунман (Делфт, Нидерланды)

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Chairman: President IAAEE A.L. Gusev
Co-Chairman: Member Corresponding of the RAS **E.A. Goodilin**
Members of the International Editorial Board (**IEB**) on specified topics and topical sections are presented on pages 203-209

INTERNATIONAL EDITORIAL ADVISORY BOARD

Chairman: Academician of the RAS **N.N. Ponomaryov-Stepnoy**
Co-Chairmans: Academician of the RAS **V.N. Parmon**,
Academician of the RAS **S.M. Aldoshin**
Members of the International Editorial Advisory Board (**IEAB**) on specified topics and topical sections are presented on pages 203-209

EXPERTS BOARD

Chairman: A.L. Gusev
Co-Chairmans:
B.P. Tarasov, Z.R. Ismagilov
R.A. Amerkhanov (Russia, Krasnodar)
L.F. Belovodsky (Russia, Sarov)
A.M. Domashenko (Russia, Balashikha)
A.G. Galeev (Russia, Sergiev Posad)
E.A. Goodilin (Russia, Moscow)
V.A. Khusnutdinov (Russia, Moscow)
O.S. Popel' (Russia, Moscow)

M E M O R I A L

Ya.B. Danilevich
A.V. Elyutin
S.P. Kapitza
V.I. Kupriyanov
A.A. Makarov
S.P. Malyshenko
V.E. Nakoryakov
V.A. Gol'tsov
Z.R. Ismagilov
Yu.A. Ryjov
Yu.D. Tretiakov
Yu.K. Zavalishin
M.A. Kazaryan
Yu.A. Trutnev
V.E. Fortov
A.R. Shcekin
L.F. Gol'tsova

INTERNATIONAL REVIEWERS BOARD

Chairman: T.N. Veziroglu
R.A. Amerkhanov (Russia, Krasnodar)
V.M. Aroutiounian (Armenia, Yerevan)
P.G. Berezhko (Russia, Sarov)
V.A. Butuzov (Russia, Krasnodar)
A.L. Dmitriev (Russia, S.-Petersburg)
A.M. Domashenko (Russia, Balashikha)
O.N. Efimov (Russia, Chernogolovka)
A.G. Galeev (Russia, Sergiev Posad)
E.A. Goodilin (Russia, Moscow)
A.L. Gusev (Russia, Sarov)
M.D. Hampton (USA, Orlando)
G.I. Isakov (Azerbaijan, Baku)
F. Karaosman oglu (Turkey, Istanbul)
G.L. Khorasanov (Russia, Obninsk)
J. Kleperis (Latvia, Riga)
Yu.S. Nechaev (Russia, Moscow)
A.T. Ponomarenko (Russia, Moscow)
O.S. Popel' (Russia, Moscow)
Yu.M. Shul'ga (Russia, Chernogolovka)
Yu. Shoonman (Netherlands, Delft)
B.V. Spitsyn (Russia, Moscow)
L.V. Spivak (Russia, Perm')
A.Ya. Stolyarevskiy (Russia, Moscow)
E.M. Tararaeva (Russia, Moscow)
B.P. Tarasov (Russia, Chernogolovka)
M.V. Vorobyova (Russia, Moscow)

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ И ДЕЛОВОЙ КЛУБ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОЛОГИИ
INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND BUSINESS CLUB FOR ALTERNATIVE ENERGY AND ECOLOGY

Международный центр развития водородной энергетики Департамента по вопросам промышленного развития ООН — United Nations Industrial Development Organization International Centre for Hydrogen Energy Technologies
Международная ассоциация водородной энергетики — International Association for Hydrogen Energy
Институт водородной экономики — Institute of Hydrogen Economy
Российская академия наук — Russian Academy of Sciences
Министерство образования и науки РФ — Ministry of Education and Science of the RF
Факультет наук о материалах МГУ им. М.В. Ломоносова — Faculty of Materials Science of MSU
Консорциум «Водород» — Consortium "Hydrogen"
Институт проблем химической физики РАН — Institute of Problems of Chemical Physics of RAS
Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН — Boreskov Institute of Catalysis SB RAS
Исследовательский центр им. М.В. Келдыша — Keldysh Research Center
Российский научный центр «Курчатовский институт» — Russian Research Center "Kurchatov Institute"
НИИ Научно-производственное объединение «Луч» — Scientific Research Institute Research-and-Production Assotiation "Luch"
Научная электронная библиотека — Scientific Electronic Library
Научно-технический центр «ТАТА» — Scientific Technical Centre "TATA"

В ЭТОМ НОМЕРЕ

IN THIS ISSUE

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА	RENEWABLE ENERGY
НЕВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА	NONRENEWABLE ENERGY
ТЕРМОЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА	THERMONUCLEAR ENERGY
ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА	HYDROGEN ECONOMY
КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	STRUCTURAL MATERIALS
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АЭЭ	THERMODYNAMIC BASICS OF AEE
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭНЕРГЕТИКИ	ENVIRONMENTAL ASPECTS ENERGY
ЗАКОНОДАТЕЛЬНАЯ БАЗА, СМИ, ПОДДЕРЖКА ГОСУДАРСТВА	LEGISLATIVE BASIS, MASS MEDIA, STATE SUPPORT
КАДРОВОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ОБРАЗОВАНИЕ	PERSONNEL MANAGMENT AND EDUCATION
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АЭЭ	ECOMIC ASPECTS OF AEE
ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, УСТРОЙСТВА И ИХ ВНЕДРЕНИЕ	INNOVATION SOLUTIONS TECHNOLOGIES, FACILITIES AND THEIR INOVATION

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

В ЭТОМ НОМЕРЕ

IN THIS ISSUE

ТРАНСПОРТНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА	ENVIRONMENTAL VEHICLES
ДОБЫЧА ПРИРОДНЫХ ИСКОПАЕМЫХ	RECOVERY TECHNIQUES
КАТАЛИЗ В АЭЭ	CATALYSIS FOR AEE
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ	ENERGY SAVING
ПРОБЛЕМЫ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА	PROBLEMS OF OIL AND GAS COMPLEX
ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И УСТРОЙСТВА	OPTICAL PHENOMENA AND FACILITIES
ГАЗОТУРБИННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	GAS TURBINE TECHNOLOGY
ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ПРОИЗВОДСТВА	ENVIRONMENTALLY CONSCIOUS FACTORIES
ПРОБЛЕМЫ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА	ISSUES OF AGRICULTURE
НАУКИ О ЗЕМЛЕ	EARTH SCIENCES
ИНФОРМАЦИЯ В ОБЛАСТИ АЭЭ	INFORMATION FOR AEE

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

СОДЕРЖАНИЕ

I. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА

1. Солнечная энергетика

1-2-0-0 Солнечно-водородная энергетика

Панченко В. А., Чирский С. П., Ковалёв А. А., Литти Ю. В., Караева Ю. В., Катраева И. В.
Моделирование и изготовление солнечных модулей различной конструкции
для энергоснабжения биогазовой установки…….....….....12
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.012-036

1-4-1-0 Солнечные коллекторы

Toshpulatov Sirojiddin Furqat ugli
Analysis of the efficiency of the use of the heat collector in small power photoelectric panels….....37
doi: 10.15518/isjaee.20224.02.037-042

2. Ветроэнергетика

2-8-0-0 Электрогенераторы для ветроэнергетики

Dmitriy M. Toporkov, Anna Yu. Arestova
Experimental and theoretical research on cogging torque minimization for PM Synchronous Machine…...….....…43
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.043-054

5. Энергия биомассы

5-3-0-0 Энергия биомассы и экология

Вельможина К. А., Политаева Н. А., Ильин И. В., Шинкевич П. С.
Обзор современных стратегий развития водородной биоэнергетики как ключевых направлений для
достижения целей устойчивого развития.....…….....55
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.055-078

6. Малая гидроэнергетика

Pirmatov Nurali Berdiyarovich, Matkosimov Muhammadsadiq Mahammadhoshim o'g'li,
Mahamadzhanov Sadigjon Yudashboy o'g'li
Research on the use of asynchronous machine in generator mode in microhydroelectric plants
of a renewable alternative energy source device…….....79
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.079-085

8. Энергокомплексы на основе ВИЭ

А. В. Сидорова, С. В. Митрофанов, А. Г. Русина
Среднесрочное прогнозирование естественного притока к створу гэс и корректировка номинальной
мощности с помощью применения технологий водородной энергетики.....86
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.086-099

IV. ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА

12. Водородная экономика

12-10-0-0 Транспортные средства и приводы на водородном топливе

Вильбергер М. Е., Попов Н. С., Домахин Е. А., Аниброев В. И., Мосин М. Е.
Увеличение запаса хода автономного безрельсового транспортного средства с применением
алгоритмов нечеткой логики…….....……..100
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.100-115

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

VII. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭНЕРГЕТИКИ

17. Энергетика и экология

17-2-0-0 Экологические проблемы мегаполисов

Мятеж С. В., Лисицын П. С.
Совершенствование многоуровневых инверторов с модуляцией магнитных потоков для возможности их питания от водородных топливных элементов……116
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.116-133

Филина О. А., Малозёмов Б. В., Щуров Н. И.
Система генерации водородного топлива для бензиновых двигателей внутреннего сгорания легковых автомобилей……134
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.134-146

Малозёмов Б. В., Порсев Е. Г.
Развитие портативных источников энергии на основе водородного топливного элемента с регенерацией……147
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.147-165

XII. ТРАНСПОРТНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

29. Бортовые аккумуляторы

29-3-0-0 Электрические аккумуляторы энергии

Щуров Н. И., Дедов С. И., Штанг А. А.
Моделирование и симуляция гибридного электромобиля с топливными ячейками……166
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.166-181

30. Мультирежимные транспортные средства

Жарков М. А., Сараханова Р. Ю., Харитонов С. А.
Анализ создания пускового момента трехкаскадного генератора для новой электростартерной системы на базе водородных топливных элементов……182
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.182-197

Сараханова Р. Ю., Харитонов С. А., Жарков М. А., Удовиченко А. В.
Электромагнитные процессы в непосредственном преобразователе частоты с естественной коммутацией в составе стартер-генераторной системы летательного аппарата……198
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.198-212

XXII. ИНФОРМАЦИЯ В ОБЛАСТИ АЭЭ

41-6-0-0 Рекламные материалы научных организаций, инвестиционных фирм и фирм-производителей

Рекламные материалы научных организаций, инвестиционных фирм и фирм-производителей……213

41. Информация

Новости……215

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

На 1-й стр. обложки*: *Памяти выдающегося организатора науки, основателя крупного Водородного подразделения (отделение № 19) в РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктора технических наук Валентина Николаевича Лобанова (1931-2018 гг.)

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ (2015) – 5,694.
Индекс Хирша за 10 лет – 12; индекс Херфиндаля по организациям авторов – 261.
Переводная версия журнала (IJHE) входит в Scopus и Web of Science, а также в международные базы данных.
Транслитерация списка литературы по BSI.
Показатель Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» в рейтинге SCIENCE INDEX за 2015 – 11,360.
Место Международного научного журнала АЭЭ в рейтинге SCIENCE INDEX за 2015 г. по тематике «Охрана окружающей среды. Экология человека» – **1**
Место Международного научного журнала АЭЭ в рейтинге SCIENCE INDEX за 2015 г. по тематике «Энергетика» – **1**
Место Международного научного журнала АЭЭ в общем рейтинге SCIENCE INDEX за 2015 г. – **5**

Учредитель, издатель и редакция
Научно-технический центр «ТАТА»
Генеральный директор А.Л. Гусев
E-mail: gusev@hydrogen.ru

Почтовый адрес:
452613, Башкортостан респ., г. Октябрьский, 35-й мкр., дом 9А, абонентский ящик № 33
Phone: +7(937) 229-21-01; +7(904)6720397;+382 69 260 722;
whats App: +79046720397; telegram: +38269260722;
e-mail:gusev@hydrogen.ru; ceo@yaalgusev.ru;
alexandergusev777@gmail.com; skype: aleksandr_tata

Основной партнер
Институт водородной экономики
Генеральный директор А.Л. Гусев
E-mail: gusev@hydrogen.ru

Почтовый адрес:
452613, Башкортостан респ., г. Октябрьский, 35-й мкр., дом 9А, абонентский ящик № 33
Phone: +7(937) 229-21-01; +7(904)6720397;+38269260722;
whats App: +79046720397; telegram: +38269260722;
e-mail: gusev@hydrogen.ru;
ceo@yaalgusev.ru; alexandergusev777@gmail.com;
skype: aleksandr_tata

Все права принадлежат ООО НТЦ «ТАТА» по лицензионному договору с Владельцем интеллектуальной собственности Александром Леонидовичем Гусевым.

Заведующий редакцией, гл. редактор сайта http://isjaee.com
Александр Леонидович Гусев (Россия, Саров)

E-mail: gusev@hydrogen.ru, redactor@hydrogen.ru

Переводчики
Александр Рудольфович Володько (Россия,Саров)
Татьяна Викторовна Зезюлина (Россия, Саров)

Контент-менеджер сайта
http://isjaee.com
Александр Леонидович Гусев
(Россия, Саров)

Художественный редактор
Виктор Иванович Немышев (Россия, Саров)

Научные обозреватели
Ольга Борисовна Баклицкая-Каменева
(Россия, Москва)
Вера Владимировна Куршева (Россия, Москва)

Компьютерная графика
Валентин Александрович Гусев
(Россия, Саров)

Редактор, корректор
Алевтина Сергеевна Хазиева
(Россия, Октябрьский)

Компьютерная верстка
Алевтина Сергеевна Хазиева
(Россия, Октябрьский)

CONTENT

I. RENEWABLE ENERGY

1. Solar energy

1-2-0-0 Solar-hydrogen energy

Panchenko V. A., Chirsky S. P., Kovalev A. A., Litti Yu. V., Karaeva Yu. V., Katraeva I. V.
Modeling and manufacturing of solar modules of various designs
for power supply to a biogas plant…….....….....12
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.012-036

1-4-1-0 Solar collectors

Toshpulatov Sirojiddin Furqat ugli
Analysis of the efficiency of the use of the heat collector in small power photoelectric panels.....37
doi: 10.15518/isjaee.20224.02.0037-042

2. Wind power

2-8-0-0 Electric generators for wind energy

Dmitriy M. Toporkov, Anna Yu. Arestova
Experimental and theoretical research on cogging torque minimization for PM Synchronous Machine….....….....…43
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.043-054

5. Biomass energy

5-3-0-0 Energy of biomass and ecology

Velmozhina K. A., Politaeva N. A., Ilyin I. V., Shinkevich P. S.
Review of modern strategies for the development of hydrogen bioenergy as key directions for achieving
sustainable development goals.....…….....55
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.055-078

6. Small hydroenergetics

Pirmatov Nurali Berdiyarovich, Matkosimov Muhammadsadiq Mahammadhoshim o'g'li,
Mahamadzhanov Sadigjon Yudashboy o'g'li
Research on the use of asynchronous machine in generator mode in microhydroelectric plants
of a renewable alternative energy source device…….....79
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.079-085

8. RES based power complexes

A. V. Sidorova, S. V. Mitrofanov, A. G. Rusina
Medium-term forecasting of natural inflow to the hydroelectric station and adjustment of the nominal
power through the use of hydrogen energy technologies.....86
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.086-099

IV. HYDROGEN ECONOMY

12. Hydrogen economy

12-10-0-0 Vehicles and drives powered by hydrogen fuel

Wilberger M. E., Popov N. S., Domakhin E. A., Anibroev V. I., Mosin M. E.
Increasing the power reserve of an autonomous trackless vehicle using
fuzzy logic algorithms……..... .....……...100
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.100-115

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

VII. ENVIRONMENTAL ASPECTS OF ENERGY

17. Energy and ecology

17-2-0-0 Environmental problems of megacities

Mutiny S.V., Lisitsyn P.S.
Improving multi-level inverters with magnetic flux modulation to make it possible
They are powered by hydrogen fuel cells……..…..... 116
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.116-133

Filina O. A., Malozyomov B. V., Shchurov N. I.
Hydrogen fuel generation system for gasoline internal engines
combustion of passenger cars..... .....….....134
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.134-146

Malozyomov B.V., Porsev E.G.
Development of portable energy sources based on hydrogen fuel
element with regeneration…….....147
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.147-165

XII. ENVIRONMENTAL TRANSPORT MEANS

29. Onboard batteries

29-3-0-0 Electric energy batteries

Shchurov N. I., Dedov S. I., Shtang A. A.
Modeling and simulation of a hybrid electric vehicle with fuel cells.....…166
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.166-181

30. Multi-mode vehicles

Zharkov M. A., Sarakhanova R. Yu., Kharitonov S. A.
Analysis of the creation of a starting torque of a three-stage generator for a new electric starter
systems based on hydrogen fuel cells……..….....182
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.182-197

Sarakhanova R. Yu., Kharitonov S. A., Zharkov M. A., Udovichenko A. V.
Electromagnetic processes in a direct frequency converter with natural
switching as part of the starter-generator system of the aircraft.....198
doi: 10.15518/isjaee.2024.02.198-212

XXII. INFORMATION IN THE FIELD OF ENERGY EFFICIENCY

41-6-0-0 Advertising materials of scientific organizations,
investment firms and manufacturing firms

Promotional materials of scientific organizations,
investment firms and manufacturing firms..... 213

41. Information

News…….....……215

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

1st of cover: *In memory of the outstanding organizer of science, the founder of a large Hydrogen division (department No. 19) at RFNC-VNIIEF, Dr. technical sciences Valentin Nikolaevich Lobanov (1931-2018)*

Translated version (IJHE) is included into Scopus and Web of Science and too in international databases.
Two-year Impact Factor of Russian Science Citation Index (2015) - 5,694.
H-index for 10 years - 12. Herfindahl index of the authors' organizations – 261.
Position of ISJAEE in SCIENCE INDEX rating for 2015– 11,360
Position of ISJAEE in SCIENCE INDEX rating for 2015 on the topic "Environmental Protection. Human Ecology" – **1**
Position of ISJAEE in SCIENCE INDEX rating for 2015 on the topic "Energy" – **1**
Position of ISJAEE in General Rating of SCIENCE INDEX for 2015 – **5**

Founder and publisher
Scientific Technical Centre "TATA"
General manager A.L.Gusev
E-mail: gusev@hydrogen.ru
Mailing address:
452613, Republic of Bashkortostan, Oktyabrsky, 35th str., building 9A, subscriber's box No. 33
Phone: +7(937) 229-21-01; +7(904)6720397;+382 69 260 722;
whats App: +79046720397; telegram: +38269260722;
E-mail:gusev@hydrogen.ru; ceo@yaalgusev.ru;
alexandergusev777@gmail.com;
skype: aleksandr_tata

General cooperation
Institute for Hydrogen Economy
General manager A.L.Gusev
E-mail: gusev@hydrogen.ru
Mailing address:
452613, Republic of Bashkortostan, Oktyabrsky, 35th str., building 9A, subscriber's box No. 33
Phone: +7(937) 229-21-01; +7(904)6720397;+382 69 260 722;
whats App: +79046720397; telegram: +38269260722;
E-mail:gusev@hydrogen.ru; ceo@yaalgusev.ru;
alexandergusev777@gmail.com;
skype: aleksandr_tata

All rights belong to LLC Scientific and Technical Center "TATA" under a license agreement with the Owner of intellectual property Alexander Leonidovich Gusev.

Chief-in-Board, Editor-in-Chief
http://isjaee.com
Alexander Leonidovich Gusev (Russia, Sarov)
E-mail: gusev@hydrogen.ru,
redactor@hydrogen.ru

Art-Editor
Viktor Ivanovich Nemyshev (Russia, Sarov)

Editor, Proof-reader
Alevtina Sergeevna Khazieva
(Russia, Oktyabrsky)

Translators
Alexander Rudolfovich Volod'ko (Russia, Sarov)
Tatyana Viktorovna Zezyulina (Russia, Sarov)

Scientific Reporters
Ol'ga Borisovna Baklitskaya-Kameneva
(Russia, Moscow)
Vera Vladimirovna Kursheva
(Russia, Moscow)

Computer design
Alevtina Sergeevna Khazieva
(Russia, Oktyabrsky)

Content-manager of http://isjaee.com
Alexander Leonidovich Gusev (Russia, Sarov)

Graphic design
Valentin Alexandrovich Gusev (Russia, Sarov)

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА
RENEWABLE ENERGY

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА
SOLAR ENERGY

СОЛНЕЧНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА
SOLAR-HYDROGENENERGY

Статья поступила в редакцию 07.02.24 Ред. Рег. № 355-002-24 The article has entered in publishing office 07.02.24 Ed. Reg. No. 355-002-24

УДК 620.92

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ

Панченко В. А.[1]*, Чирский С. П.[2], Ковалёв А. А.[3], Литти Ю. В.[4], Караева Ю. В.[5], Катраева И. В.[6]

[1] Российский университет транспорта. 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9
[2] Московский Государственный Технический Университет имени Н. Э. Баумана. 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5
[3] Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ. 109428, Москва,1-й Институтский проезд, 5
[4] Институт микробиологии им. С. Н. Виноградского, Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук. 119071, Москва, Ленинский пр-т, 33
[5] Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН. 420111, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31
[6] Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65

* – автор-корреспондент: pancheska@mail.ru; +79262752104

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.012-036

Заключение совета рецензентов: 19.02.24 Заключение совета экспертов: 22.02.24 Принято к публикации: 29.02.24

В статье представлено описание моделирования и изготовления солнечных модулей фотоэлектрической, тепловой и теплофотоэлектрической конструкций, предназначенных для энергоснабжения биогазовой установки, предназначенной для производства биоводорода и биометана. Проведено математическое моделирование фотоэлектрического модуля и определена расчётная температура фотопреобразователей, а также изготовлен фотоэлектрический модуль с помощью процесса герметизации фотоэлектрических преобразователей двухкомпонентным полисилоксановым компаундом. Также проведено математическое моделирование солнечного теплового коллектора с водяными радиаторами в виде круглой медной трубки, овальной медной трубки, а также прямоугольного канала водяного охлаждения («водяная рубашка»), в котором оценены потери давления и вели-

Панченко В. А., Чирский С. П., Ковалёв А. А., Литти Ю. В., Караева Ю. В., Катраева И. В. Моделирование и изготовление солнечных модулей различной конструкции для энергоснабжения биогазовой установки. // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 02 (419) 2024, с. 12-36

Panchenko V. A., Chirsky S. P., Kovalev A. A., Litti Yu. V., Karaeva Yu. V., Katraeva I. V. Modeling and manufacturing of solar modules of various designs for energy supply of the biogas plant // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 02 (419) 2024, pp. 12-36

чина нагрева воды. Определены расстояния между прямоугольными каналами радиатора водяного охлаждения для равномерного теплосъёма, а также проведено математическое моделирование теплового состояния солнечного теплового коллектора с полукруглым сечением канала радиатора водяного охлаждения, после чего был изготовлен солнечный тепловой коллектор. Проведено математическое моделирование суммарных перемещений компонентов теплофотоэлектрического модуля, значения которых не выходят за допустимые пределы, после чего был изготовлен теплофотоэлектрический модуль с помощью процесса герметизации фотоэлектрических преобразователей двухкомпонентным полисилоксановым компаундом.

Ключевые слова: солнечная энергия, биогазовая установка, зелёный водород, биоводород, биометан, анаэробное сбраживание, энергоснабжение, фотоэлектрический модуль, солнечный коллектор, теплофотоэлектрический модуль, моделирование, метод конечных элементов.

MODELING AND MANUFACTURING OF SOLAR MODULES OF VARIOUS DESIGNS FOR ENERGY SUPPLY OF THE BIOGAS PLANT

Panchenko V. A.[1*], Chirsky S. P.[2], Kovalev A. A.[3], Litti Yu. V.[4], Karaeva Yu. V.[5], Katraeva I.V.[6]

[1] Russian University of Transport. 127994, Moscow, Obraztsova st., 9
[2] Moscow State Technical University named after N. E. Bauman. Moscow, st. 2nd Baumanskaya, 5
[3] Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 109428, Moscow, 1st Institutskiy proezd, 5
[4] Institute of Microbiology S. N. Vinogradsky, Federal Research Center «Fundamentals of Biotechnology» of the Russian Academy of Sciences. 119071, Moscow, Leninsky Prospekt, 33
[5] Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences. 420111, Kazan, st. Lobachevskogo, 2/31
[6] Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering. 603000, Nizhny Novgorod, Ilinskaya st., 65
[*] – corresponding author: pancheska@mail.ru; +79262752104

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.012-036

Referred: 19.02.24 Received in revised form: 22.02.24 Accepted: 29.02.24

The article presents the modeling and manufacturing of solar modules of photovoltaic, thermal and photovoltaic thermal designs intended to energy supply of the biogas plant intended for the production of biohydrogen and biomethane. The modeling of the photovoltaic module was carried out and the calculated temperature of the photovoltaic converters was determined, and also the photovoltaic module was manufactured using the process of sealing the photovoltaic converters with a two-component polysiloxane compound. Modeling of a solar thermal collector with water radiators in the form of a round copper tube, an oval copper tube, as well as a rectangular water cooling channel («water jacket») was also carried out, in which the pressure loss and the amount of water heating were assessed. The distances between the rectangular channels of the water-cooling radiator for uniform heat removal were determined, and the thermal state of a solar thermal collector with a semicircular cross-section of the water-cooling radiator channel was simulated, after which the solar thermal collector was manufactured. The total displacements of the components of the photovoltaic thermal module were simulated, the values of which did not exceed acceptable limits, after which the photovoltaic thermal module was manufactured using the process of sealing photovoltaic converters with a two-component polysiloxane compound.

Keywords: solar energy, biogas plant, green hydrogen, biohydrogen, biomethane, anaerobic bioconversion, energy supply, photovoltaic module, solar collector, photovoltaic thermal module, modeling, finite element method.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Панченко Владимир Анатольевич

Vladimir A. Panchenko

Сведения об авторе: кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Российского университета транспорта, старший научный сотрудник лаборатории Федерального научного агроинженерного центра ВИМ.

Образование: Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. 2009 г., инженер.

Область научных интересов: возобновляемая энергетика, трёхмерное моделирование, электротранспорт, циклическая экономика и устойчивое развитие.

Публикации: 325.

Индекс Хирша: РИНЦ: 21; **Scopus:** 8; **WoS:** 7; Research Gate – 11.

ORCID iD: 0000-0002-4689-843X

Researcher ID: P-8127-2017

Scopus Author ID: 57201922860

Web of Science Researcher ID: AAE-1758-2019

SPIN-код: 1626-6983

Information about the author: candidate of technical sciences, associate professor of the Department of the Russian University of Transport, senior researcher of the Laboratory of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM.

Education: Moscow State Technical University named after N. E. Bauman. 2009, engineer.

Research interests: renewable energy, 3D modeling, electric transport, circular economy and sustainable development.

Publications: 325.

Чирский Сергей Павлович

Sergei P. Chirsky

Сведения об авторе: кандидат технических наук, доцент кафедры МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Образование: Московский Государственный Технический Университет имени Н. Э. Баумана, 2009 г., инженер.

Область научных интересов: возобновляемая энергетика, прочность и тепловое состояние деталей энергетических установок, моделирование МКЭ.

Публикации: 34.

Индекс Хирша: РИНЦ: 5**, Scopus:** 2.

ORCID ID: 0000-0001-8196-3068

Scopus Author ID: 57216159258

Web of Science Researcher ID: S-5898-2017

SPIN код: 2846-0434

Information about the author: candidate of technical sciences, associate professor of the Department of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman.

Education: Moscow State Technical University named after N. E. Bauman, 2009, engineer

Research interests: renewable energetics, strength and thermal state of power generating systems parts, finite element modeling.

Publications: 34.

Ковалев Андрей Александрович

Andrey A. Kovalev

Сведения об авторе: ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, главный научный сотрудник лаборатории биоэнергетических технологий, доктор технических наук.

Образование: Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) 2009 г., инженер.

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, анаэробная переработка отходов животноводства, производство биогаза из биомассы, теплоэнергетические установки, тепломассообмен.

Публикации: 88.

Индекс Хирша: РИНЦ – 9; **Scopus** – 9.

ResearchGate – 11

SPIN: 4267-3026

Researcher ID: F-7045-2017

ORCID iD: 0000-0002-1983-3454

Scopus Author ID: 57205285134

https://www.researchgate.net/profile/Andrey-Kovalev-8

Information about the author: Federal Scientific Agroengineering Center VIM, chief researcher of the laboratory of bioenergy technologies, doctor of technical sciences.

Education: Moscow state University of railway engineering (MIIT) 2009, engineer.

Current Field of Interest and Activities: renewable energy, anaerobic digestion of animal waste, biogas production from biomass heat and power plants, heat and mass transfer.

Publications: 88.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Литти
Юрий Владимирович

Yuriy V. Litti

Сведения об авторе: ФИЦ Биотехнологии РАН, заведующий лабораторией микробиологии антропогенных мест обитания, кандидат биологических наук.

Образование: Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (РХТУ) 2008 г., инженер.

Область научных интересов: анаэробные микроорганизмы, метаногенные сообщества микроорганизмов, метаногенез, твердые органические отходы, очистка сточных вод, нитрификация, денитрификация, процесс анаммокс, анаммокс-бактерии.

Публикации: 80.

Индекс Хирша: РИНЦ – 12; **Scopus** – 16; **WoS** – 12

SPIN: 1487-7611

Researcher ID: C-4945-2014

ORCID: 0000-0002-5457-4603

Scopus Author ID: 55251689800

Information about the author: Research Center of Biotechnology, Russian Academy of Sciences, head of laboratory of Microbiology of Anthropogenic Habitats, candidate of biological sciences.

Education: D.Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (MUCTR) 2008, engineer.

Research interests: anaerobic microorganisms, methanogenic communities of microorganisms, methanogenesis, solid organic waste, wastewater treatment, nitrification, denitrification, anammox process, anammox bacteria.

Publications: 80.

Караева
Юлия Викторовна

Julia V. Karaeva

Сведения об авторе: Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории энергетических систем и технологий, кандидат технических наук.

Образование: Казанский государственный энергетический университет 2005 г., экономист-менеджер.

Область научных интересов: энергоресурсосбережение и энергоэффективные технологии переработки органических отходов, исследования в области возобновляемых источников энергии.

Публикации: 138

Индекс Хирша: РИНЦ: 8; **Scopus:** 7; **WoS:** 6

ORCID iD: 0000-0002-9275-332X

Scopus Author ID: 56856782800

Web of Science Researcher ID: F-6917-2017

SPIN-код: 3126-2342

Information about the author: Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Leading Researcher, laboratory of Energy Systems and Technologies, candidate of technical sciences.

Education: Kazan State Power Engineering University 2005, economist-manager.

Research interests: energy-resource saving and energy-efficient technologies for processing organic waste, research in the field of renewable energy sources.

Publications: 138

Катраева
Инна Валентиновна

Inna V. Katraeva

Сведения об авторе: кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения, инженерной экологии и химии Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета, научный сотрудник лаборатории ресурсосберегающих биотехнологий НИИ химии Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского.

Образование: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет 1991 г., инженер.

Область научных интересов: анаэробные микроорганизмы, очистка сточных вод, анаэробно-биохимическая очистка, анаэробная переработка отходов животноводства, возобновляемые источники энергии.

Публикации: 134

Индекс Хирша: РИНЦ: 8; **Scopus:** 7

ORCID: 0000-0002-5951-0430

Scopus Author ID: 57191839730

Information about the author: candidate of technical sciences, Associate Professor of the department of water supply, sanitation, engineering ecology and chemistry of Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, researcher at the laboratory of Resource-Saving Biotechnologies, Research Institute of Chemistry of National Research Nizhny Novgorod State University. N. I. Lobachevsky.

Education: Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering 1991, engineer.

Research interests: anaerobic microorganisms, wastewater treatment, anaerobic-biochemical treatment, anaerobic processing of animal waste, renewable energy sources.

Publications: 134

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Список сокращений и обозначений

Сокращения и обозначения	
АБ	Аккумуляторная батарея
АВС	Аппарат вихревого слоя
АС	Анаэробное сбраживание
БГУ	Биогазовая установка
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
ДПК	Двухкомпонентный полисилоксановый компаунд
ЗВ	«Зелёный» водород
КЗ	Контроллер заряда
ОК	Охлаждающий канал
ОО	Органические отходы
РМ	Расчётная модель
СИ	Солнечное излучение
СКЭА	Система конечно-элементного анализа
СМ	Солнечный модуль
СТК	Солнечный тепловой коллектор
СЭ	Солнечная энергия
СУ	Солнечная установка
ТФ	Тепловой фотоприёмник
ТФМ	Теплофотоэлектрический модуль
ТЭ	Тепловая энергия
ФМ	Фотоэлектрический модуль
ФП	Фотоэлектрический преобразователь
ЭВМ	Электронно-вычислительная машина
ЭЭ	Электрическая энергия
Вт	Ватт
Вт/м^2	Ватт на квадратный метр
Вт/(м·К)	Ватт на метр на кельвин
Вт/(м^2·К)	Ватт на квадратный метр на кельвин
Дж/(кг·К)	Джоуль на килограмм на кельвин
К	Кельвин
кг/м^3	Килограмм на кубический метр
кг/ч	Килограмм в час
м	Метр
мм	Миллиметр
м^2	Квадратный метр
м/с	Метр в секунду
Н·с/м^2	Ньютон-секунда на квадратный метр
Па	Паскаль
°С	Градус Цельсия
Латинские и греческие буквы	
pH	Водородный показатель, показатель кислотности
q_c	Мощность падающего солнечного излучения
q	Удельный тепловой поток
$T_п$	Температура модуля
$T_в$	Температура воздуха
Nu	Число Нуссельта
C	Коэффициент, теплоёмкость воды
K	Коэффициент
n	Показатель степени, коэффициент
Gr	Число Грасгофа
Pr	Число Прандтля
g	Ускорение свободного падения
β	Температурный коэффициент объёмного расширения газов
ρ	Плотность воздуха
X	Характерный размер системы
μ	Динамическая вязкость воздуха
c_p	Удельная теплоёмкость воздуха
λ	Коэффициент теплопроводности воздуха
α	Коэффициент теплоотдачи от поверхности
$P_в$	Давление воздуха
$Q_п$	Количество подводимой к модулю теплоты
$Q_о$	Количество отводимой от модуля теплоты
$\alpha_в$	Коэффициент теплоотдачи от верхней поверхности модуля
$\alpha_н$	Коэффициент теплоотдачи от нижней поверхности модуля
X^2	Площадь поверхности модуля
$T_м$	Температура смешения
dP	Потери давления
dT	Изменение температуры воды
W	Ширина канала
H	Высота канала
L	Длина канала
V	Скорость течения воды
l	Расстояние между каналами
W_{add}	Ширина полосы канала
D	Диаметрсечения канала
Ro	Плотность воды
dT	Величина нагрева воды в канале

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

1. Введение

Основной глобальной тенденцией в мировом энергетическом секторе является постепенный переход от ископаемого топлива в энергетике и промышленности ведущих стран мира к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) («глобальный энергопереход») [1-3], основной целью которого является уменьшение выбросов парниковых газов при производстве электрической энергии (ЭЭ) и тепловой энергии (ТЭ), когда водородные технологии играют важную роль в таком процессе [4-6]. «Зелёный водород» (ЗВ) [7-11] является основным драйвером водородной энергетики на сегодня, который производится с помощью ЭЭ от преобразователей ВИЭ [12, 13] и солнечных установок (СУ) [14, 15], в частности. Хотя и производство ЗВ на сегодня дороже по сравнению с производством водорода из ископаемого топлива, стоимость производства ЗВ из года в год уменьшается [16-18], тогда как ЗВ является наиболее экологичным топливом, пригодным как для прямого сжигания [19-22], так и использования в топливных ячейках [23-27].

Производство биоводорода из органических отходов (ОО) с помощью анаэробного сбраживания (АС) также является перспективной технологией [28, 29] при глобальном энергопереходе. Однако при проектировании и использовании биогазовых установок (БГУ) следует учитывать, что экономическая эффективность работы БГУ значительно снижается из-за необходимости использования вырабатываемой энергии (ЭЭ и ТЭ) на различные технологические процессы для её стабильной работы (нагрев, механическая работа, электрические процессы, мониторинг и т.д.) [30, 31].

Таким образом, важным элементом оптимизации работы БГУ и уменьшения стоимости её содержания является поиск и внедрение энергоэффективных решений, уменьшающих и компенсирующих её энергопотребление с помощью преобразователей ВИЭ, когда на сегодня наиболее перспективной, быстро развивающейся и высоко технически реализуемой технологией преобразования ВИЭ является преобразование солнечной энергии (СЭ) с помощью солнечных модулей (СМ) различной конструкции. Использование фотоэлектрических модулей (ФМ) в функционировании БГУ позволяет обеспечить электропитание небольших устройств в различных системах и мониторинга различных процессов БГУ, тогда как в удалённых регионах без централизованного электроснабжения и для электроснабжения систем небольшой мощности подобные устройства находят своё применение [32 - 36].

Основным преобразователем СЭ для теплоснабжения БГУ является солнечный тепловой коллектор (СТК), который имеет более высокую эффективность преобразования солнечного излучения (СИ) (более 50 %), простую конструкцию и невысокую стоимость [37-39] (по сравнению с ФМ), основной задачей которого является нагрев субстрата в термофильном или мезофильном температурных режимах [40-44], когда поиск оптимальной температуры сбраживания в таких системах является первоочередной задачей для повышения эффективности их работы [45, 46].

Одновременное использование ЭЭ и ТЭ, получаемых от СИ для электроснабжения оборудования и нагрев субстрата БГУ, позволяет обеспечивать теплофотоэлектрический модуль (ТФМ), однако в широком доступе исследований по использованию такого типа СМ представлено недостаточное количество, тогда как использование таких СМ может быть достаточно эффективно, благодаря высокой общей эффективности преобразования СИ, что говорит о целесообразности изготовления и исследования подобного рода СМ в натурных условиях. При необходимости получения высоких температур в системах АБ находят своё применение концентраторные солнечные установки [47-51]. Использование ЗВ в БГУ, получаемого также и от ЭЭ, вырабатываемой с помощью ФМ, также позволяет улучшить качество биогаза [52, 53], когда ЗВ связывает углекислый газ и приближает биогаз по своему качеству к натуральному природному газу (биометан) [54-57].

Таким образом, можно сделать вывод о широком использовании СИ и СМ различной конструкции в работе БГУ, когда наибольшее внедрение получили СТК, а исследований по использования ТФМ проводится значительно меньше, хотя такой тип модуля и является достаточно эффективным. Внедрение в энергоснабжение БГУ СМ различной конструкции позволит увеличить экономическую эффективность БГУ, однако эффективность их работы, а также их стоимость являются важнейшими параметрами при проектировании БГУ.

Использование современных систем конечно-элементного анализа (СКЭА) (например Ansys [58]) позволяет уже на этапе проектирования подобных СМ проводить моделирование тепловых процессов СМ [59], что особенно актуально при создании СТК и ТФМ, в котором значительный перегрев фотоэлектрических преобразователей (ФП) снижает электрическую эффективность модуля. В то же время срок службы ФП также играет важную роль при проектировании ФМ, тогда как современные технологии позволяют увеличить срок номинальной мощности ФМ [60], однако для изготовления ТФМ технологии, отличные от ламинирования этиленвинилацетатными плёнками, которая обеспечивает небольшой срок службы ФП, применяются редко. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что важной задачей, ещё на этапе проектирования СМ, является исследование теплового состояния как СТК, так и ТФМ. Когда использование простой и оптимизиро-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ванной конструкции, состоящей из недорогих компонентов, позволяет добиться приемлемых режимов работы модулей, в то время как использование современных технологий герметизации ФП при создании ТФМ увеличит срок их номинальной мощности и повысит эффективность, благодаря их охлаждению и съёму тепла.

2. Технологическая схема БГУ с параллельным энергоснабжением от СМ различных типов

Основываясь на вышеприведённом обзоре использования СЭ для энергоснабжения БГУ, авторами предложена схема тепло- и электроснабжения с помощью СМ различных типов (фотоэлектрического, теплового, теплофотоэлектрического) для энергоснабжения БГУ при параллельной работе с существующей сетью [61] (рисунок 1).

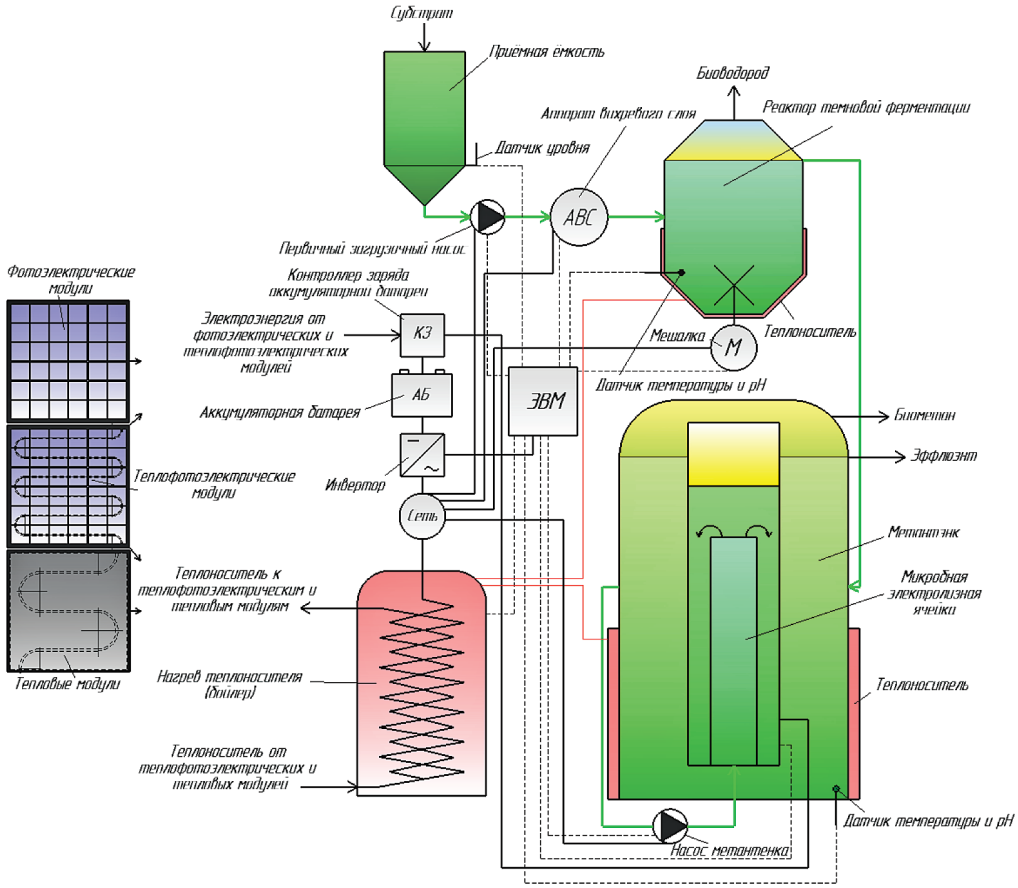


Рис. 1. Технологическая схема БГУ с параллельным энергоснабжением от СМ различных типов [61]

Fig. 1. Technological diagram of a biogas plant with parallel energy supply from solar modules of various types [61]

Теплоноситель БГУ в предложенной схеме нагревается с помощью теплоносителя, нагретого от солнечных ТФМ и СТК, а также, при отсутствии СИ, с помощью централизованной электрической сети, тогда как электроснабжение компонентов БГУ может происходить как от централизованной сети, так и от АБ или же напрямую от СМ при достаточной мощности СИ.

При использовании различных типов СМ возможно получение необходимого тепло- и электроснабжения БГУ – комбинируя составом СМ, зная их номинальную мощность и географическое расположение объекта [61]. Конструкции предлагаемых СМ для этих целей обеспечивают универсальность их расположения – на стене здания, как сайдинг панель, на крыше здания, как стандартный СМ, как отдельное поле СМ в виде наземной СУ.

В результате трёхмерного моделирования разработанных СМ различной конструкции, подготовлены чертежи на ФМ (рис. 2 слева), СТК (рис. 2 посередине) и ТФМ (рис. 2 справа).

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

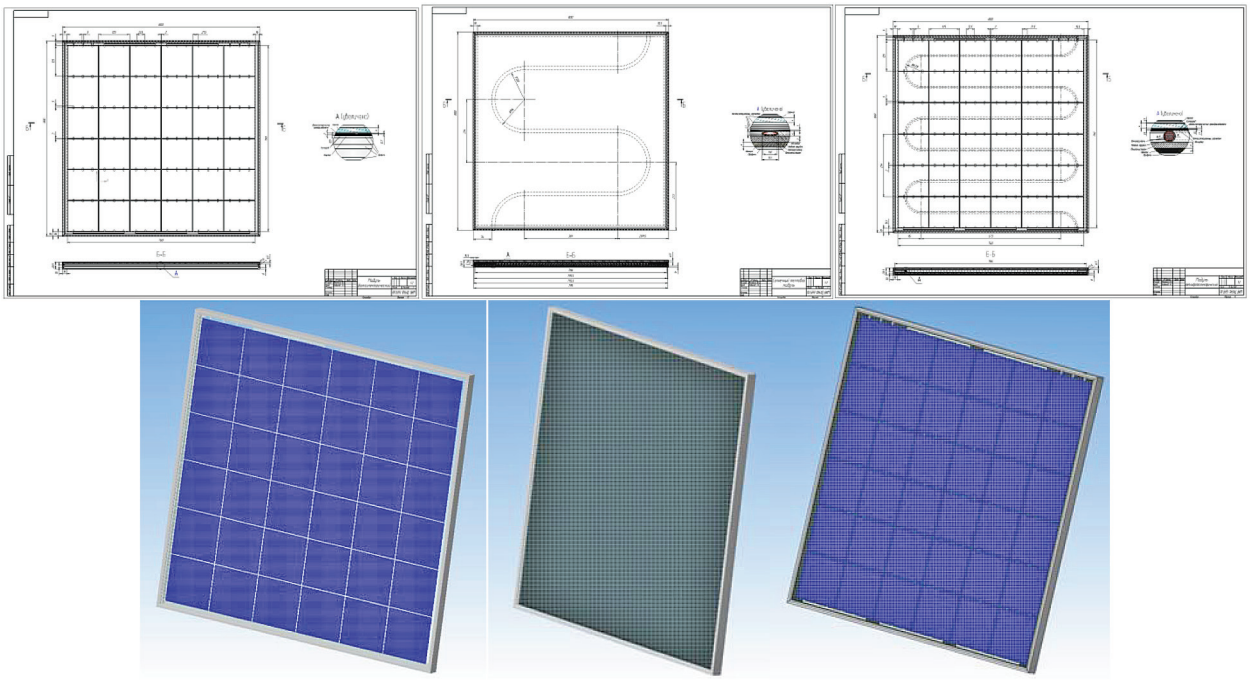


Рис. 2. Трёхмерные модели и чертежи разработанных ФМ (слева), СТК (посередине) и ТФМ (справа)

Fig. 2. Three-dimensional models and drawings of the developed photovoltaic module (left), solar thermal collector (middle) and photovoltaic thermal module (right)

При изготовлении ФМ и ТФМ планируется использовать двухкомпонентный полисилоксановый компаунд (ДПК) в процессе герметизации ФП. Современные ФМ изготавливаются по стандартной технологии ламинирования этиленвинилацетатными плёнками ФП при нагреве и откачке воздуха, однако такая технология имеет ряд недостатков по сравнению с герметизацией ФП с помощью ДПК, который обеспечивает больший диапазон температур эксплуатации ФМ, более высокую стойкость к ультрафиолетовому излучению, больший срок номинальной мощности ФП, меньшее потребление ЭЭ при изготовлении, более высокую оптическую прозрачность для СИ с различными длинами волн, отсутствие корродирующих агентов и механического напряжения при изготовлении и эксплуатации, меньший модуль упругости и линейный коэффициент теплового расширения и т.д. [60]. В конструкции ФМ и ТФМ планируется использовать высокоэффективные ФП с односторонней контактной сеткой. Настенное расположение СМ при контейнерной установке обеспечит высокую выработку энергии в дни низкого солнцестояния, улучшит скатывание пыли и осадков с поверхности СМ и обеспечит охлаждение стен здания в периоды высокого СИ, а в зимний период обеспечит лучшую их теплоизоляцию, что уменьшит потребление энергии на кондиционирование и нагрев внутреннего пространства помещения.

3. Моделирование и изготовление ФМ с помощью процесса герметизации ФП ДПК

С целью оптимизации конструкции и выбора компонентов, входящих в состав СМ различной конструкции, наряду с аналитическими расчётами использовалась СКЭА Ansys [58], которая позволяет визуализировать температурные поля, скорости и линии течения теплоносителя, деформации, а также другие параметры на основе разработанных трёхмерных моделей модулей. Симметричность разработанных конструкций СМ обеспечивает простоту оптимизации теплового режима и конструктивных элементов модуля, минимизацию областей перегрева и недогрева теплового фотоприёмника (ТФ).

На основе разработанной конструкции и полученной трёхмерной модели ФМ большой интерес представляет определение температуры ФП, которые являются основными компонентами ФМ, значительный нагрев которых ведёт к уменьшению напряжения постоянного тока и, соответственно уменьшению электрической мощности и эффективности.

С целью определения температурных полей ФМ в СКЭА была проведена оценка установившейся температуры ФП, когда были сделаны следующие предположения: ФП расположены горизонтально и не имеют покрытия; на модуль падает СИ мощностью q_c = 1000 Вт/м^2; нагрев модуля происходит за счёт поглощения части поступающего СИ мощностью q = 800 Вт/м^2; охлаждение модуля осуществляется только за счёт естественной конвекции с верхней и

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

нижней поверхностей.

Расчёт определяет температуру ФП, при которой выполняется тепловой баланс – равенство тепловых потоков, входящих и выходящих из системы. Определение коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции с верхней и нижней сторон ФП выполняется по формулам из [62].

Число Нуссельта для обеих поверхностей определяется по формуле:

$$Nu = C\cdot(Gr\cdot Pr)^{n}\cdot K \quad (1)$$

Коэффициенты C, K и показатель степени n для верхней и нижней поверхностей модуля имеют различные значения. Для верхней поверхности модуля: C = 0,54, K = 1, n = 0,25, тогда как для нижней поверхности модуля: C = 0,27, K = 1, n = 0,25. Gr – число Грасгофа, которое определяется по формуле:

$$Gr = g\cdot\beta\cdot\rho\cdot\Delta t\cdot X^2/\mu^2, \quad (2)$$

где g = 9,81 м/с – ускорение свободного падения; β – температурный коэффициент объёмного расширения газов, 1/К; ρ – плотность воздуха, кг/м^3; $\Delta t = T_п - T_в$ – разница температур модуля $T_п$ и воздуха $T_в$, К; X – характерный размер системы, м. В данном расчёте характерный размер системы – это длина или ширина модуля, X = 0,8 м, μ – динамическая вязкость воздуха, Н·с/м^2; Pr – число Прандтля, которое определяется по формуле:

$$Pr = \mu\cdot c_р/\lambda, \quad (3)$$

где $c_р$ – удельная теплоёмкость воздуха, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К).

Коэффициент теплоотдачи от поверхности вычисляется по формуле:

$$\alpha = Nu\cdot\lambda/X \quad (4)$$

Расчёт требует учёта изменения характеристик воздуха в зависимости от его температуры. Температурный коэффициент объёмного расширения газов определяется для данной температуры $T_в$, измеренной в градусах по шкале Кельвина, по формуле:

$$\beta = 1/T_в \quad (5)$$

Зависимости плотности, динамической вязкости, удельной теплоёмкости и теплопроводности от температуры заданы полиномиальными функциями.

Плотность воздуха определяется:

$$\rho = P_в/(287{,}4\cdot T_в), \quad (6)$$

где $P_в$ – давление воздуха, Па. В расчёте принимается $P_в$ = 101300 Па.

Динамическая вязкость воздуха:

$$\mu = 1{,}717\cdot 10^{-5}\cdot(T_в/273)^{0{,}683} \quad (7)$$

Удельная теплоёмкость воздуха:

$$c_р = 1000\cdot(1{,}0005+1{,}1904\cdot 10^{-4}\cdot(T_в - 273)) \quad (8)$$

Коэффициент теплопроводности воздуха:

$$\lambda = 2{,}44\cdot 10^{-2}\cdot(T_в/273)^{0{,}82} \quad (9)$$

Количество подводимой к модулю теплоты:

$$Q_п = q\cdot X^2 = 800\cdot 0{,}8^2 = 512 \text{ Вт} \quad (10)$$

Количество отводимой от модуля теплоты:

$$Q_о = \alpha_в\cdot X^2\cdot(T_п - T_в) + \alpha_н\cdot X^2\cdot(T_п - T_в), \quad (11)$$

где $\alpha_в$ – коэффициент теплоотдачи от верхней поверхности модуля, Вт/(м^2·К); $\alpha_н$ – коэффициент теплоотдачи от нижней поверхности модуля, Вт/(м^2·К); X^2 – площадь поверхности модуля, м^2; $T_п$ – температура модуля, К; $T_в$ – температура воздуха, К.

Температура воздуха принимается равной 303 К, при этом параметры воздуха определяются для температуры смешения $T_м = 0{,}5\cdot(T_п + T_в)$.

Далее необходимо определить такую температуру $T_П$, при которой выполняется тепловой баланс $Q_п = Q_о$. В рассматриваемом случае тепловой баланс выполняется при $T_П$ = 359К = 86 °С, что является достаточно высокой температурой и будет сказываться на электрической эффективности ФП, так как их эффективность падает с каждым градусом увеличения температуры ФП.

Расчёт, выполненный в СКЭА Ansys для созданной трёхмерной модели ФМ, позволяет получить более подробную эпюру температурных полей, которая представлена на рисунке 3.

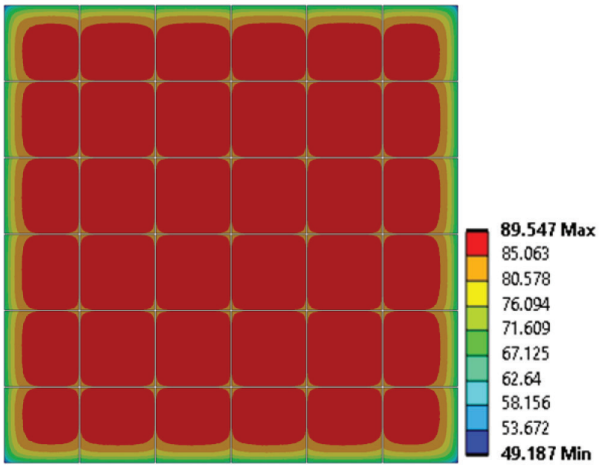


Рис. 3. Эпюра температурных полей трёхмерной модели ФМ

Fig. 3. Diagram of temperature fields of a three-dimensional model of a photovoltaic module

С целью изготовления разработанного ФМ (рис. 4) и последующего испытания его в натурных условиях, разработана Технологическая инструкция по его изготовлению.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

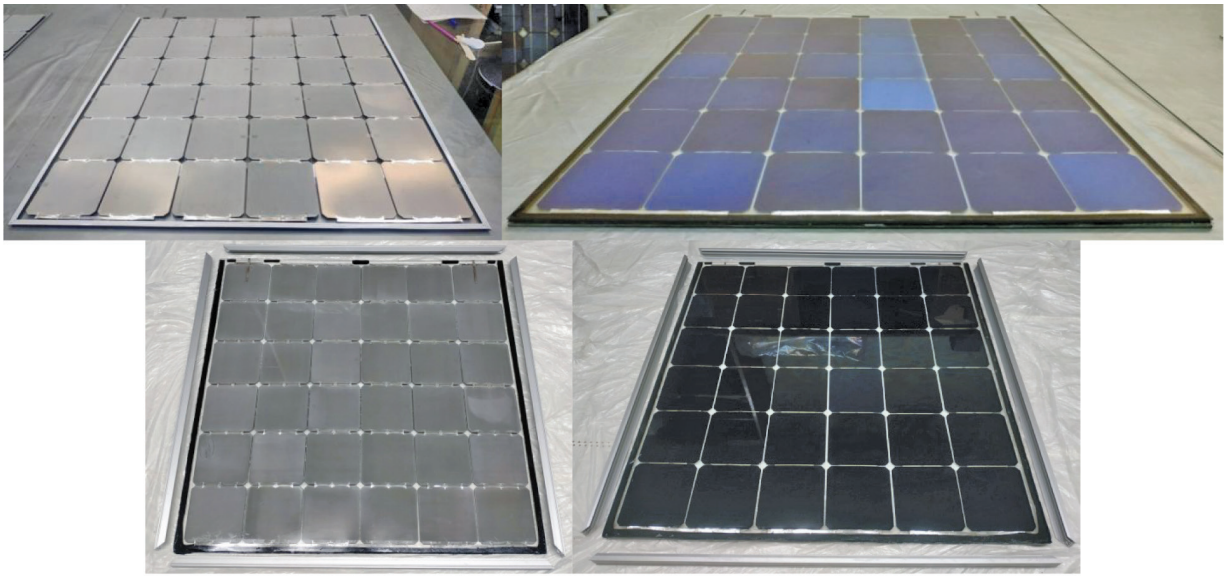


Рис. 4. Сборка ФМ и подготовка пакета для заливки ДПК (сверху) и ФМ с алюминиевыми профилями (снизу)

Fig. 4. Assembling a photovoltaic module and preparing a package for filling with a two-component polysiloxane compound (top) and a photovoltaic module with aluminum profiles (bottom)

Изготовленный ФМ обеспечит электрическое снабжение БГУ – изготавливается из стандартных компонентов, а его электрическая эффективность и мощность будут уточнены после результатов натурных испытаний. Также будут определены температурные характеристики ФМ, а распределение температурных полей будет выполнено с помощью тепловизионного оборудования.

4. Моделирование и изготовление СТК

4.1. Моделирование СТК с водяным радиатором в виде круглой медной трубки

Наибольший интерес при оптимизации конструкции СТК представляет ТФ, водяное охлаждение которого может быть обеспечено с помощью различных компонентов (радиаторов). Форма охлаждающего канала (ОК) влияет на качество теплопередачи от ТФ (адсорбера) к охлаждающей жидкости. Канал круглого сечения в первоначальном варианте разработанной конструкции СТК имеет малую площадь контакта с плоским ТФ.

Воздушный зазор между адсорбером и ОК негативно сказывается на теплопередаче, однако заполнение зазора теплопроводящей средой – пастой, клеем или припоем – улучшает качество теплопередачи (рис. 5).

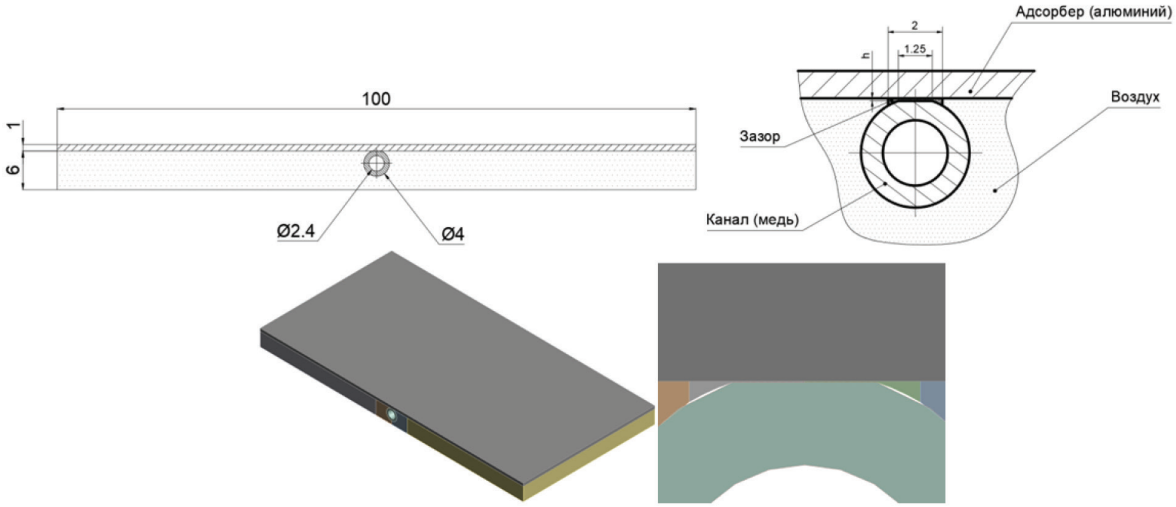


Рис. 5. Расчётная модель (РМ) алюминиевого ТФ и радиатора в виде круглой медной трубки

Fig. 5. Calculation model (CM) of an aluminum thermal photoreceiver and a radiator in the form of a round copper tube

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

В СКЭА рассмотрены различные варианты толщины зазора и материала, заполняющего этот зазор, когда приняты следующие тепловые граничные условия для всех вариантов: для верхней поверхности ТФ задан тепловой поток 1000 Вт/м^2, для внутренней поверхности канала задана конвективная теплоотдача в среду с температурой 35 °С, коэффициент теплоотдачи задан равным 500 Вт/(м^2·К). Для верхней поверхности ТФ задан конвективный теплообмен с коэффициентом теплоотдачи 3 Вт/(м^2·К), температура среды 45 °С, для нижней поверхности воздуха задан коэффициент теплоотдачи 2 Вт/(м^2·К), температура среды 45 °С. Приняты следующие коэффициенты теплопроводности различных материалов в РМ при 273 К – алюминий: 150 Вт/(м·К), воздух: 0,025 Вт/(м·К), медь: 400 Вт/(м·К), паста теплопроводная: 7 Вт/(м·К), припой: 57 Вт/(м·К).

В результате моделирования тепловых процессов в СКЭА Ansys, получены температурные поля для различных зазоров и материалов. На рисунке 6 представлены поля температур модели при толщине зазора 10 мкм (слева) и 100 мкм (справа) для воздуха, теплопроводной пасты и припоя (сверху вниз), заполняющих зазор.

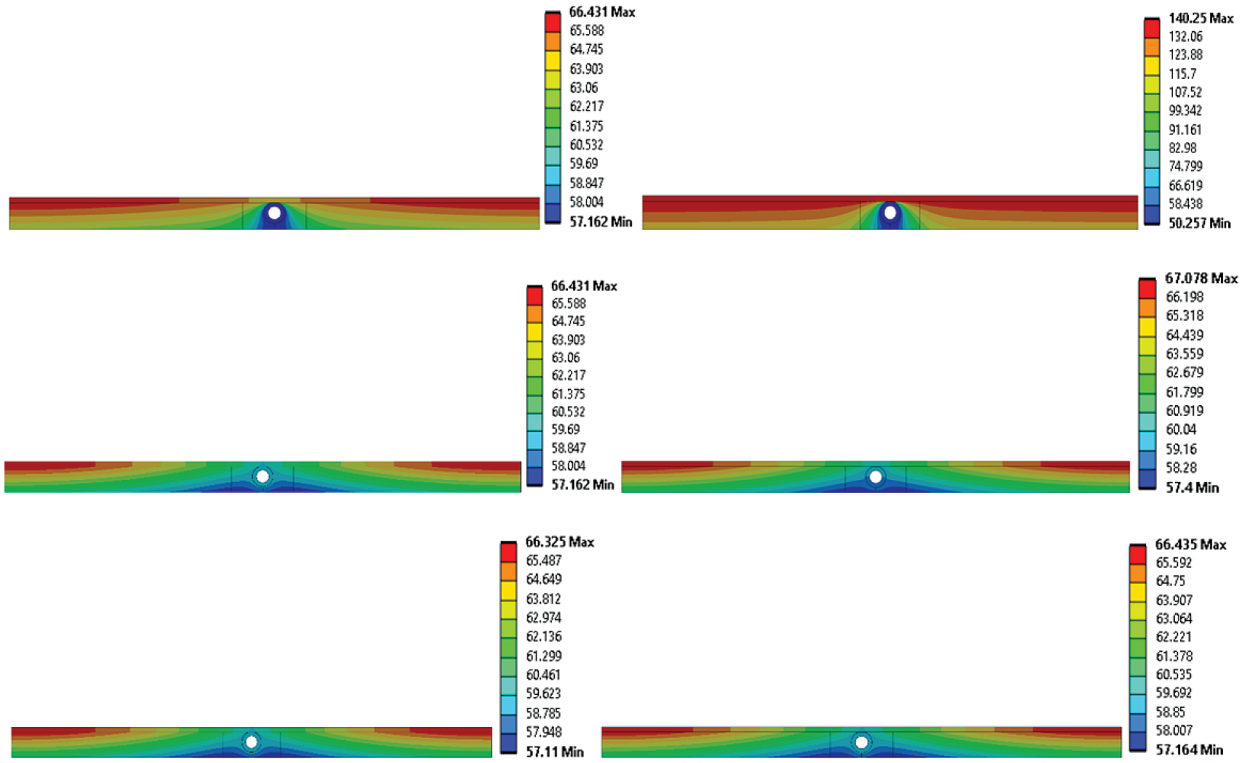


Рис. 6. Поля температур модели при толщине зазора 10 мкм (слева) и 100 мкм (справа) для воздуха, теплопроводной пасты и припоя (сверху вниз), заполняющих зазор

Fig. 6. Temperature fields of the model with a gap thickness of 10 μm (left) and 100 μm (right) for air, thermal paste and solder (from top to bottom) filling the gap

Исходя из вышеуказанных рисунков, даже несмотря на значительную разницу коэффициентов теплопроводности припоя и теплопроводной пасты, разница в эпюрах температур незначительна ввиду малой толщины слоя теплопроводящей среды. Наличие в зазоре между трубкой и тепловым фотоприёмником-адсорбером воздуха, даже при малой толщине зазора ведет к значительному ухудшению теплопередачи от адсорбера к охлаждающему теплоносителю в трубке. Обеспечение идеального контакта с минимальной толщиной зазора между тепловым фотоприёмником-адсорбером и радиаторной металлической трубкой является важной и первоочередной задачей, тогда как такой контакт должен быть обеспечен при всех режимах работы модуля на всём протяжении его срока службы, что является непростой технологической и конструкционной задачей.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

4.2. Моделирование СТК с водяным радиатором в виде овальной медной трубки

Для обеспечения большей площади соприкосновения трубки с тепловым фотоприёмником-адсорбером предложена конструкция СТК с трубкой овального сечения. РМ СТК с медной трубкой овального сечения представлена на рисунке 7.

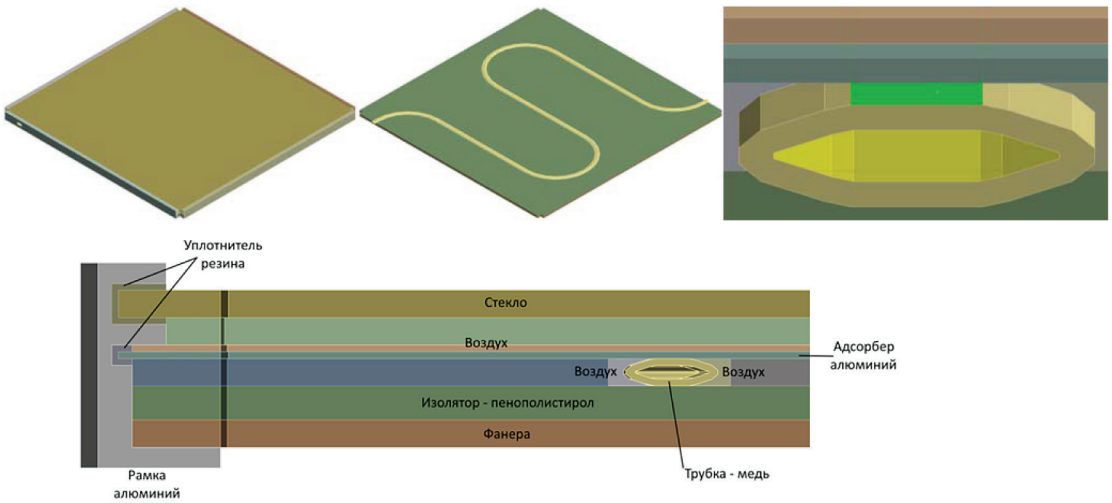


Рис. 7. РМ СТК с медной трубкой овального сечения
Fig. 7. Calculation model of a solar thermal collector with an oval-section copper tube

В результате моделирования тепловых процессов в СКЭА Ansys получены поля температур полной модели (во всём объёме) СТК, представленные на рисунке 8.

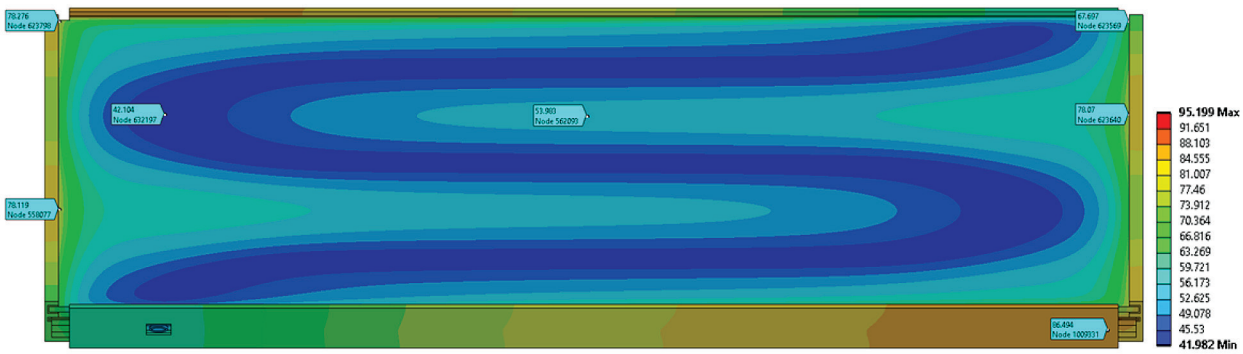


Рис. 8. Поля температур полной модели (во всём объёме) теплового модуля
Fig. 8. Temperature fields of the full model (in the entire volume) of the thermal module

Также на рисунке 9 представлены отдельно поля температур ТФ модуля, распределение которых говорит о целесообразности увеличения витков трубки радиатора (приоритетно) ориентировочно в 2-3 раза или её ширины с целью обеспечения более равномерного теплосъёма и нагрева теплоносителя в виду участков с перегревом фотоприёмника.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

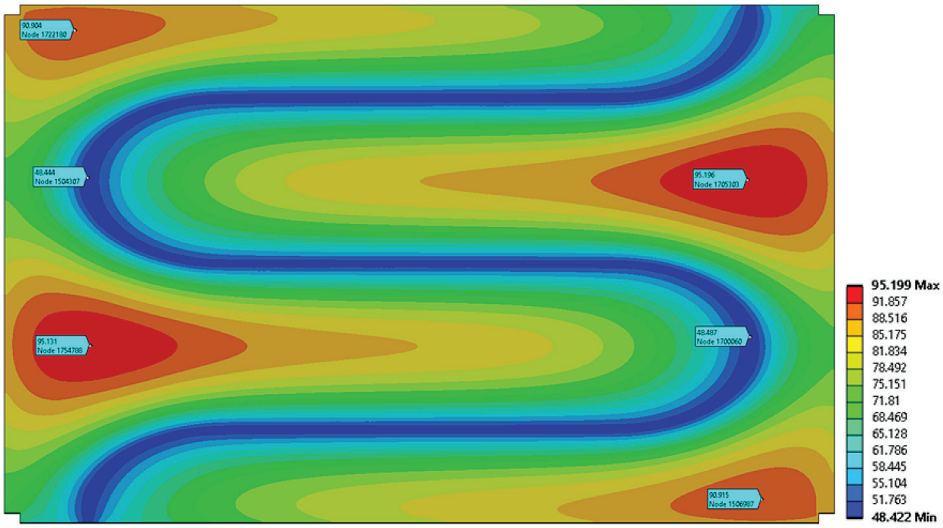


Рис. 9. Поля температур ТФ СТК
Fig. 9. Temperature fields of a thermal photoreceiver of a solar thermal collector

Благодаря большей площади контакта овальной трубки с ТФ теплосъём улучшился по сравнению с трубкой круглой формы, однако всё ещё заметен большой перепад температур (неравномерность температурных полей) и участки с перегревом фотоприёмника. Обеспечение постоянного контакта с минимальным зазором также представляет собой сложную и дорогую технологическую задачу для реализации её на опытном экспериментальном образце, однако, в то же время, для серийного производства рассмотренная конструкция является конкурентоспособной и может показать высокую эффективность.

4.3. Моделирование СТК с прямоугольным каналом радиатора водяного охлаждения

В конструкции СТК, наряду с круглой и овальной трубками, был предложен прямоугольный канал радиатора водяного охлаждения («водяная рубашка») с целью обеспечения прямого и непосредственного контакта теплоносителя (вода) с металлическим ТФ, что будет положительно сказываться на теплосъёме. В предложенной конструкции нет сложности в обеспечении постоянного контакта трубки с ТФ, а ширина канала может быть обеспечена в большом диапазоне, в то время, как возможно обеспечить его минимальную (3-5 мм) высоту, тогда прогрев слоёв воды будет равномерным.

В СКЭА Ansys также было рассмотрено влияние толщины стенок такого прямоугольного канала. Выполнено сравнение полей температур ТФ и канала для прямого участка канала шириной 16 мм и длиной 100 мм, где ширина модели составляет 500 мм, когда рассмотрены 3 варианта конструкции – с толщиной стенок канала 0,5 мм, 1 мм и 1,5 мм. На рисунке 10 представлена РМ для варианта с толщиной стенок канала 0,5 мм.

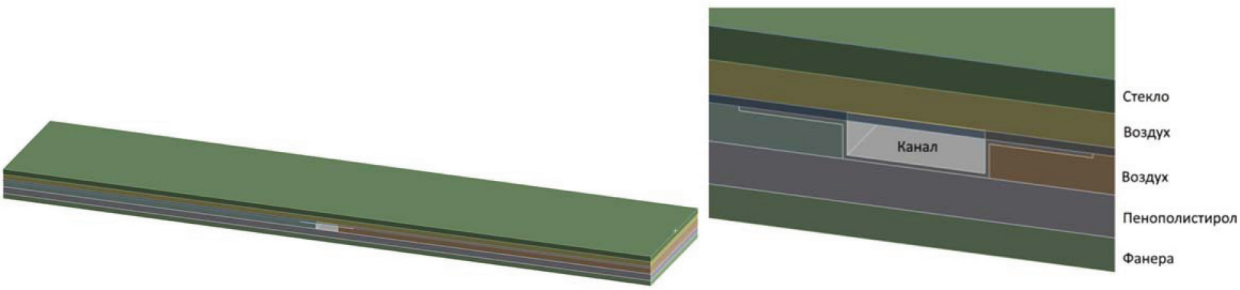


Рис. 10. РМ СТК с прямоугольным каналом с сечением стенок 0,5 мм
Fig. 10. Calculation model of a solar thermal collector with a rectangular channel with a wall section of 0,5 mm

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

В результате моделирования тепловых процессов в СКЭА Ansys получены поля температур каналов с толщиной стенок канала 0,5 мм, 1 мм и 1,5 мм, которые представлены на рисунке 11 (сверху вниз).

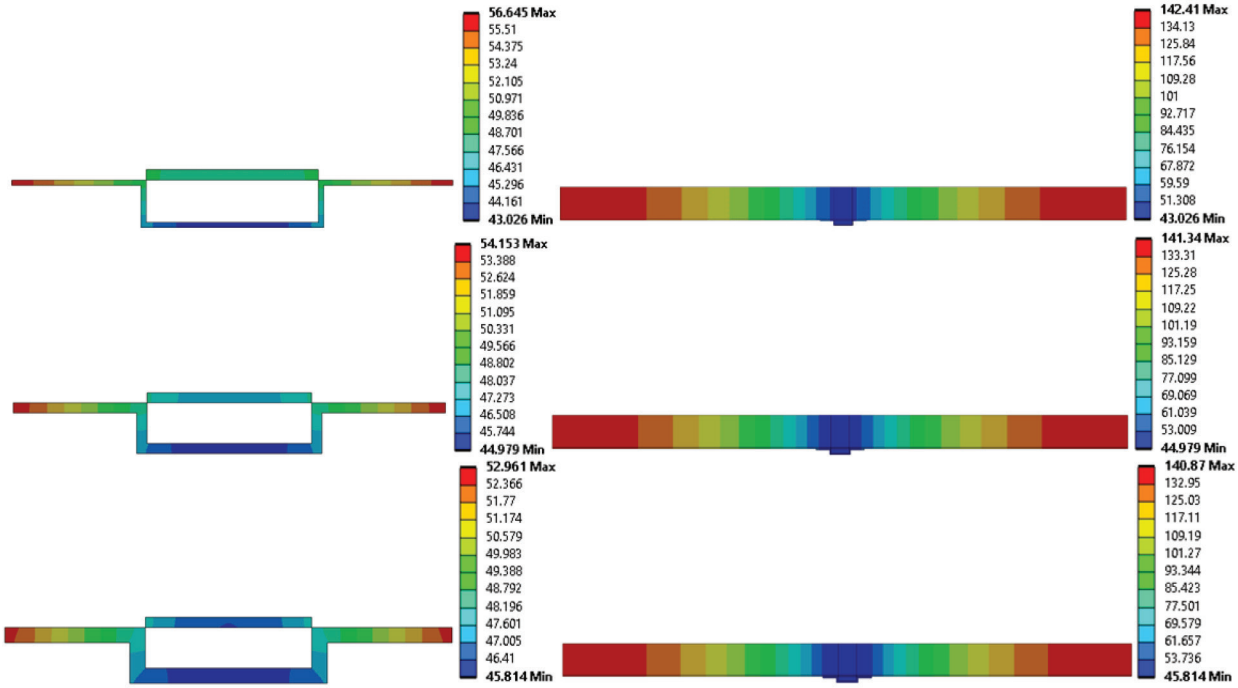


Рис. 11. Поля температур каналов с толщиной стенок канала 0,5 мм, 1 мм и 1,5 мм (сверху вниз)
Fig. 11. Temperature fields of channels with channel wall thicknesses of 0,5 mm, 1 mm and 1,5 mm (from top to bottom)

Как видно из распределений температур, представленных на рисунке 11, толщина стенок канала вносит небольшой вклад в ближайших областях охлаждения ТФ, однако утолщать радиатор и увеличивать его массу и стоимость из-за небольшой разницы температур (в несколько градусов) и распределения температурных полей, нет основополагающей целесообразности.

4.3.1. Оценка потерь давления и величины нагрева воды в прямоугольном канале водяного охлаждения СТК

С целью анализа режима работы радиатора в виде прямоугольного канала, в сечении была проведена оценка потерь давления dP и величины нагрева воды dT в канале в зависимости от его геометрических параметров: ширины W, высоты H и длины L канала (рис. 12), а также от скорости течения V воды в канале [85], когда предполагается, что тепло передаётся в канал через верхнюю грань, а величина теплового потока задана 800 Вт/м^2.

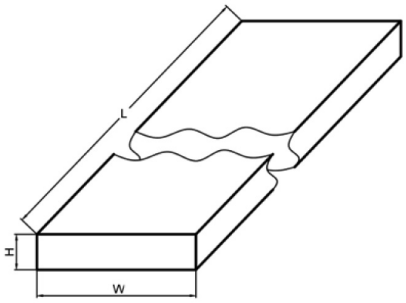


Рис. 12. РМ канала с различными геометрическими параметрами для определения потерь давления и величины нагрева теплоносителя (воды) в нём
Fig. 12. Calculation model of a channel with various geometric parameters to determine pressure loss and the amount of heating of the coolant (water) in it

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Ниже представлены результаты расчётов для каналов шириной W = 10 мм (таблица 1) при скорости течения воды 0,1 м/с.

Таблица 1

Потери давления и нагрев воды для канала шириной 10 мм
при скорости течения воды 0,1 м/с

Table 1

Pressure loss and water heating for a 10 mm wide channel at a water flow speed of 0,1 m/s

	Высота канала H, мм					Высота канала H, мм				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Длина канала L, м	Потери давления dP, Па					Нагрев воды dT, К				
1	768,0	204,0	100,2	60,0	42,0	2,4	1,2	0,8	0,6	0,5
2	1536,0	408,0	200,5	120,1	84,0	4,8	2,4	1,6	1,2	1,0
3	2304,0	612,0	300,7	180,1	126,0	7,1	3,6	2,4	1,8	1,4
4	3072,0	816,0	401,0	240,1	168,0	9,5	4,8	3,2	2,4	1,9
5	3840,0	1020,0	501,2	300,1	210,0	11,9	6,0	4,0	3,0	2,4

Аналогичные расчёты были проведены для течения воды для канала шириной 30 мм со скоростью 0,2 м/с, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2

Потери давления и нагрев воды для канала шириной 30 мм
при скорости течения воды 0,2 м/с

Table 2

Pressure loss and water heating for a 30 mm wide channel at a water flow speed of 0,2 m/s

	Высота канала H, мм					Высота канала H, мм				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Длина канала L, м	Потери давления dP, Па					Нагрев воды dT, К				
1	-	-	170,7	280,4	109,2	-	-	0,4	0,3	0,2
2	-	-	341,3	560,9	218,3	-	-	0,8	0,6	0,5
3	-	-	512,0	841,3	327,5	-	-	1,2	0,9	0,7
4	-	-	682,7	1122,0	436,6	-	-	1,6	1,2	1,0
5	-	-	853,3	1402,0	545,8	-	-	2,0	1,5	1,2

Массовый часовой расход воды для каждого сочетания ширины W, высоты H канала и скорости течения воды представлен в таблице 3.

Таблица 3

Часовые расходы воды для каналов различных размеров
при заданной скорости течения воды

Table 3

Hourly water flow rates for channels of various sizes at a given water flow rate

Высота канала H, мм	Скорость течения 0,1 м/с			Скорость течения 0,2 м/с		
	Ширина канала W, мм					
	10	20	30	10	20	30
	Часовой массовый расход, кг/ч					
1	3,6	7,2	10,8	7,2	14,4	21,6
2	7,2	14,4	21,6	14,4	28,8	43,2
3	10,8	21,6	32,4	21,6	43,2	64,8
4	14,4	28,8	43,2	28,8	57,6	86,4
5	18	36	54	36	72	108

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Исходя из значений, полученных в результате расчётов, можно сделать вывод, что каналы даже малого сечения не создают большого противодавления, однако, в то же время, каналы большего сечения и малой длины не позволяют значительно нагреть воду. Таким образом, следует руководствоваться возможностью технологического процесса изготовления и условий эксплуатации, которые позволят обеспечить минимальный зазор (высоту) канала для лучшего прогрева теплоносителя и уменьшения его объёма для прокачки. С помощью регулирования расхода теплоносителя возможно добиться большего или меньшего его нагрева, варьируя скоростью его течения в канале.

4.3.2. Определение расстояния между прямоугольными каналами радиатора водяного охлаждения для равномерного теплосъёма

С целью оценки влияния расстояния между ОК на равномерность прогрева ТФ и отвод тепла теплоносителем, выполнены сравнительные расчёты в СКЭА для части СТК с ОК, которая состоит из нескольких слоев компонентов СТК.

Подводимая к системе теплота от СИ моделируется тепловым потоком величиной 800 Вт/м^2, заданного для верхней поверхности алюминиевого ТФ. ОК моделируются участками ТФ, для которых задан коэффициент теплопередачи 800 Вт/(м^2·К) и температура среды 30 °С. Расчёты выполнены для вариантов конструкции с различным расстоянием l между охлаждаемыми участками ТФ (рис. 13).

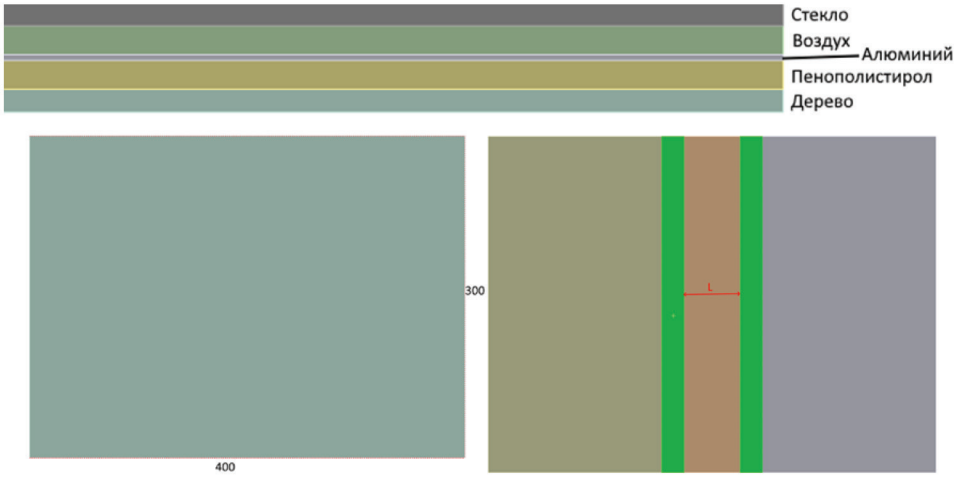
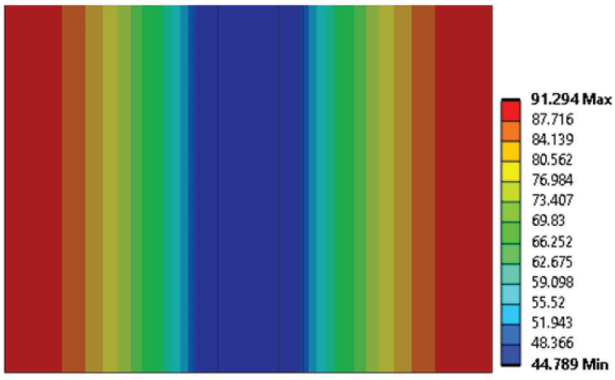


Рис. 13. Расчётная область трёхмерной модели СТК и расстояние l между охлаждаемыми участками ТФ
Fig. 13. Calculation area of the three-dimensional model of the solar thermal collector and the distance l between the cooled sections of the thermal photoreceiver

В СКЭА смоделированы варианты для расстояния l, равного 50 мм, 100 мм, 150 мм и 200 мм, эпюры температур ТФ для которых представлены на рисунке 14.



l = 50 мм

l = 100 мм

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

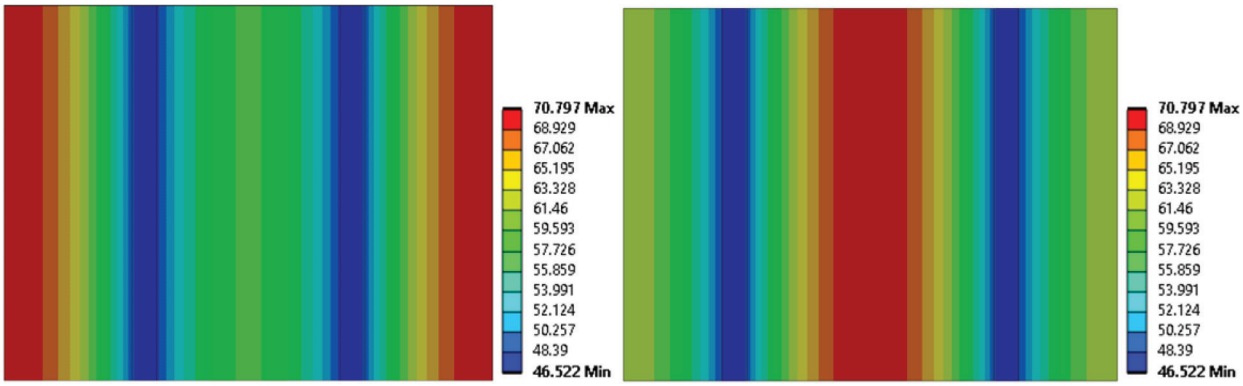


Рис. 14. Эпюры температур ТФ для расстояний l между ОК 50 мм, 100 мм, 150 мм и 200 мм
Fig. 14. Temperature diagrams of a thermal photoreceiver for distances l between cooling channels of 50 mm, 100 mm, 150 mm and 200 mm

В качестве оптимального расстояния l, при котором заметно более равномерное распределение температур ТФ, выполнено дополнительное моделирование для варианта с l = 125 мм (рисунок 15).

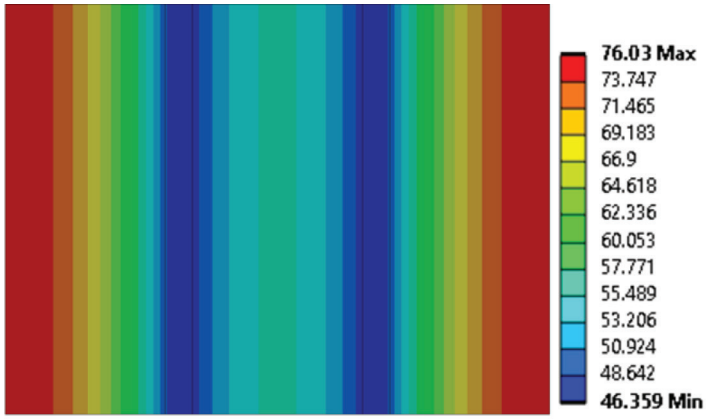


Рис. 15. Визуализация теплового состояния ТФ с относительно равномерным распределением температур между ОК при расстоянии между ними 125 мм
Fig. 15. Visualization of the thermal state of a thermal photoreceiver with a relatively uniform temperature distribution between the cooling channels at a distance between them of 125 mm

В оптимизированном варианте расположения ОК заметно более равномерное распределение температур между каналами, однако уменьшение этого расстояния позволит ещё более сгладить эпюру температур ТФ, тогда как увеличение расстояния между каналами ведёт к образованию областей с перегревом ТФ и образованию больших перепадов температур фотоприёмника между каналами.

4.3.3. Моделирование теплового состояния СТК с полукруглым сечением канала радиатора водяного охлаждения

С целью сравнения нагрева теплоносителя в канале, отличном от прямоугольного в сечении, а также сравнения охлаждения ТФ, в СКЭА выполнено моделирование теплового состояния СТК с ОК полукруглого сечения с радиусом 7,5 мм, размеры которого показаны на рисунке 16.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

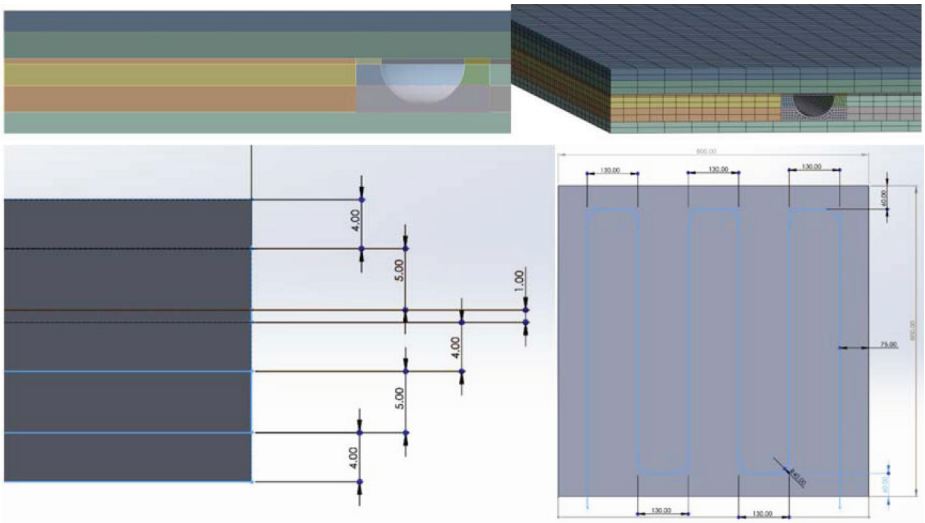


Рис. 16. РМ СТК с ОК полукруглого сечения с радиусом 7,5 мм

Fig. 16. Calculation model of a solar thermal collector with a cooling channel of semicircular cross-section with a radius of 7,5 mm

Для охлаждаемой поверхности канала задан теплообмен с коэффициентом теплоотдачи 400 Вт/(м^2·К), что соответствует течению воды в канале со скоростью 0,1 м/с. Температура среды задана равной 303 К. В результате моделирования в СКЭА получена эпюра температурного поля ТФ в градусах Цельсия, которая представлена на рисунке 17.

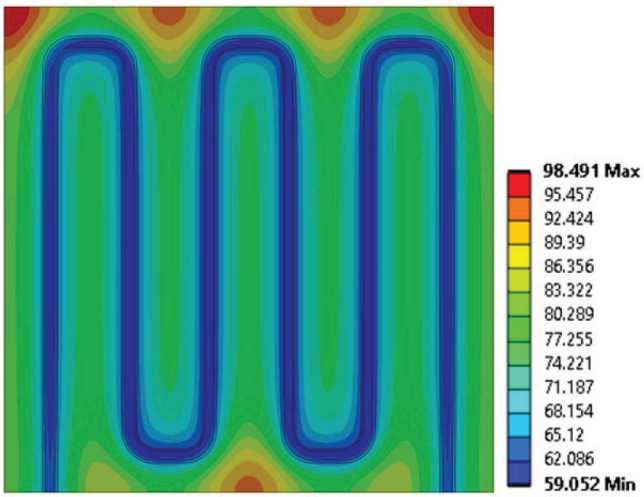


Рис. 17. Эпюра температурного поля в градусах Цельсия ТФ с ОК полукруглого сечения с радиусом 7,5 мм

Fig. 17. Diagram of the temperature field in degrees Celsius of a thermal photoreceiver with a cooling channel of semicircular cross-section with a radius of 7,5 mm

Уточнённый расчёт теплового состояния модели, учитывающий течение воды в ОК, показывает, что интенсивность теплоотдачи от ТФ к охлаждающему теплоносителю (воде) оказывается выше, чем позволяет предположить аналитический расчет. Теплопроводность ТФ увеличивает количество теплоты, отводимой от его поверхности к охлаждающему теплоносителю. Эпюры полей тепловых потоков (в Вт/м^2) и температурных полей (°С) в ТФ показаны на рисунке 18.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

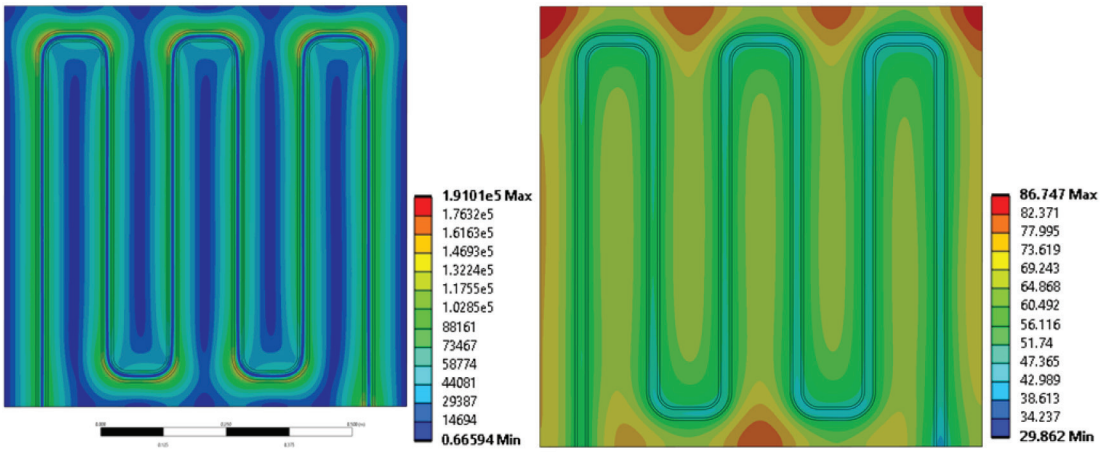


Рис. 18. Эпюра тепловых потоков в ТФ, Вт/м^2 (слева) и эпюра температур ТФ, °С (справа)
Fig. 18. Diagram of heat flows in a thermal photoreceiver, W/m^2 (left) and diagram of temperatures of a thermal photoreceiver, °C (right)

На основе полученных визуализаций, представленных выше, заметен равномерный нагрев ТФ без значительных областей с перегревом. Эпюры температурных полей для воды в ОК показаны на рисунке 19.

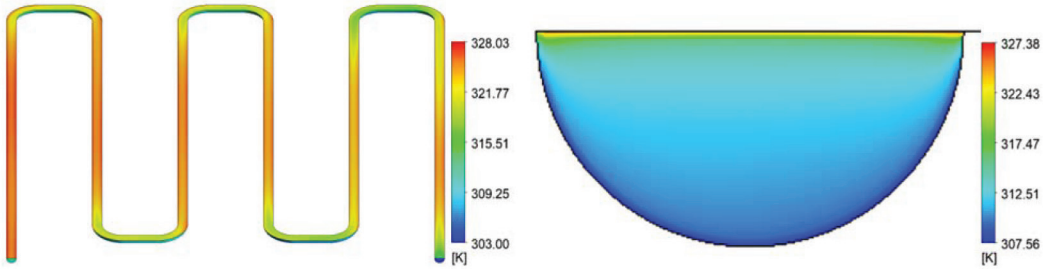


Рис. 19. Эпюры температурных полей для воды в ОК полукруглого сечения с радиусом 7,5 мм
Fig. 19. Diagrams of temperature fields for water in a cooling channel of semicircular cross-section with a radius of 7,5 mm

На основе эпюры температуры воды на выходе из ОК можно сделать вывод, что вода нагревается в среднем до 312 К, то есть её температура увеличивается примерно на 9 градусов при заданных параметрах.

Аналитическая оценка величины нагрева теплоносителя в канале требует уточнения. Основываясь на анализе эпюры тепловых потоков, предположим, что теплота подводится к теплоносителю от полосы ТФ шириной, равной сумме ширины канала и полосы шириной W_{add} = 0,08 м. Предполагаем, что на поверхность ТФ с СИ поступает удельный тепловой поток q = 800 Вт/м^2. Для канала длиной L = 4,5 м с поперечным сечением в форме полуокружности с диаметром D = 0,015 м при скорости течения воды V = 0,1 м/с, плотности воды Ro = 1000 кг/м^3 и теплоёмкости воды C = 4200 Дж/(кг·К) величина нагрева воды определяется по формуле:

$$dT = \frac{q \cdot L \cdot (D + W_{add})}{C \cdot V \cdot Ro \cdot (\frac{\pi \cdot D^2}{8})} \quad (12)$$

Для указанных условий результат расчёта dT = 9,2 К, что достаточно хорошо совпадает с результатом моделирования с помощью СКЭА Ansys.

При заданной толщине ТФ влияние ОК распространяется примерно на 40 мм от его края. С целью обеспечения более равномерного распределения тепловых полей целесообразно увеличение количества тепловых каналов до 7-8 и увеличения их ширины до 20-30 мм, тогда к охлаждающей жидкости будет подводиться больше теплоты, и повышение её температуры также будет больше.

Интенсивность охлаждения ТФ значительно не меняется при изменении формы сечения ОК, а зависит в основном от ширины ОК при одинаковой его высоте, однако разной будет величина нагрева воды, так как в полукруглом ОК размещается больше воды, чем в прямоугольном при малой его высоте. Также, исходя из большей теплопроводности фанеры, в качестве теплоизоляции целесообразнее

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

использование пенополистирола жёсткой конструкции вместо фанеры (увеличение толщины листа пенополистирола в разработанных трёхмерных моделях), чьи теплоизоляционные свойства на порядок лучше дерева.

С целью изготовления разработанного СТК (рис. 20) и последующего испытания его в натурных условиях, разработана Технологическая инструкция по его изготовлению.

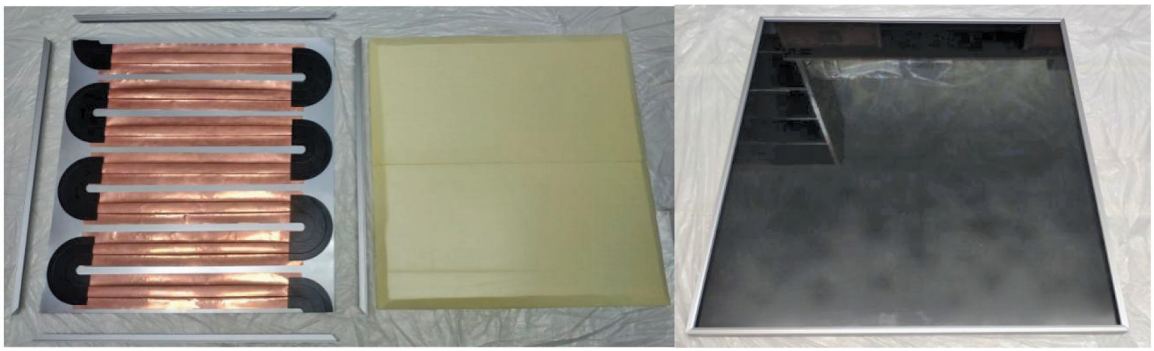


Рис. 20. Водяная рубашка, установленная на тыльную поверхность металлического абсорбера-радиатора, и тыльный теплоизоляционный лист экструдированного пенополистирола (слева), стеклянное покрытие, установленное в алюминиевые профили с металлическим ТФ (справа)

Fig. 20. A water jacket installed on the back surface of a metal absorber-radiator and a back heat-insulating sheet of extruded polystyrene foam (left), glass coating installed in aluminum profiles with a metal thermal photoreceiver (right)

Изготовленный СТК обеспечит тепловое снабжение БГУ, изготавливается из стандартных и недорогих компонентов отечественного производства, а его тепловая эффективность и мощность будут уточнены после результатов натурных испытаний.

5. Моделирование и изготовление ТФМ с помощью процесса герметизации ФП ДПК

Для уменьшения установившейся температуры ФП следует интенсифицировать теплоотдачу от их поверхности. Этого можно достигнуть за счёт принудительного обдува (активного воздушного охлаждения) хотя бы одной из их поверхностей. Изменение ориентации ФМ в пространстве – расположение его не горизонтально, а под некоторым углом к горизонтальной плоскости, мало влияет на расчётную величину коэффициента теплоотдачи, поэтому не ведет к существенному снижению температуры ФМ.

С целью уменьшения нагрева ФП и отвода ТЭ в виде нагрева теплоносителя (воды), что увеличивает как электрическую эффективность, так и общую эффективность СМ, предложена конструкция ТФМ с водяным охлаждением. С целью экономии пространства для установки и денежных средств при приобретении СМ целесообразно использование таких ТФМ для энергоснабжения БГУ, при использовании которых два типа СМ (фотоэлектрический и тепловой) заменяется одним, стоимость которого меньше, чем общая стоимость двух различных, а общая эффективность выше, чем каждого СМ по отдельности.

Исходя из разработанной трёхмерной модели (рис. 2 справа), в СКЭА была оценена жёсткость разработанного ТФМ при действии силы тяжести с целью определения необходимости дальнейшей оптимизации разработанной конструкции ТФМ для уменьшения её массы или увеличения жёсткости конструкции.

Приняты следующие граничные условия РМ: стандартная сила тяжести, направленная противоположно оси ординат; трёхмерная модель закреплена по поверхностям, отмеченным синим цветом на рисунке 21.

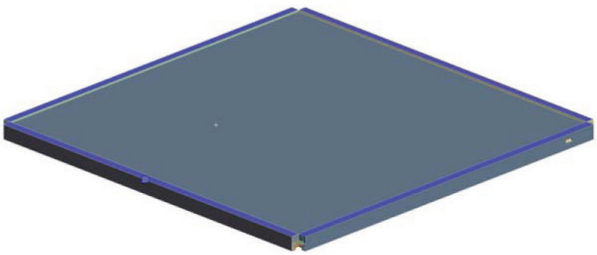


Рис. 21. Поверхности трёхмерной модели ТФМ, по которым закреплена модель (вид снизу)

Fig. 21. Surfaces of a three-dimensional model of a photovoltaic thermal module on which the model is fixed (bottom view)

В результате моделирования эпюр суммарных перемещений в СКЭА Ansys, получены распределения, представленные на рисунке 22.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

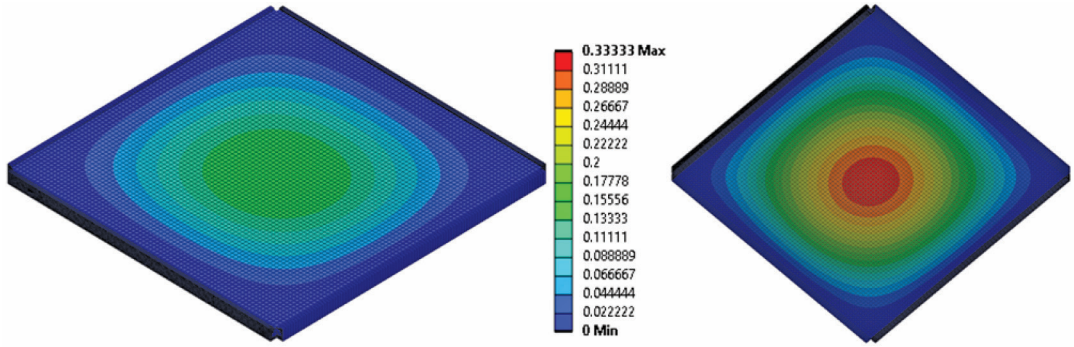


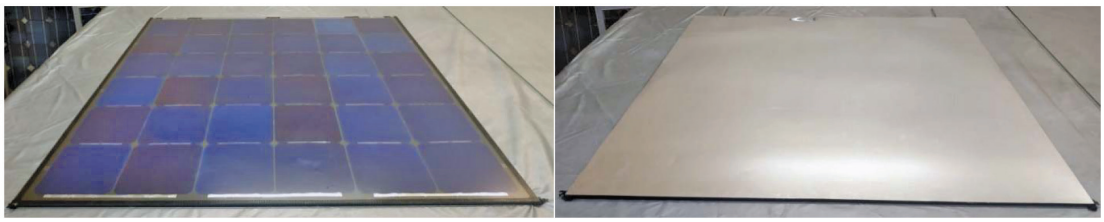
Рис. 22. Эпюра суммарных перемещений трёхмерной модели ТФМ, мм (слева – вид сверху, справа – вид снизу)
Fig. 22. Diagram of the total displacements of a three-dimensional model of a photovoltaic thermal module, mm (left – top view, right – bottom view)

Также проведено моделирование эпюр суммарных перемещений стеклянного покрытия ТФМ, результаты которого представлены на рисунке 23.

Рис. 23. Эпюра суммарных перемещений стеклянного покрытия ТФМ, мм
Fig. 23. Diagram of the total movements of the glass coating of the photovoltaic thermal module, mm

На основе проведённого моделирования и визуализации результатов в СКЭА, можно сделать вывод, что значительных перемещений и деформаций конструкции ТФМ не выявлено, что говорит об устойчивости и надёжности разработанной конструкции, исходя из свойств предложенных материалов и их размеров.

С целью изготовления разработанного ТФМ (рисунок 24) и последующего испытания его в натурных условиях, разработана Технологическая инструкция по его изготовлению.



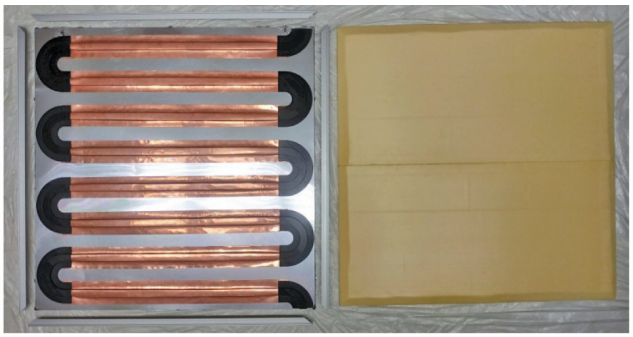


Рис. 24. Сборка ТФМ и подготовка пакета для заливки (сверху), установка водяной рубашки на тыльную поверхность металлического абсорбера-радиатора ТФМ с алюминиевыми профилями и тыльной теплоизоляцией (снизу)
Fig. 24. Assembling the photovoltaic thermal module and preparing the package for filling (top), installing the water jacket on the back surface of the metal absorber-radiator of the photovoltaic thermal module with aluminum profiles and rear thermal insulation (bottom)

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Разработанные технологические инструкции позволяют изготавливать ФМ и ТФМ с помощью процесса герметизации ДПК ФП с односторонней контактной сеткой ручным, а также автоматизированным способом с помощью заливочной машины.

Охлаждение ФП позволяет увеличить их электрическую эффективность, а получаемая ТЭ, где водяное охлаждение ФП имеет простую систему съёма тепла, используется БГУ, когда общая эффективность ТФМ будет больше эффективности ФМ, а высокая электрическая эффективность будет обеспечена благодаря использованию высокоэффективных ФП и ДПК, который также обеспечит большой срок номинальной мощности. Также ТФМ обладает небольшой толщиной и массой, форма сайдинг панели универсальна при расположении модуля на различных поверхностях и также предусмотрена возможность добавления дополнительных лицевого и тыльного теплоизоляционных экранов, что уменьшит тепловые потери ТФМ и увеличит его тепловую эффективность.

6. Заключение

В результате проделанных исследований было проведено моделирование и изготовление СМ фотоэлектрической, тепловой и теплофотоэлектрической конструкции, предназначенных для энергоснабжения БГУ с целью производства биоводорода и биометана. Разработанная технологическая схема БГУ позволит производить энергоснабжение БГУ с помощью разработанных СМ различной конструкции параллельно с существующей сетью. Проведено моделирование ФМ и определена расчётная температура ФП, а также изготовлен ФМ с помощью процесса герметизации ФП ДПК на основе разработанной Технологической инструкции изготовления. Проведено моделирование СТК с водяными радиаторами в виде круглой медной трубки, овальной медной трубки, а также с прямоугольным каналом водяного охлаждения («водяная рубашка»), в котором оценены потери давления и величина нагрева воды. Определены расстояния между прямоугольными каналами радиатора водяного охлаждения для равномерного теплосъёма, а также проведено моделирование теплового состояния СТК с полукруглым сечением канала радиатора водяного охлаждения, после чего был изготовлен СТК на основе разработанной Технологической инструкции. Также проведено моделирование суммарных перемещений ТФМ, которые не выходят за допустимые пределы, и его изготовление с помощью процесса герметизации ФП ДПК на основе разработанной Технологической инструкции изготовления, когда охлаждение ФП позволяет увеличить их эффективность работы, а общая эффективность модуля увеличивается. Благодаря проведённому моделированию СМ различной конструкции и созданию Технологических инструкций их изготовления, были изготовлены СМ с оптимизированными конструкциями, которые планируется испытать в натурных условиях.

7. Направления дальнейших исследований

Представленные исследования являются продолжением работ по выполнению гранта, направленного на повышение эффективности производства чистой энергии за счёт интенсификации анаэробной биоконверсии ОО с использованием СЭ. В будущих работах, связанных с выполнением указанного гранта, планируется провести натурные испытания изготовленных СМ различной конструкции, которые будут проводиться с использованием тепловизионного оборудования для определения областей недогрева и перегрева фотоприёмников, после чего будут сделаны выводы о перспективности разработанных конструкций ТФМ и СТК. В ходе испытаний также будут определены основные электрические и тепловые параметры изготовленных СМ различной конструкции, которые будут сравнены с предварительными значениями. Также будут подготовлены предложения по совершенствованию конструкций и технологий изготовления разработанных СМ различной конструкции на основе проведённых испытаний, предложены рекомендации по использованию СУ, состоящей из разработанных СМ различной конструкции, а также определены возможности для повышения эффективности работы разработанных СМ различной конструкции. В результате проведённых испытаний также планируется внести соответствующие коррективы в конструкции разработанных СМ и технологические инструкции их изготовления.

Благодарности

Исследование выполнено за счёт средств гранта Российского научного фонда № 22-49-02002, https://rscf.ru/project/22-49-02002/

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Список литературы:

[1]. Michael Child, Otto Koskinen, Lassi Linnanen, Christian Breyer (2018). Sustainability guardrails for energy scenarios of the global energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 321-334. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.079.

[2]. Lowe, R. J., Drummond, P. (2022). Solar, wind and logistic substitution in global energy supply to 2050 – Barriers and implications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111720. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111628.

[3]. Maestre V. M., Ortiz, A., Ortiz I. (2021). Challenges and prospects of renewable hydrogen-based strategies for full decarbonization of stationary power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111628. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111628.

[4]. Meiling Yue, Hugo Lambert, Elodie Pahon, Robin Roche, Samir Jemei, Daniel Hissel (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111180. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180.

[5]. Arsad, A. Z., Hannan M. A., Al-Shetwi, Ali Q., Mansur, M., Muttaqi, K. M., Dong, Z. Y., Blaabjerg, F. (2022). Hydrogen energy storage integrated hybrid renewable energy systems: A review analysis for future research directions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(39), 17285-17312. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.208.

[6]. Torbjørn Egeland-Eriksen, Amin Hajizadeh, SabrinaSartori (2021). Hydrogen-based systems for integration of renewable energy in power systems: Achievements and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(63), 31963-31983. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.218.

[7]. Zhijie Chen, Wei Wei, Lan Song, Bing-Jie Ni (2022). Hybrid Water Electrolysis: A New Sustainable Avenue for Energy-Saving Hydrogen Production. *Sustainable Horizons*, 1, 100002. https://doi.org/10.1016/j.horiz.2021.100002.

[8]. Fei-Yue Gao, Peng-Cheng Yu, Min-Rui Gao (2022). Seawater electrolysis technologies for green hydrogen production: challenges and opportunities. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 36, 100827. https://doi.org/10.1016/j.coche.2022.100827.

[9]. Elnaz Asghari, Muhammad Imran Abdullah, Faranak Foroughi, Jacob J. Lamb, Bruno G. Pollet (2022). Advances, opportunities, and challenges of hydrogen and oxygen production from seawater electrolysis: An electrocatalysis perspective. *Current Opinion in Electrochemistry*, 31, 100879. https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100879.

[10]. Ernesto Amores, Margarita Sánchez-Molina, MónicaSánchez (2021). Effects of the marine atmosphere on the components of an alkaline water electrolysis cell for hydrogen production. *Results in Engineering*, 10, 100235. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100235.

[11]. Shams Anwar, Faisal Khan, Yahui Zhang, Abdoulaye Djire (2021). Recent development in electrocatalysts for hydrogen production through water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(63), 32284-32317. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.191.

[12]. Flora Biggins, Mohit Kataria, Diarmid Roberts, Dr Solomon Brown. Green hydrogen investments: Investigating the option to wait. *Energy*, 241, 122842. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122842.

[13]. Ying Zhou, Ruiying Li, Zexuan Lv, Jian Liu, Hongjun Zhou, Chunming Xu (2022). Green hydrogen: A promising way to the carbon-free society. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 43, 2-13. https://doi.org/10.1016/j.cjche.2022.02.001.

[14]. Paolo Giuseppe Mura, Roberto Baccoli, Roberto Innamorati, Stefano Mariotti (2015). Solar Energy System in A Small Town Constituted of A Network of Photovoltaic Collectors to Produce Electricity for Homes and Hydrogen for Transport Services of Municipality. *Energy Procedia*, 78, 824-829. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.002.

[15]. Piyali Chatterjee, Mounika Sai KrishnaAmbati, Amit K. Chakraborty, Sabyasachi Chakrabortty, Sajal Biring, Seeram Ramakrishna, Terence Kin Shun Wong, Avishek Kumar, Raghavendra Lawaniya, Goutam Kumar Dalapati (2022). Photovoltaic/photo-electrocatalysis integration for green hydrogen: A review. *Energy Conversion and Management*, 261, 115648. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115648.

[16]. International Renewable Energy Agency (IRENA) (2020). *Green Hydrogen: A guide to policy making, International Renewable Energy Agency*, Abu Dhabi, 52. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf

[17]. Friedman, S. J., Fan, Z., Tang, K. (2019). «Low-Carbon Heat Solutions for Heavy Industry: Sources, Options, and Costs Today». *New York: Columbia University, Center on Global Energy Policy*. https://www.energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/file-uploads/LowCarbonHeat-CGEP_Report_100219-2_0.pdf.

[18]. Wood Mackenzie Power & Renewables (2019). «Green Hydrogen Production: Landscape, Projects and Costs». https://www.woodmac.com/our-expertise/focus/transition/green-hydrogen-production-2019/.

[19]. Lijun Wang, Chen Hong, Xiangyang Li, Zhenzhong Yang, Shuman Guo, Quancai Li (2022). Review on blended hydrogen-fuel internal combustion engines: A case study for China. *Energy Reports*, 8, 6480-6498. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.04.079.

[20]. Rafig Babayev, Hong G. Im, Arne Andersson, Bengt Johansson (2022). Hydrogen double compression-expansion engine (H2DCEE): A sustainable internal combustion engine with 60%+ brake thermal efficiency potential at 45 bar BMEP. *Energy Conversion and Management*, 264, 115698. https://doi.org/10.1016/j.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

enconman.2022.115698.

[21]. Norhidayah Mat Taib, Mohd Radzi Abu Mansor, Wan Mohd Faizal Wan Mahmood (2021). Combustion characteristics of hydrogen in a noble gas compression ignition engine. *Energy Reports*, 7, 200-218. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.133.

[22]. Balu Jalindar, Shinde, Karunamurthy K. (2022). Recent progress in hydrogen fuelled internal combustion engine (H2ICE) – A comprehensive outlook. *Materials today: Proceedings*, 51(3), 1568-1579. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.378.

[23]. Changeun Park, Sesil Lim, Jungwoo Shin, Chul-Yong Lee (2022). How much hydrogen should be supplied in the transportation market? Focusing on hydrogen fuel cell vehicle demand in South Korea: Hydrogen demand and fuel cell vehicles in South Korea. *Technological Forecasting and Social Change*, 181, 121750. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121750.

[24]. Leonard E. Klebanoff, Sean A. M. Caughlan, Robert T. Madsen, Cody J. Conard, Timothy S. Leach, T. Bruce Appelgate Jr. (2021). Comparative study of a hybrid research vessel utilizing batteries or hydrogen fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(76), 38051-38072. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.047.

[25]. Sebastian Nicolay, Stanislav Karpuk, Yaolong Liu, Ali Elhama (2021). Conceptual design and optimization of a general aviation aircraft with fuel cells and hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(64), 32676-32694. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.127.

[26]. Seyed Ehsan Hosseini (2022). Hydrogen and Fuel Cells in Transport Road, Rail, Air, and Sea. *Comprehensive Renewable Energy (Second Edition)*, 4, 317-342. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00005-4.

[27]. Minnan Ye, Phil Sharp, Nigel Brandon, Anthony Kucernak (2022). System-level comparison of ammonia, compressed and liquid hydrogen as fuels for polymer electrolyte fuel cell powered shipping. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(13), 8565-8584. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.164.

[28]. Lei Zheng, Shikun Cheng, Yanzhao Han, Min Wang, Yue Xiang, Jiali Guo, Di Cai, Heinz-Peter Mang, Taili Dong, Zifu Li, Zhengxu Yan, Yu Men (2020). Bio-natural gas industry in China: Current status and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128, 109925. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109925.

[29]. Hailin Tian, Xiaonan Wang, Ee Yang Lim, Jonathan T. E. Lee, Alvin W. L. Ee, Jingxin Zhang, Yen Wah Tong (2021). Life cycle assessment of food waste to energy and resources: Centralized and decentralized anaerobic digestion with different downstream biogas utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111489. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111489.

[30]. Kovalev A. A., Kovalev D. A., Panchenko V., Kharchenko V. (2021). Intellectualized Control System for Anaerobic Bioconversion of Liquid Organic Waste. *International Journal of Energy Optimization and Engineering*, Volume 10, Issue 1, 56-81, DOI: 10.4018/IJEOE.2021010104.

[31]. Andrey A. Kovalev, Dmitriy A. Kovalev, Victor S. Grigoriev, Vladimir Panchenko (2022). Heat Recovery of Low-Grade Energy Sources in the System of Preparation of Biogas Plant Substrates. *International Journal of Energy Optimization and Engineering*. Volume 11 Issue 1, 1-17, DOI: 10.4018/IJEOE.298693.

[32]. Md. M. Rahman, Mohammad Mahmodul Hasan, Jukka V. Paatero, Risto Lahdelma (2014). Hybrid application of biogas and solar resources to fulfill household energy needs: A potentially viable option in rural areas of developing countries. *Renewable Energy*, 68, 35-45. https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.030.

[33]. Md. Yeamin Ali, Mehadi Hassan, Md. Atiqur Rahman, Abdulla-AI Kafy, Iffat Ara, Akib Javed, Md. Redwanur Rahman (2019). Life cycle energy and cost analysis of small scale biogas plant and solar PV system in rural areas of Bangladesh. *Energy Procedia*, V. 160, 277-284. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.147.

[34]. Md. Mizanur Rahman, Mohammad Mahmodul Hasan, Jukka V. Paatero, Risto Lahdelma (2014). Hybrid application of biogas and solar resources to fulfill household energy needs: A potentially viable option in rural areas of developing countries. *Renewable Energy*, V.68, 35-45. https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.030.

[35]. Muhammad Tamoor, M. Suleman Tahir, Muhammad Sagir, Muhammad Bilal Tahir, Shahid Iqbal, Tasmia Nawaz (2020). Design of 3 kW integrated power generation system from solar and biogas. *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 45, I. 23, 12711-12720. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.207.

[36]. Wiesław Gazda, Wojciech Stanek (2016). Energy and environmental assessment of integrated biogas trigeneration and photovoltaic plant as more sustainable industrial system. *Applied Energy*, V. 169, 138-149. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.037.

[37]. P. Axaopoulos, P. Panagakis, A. Tsavdaris, D. Georgakakis (2001). Simulation and experimental performance of a solar-heated anaerobic digester. *Solar Energy*, V. 70, I. 2, 2001, 155-164. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00130-4.

[38]. Hamed M. El-Mashad, Wilko K. P. van Loon, Grietje Zeeman, Gerard P. A. Bot, Gatze Lettinga (2004). Design of A Solar Thermophilic Anaerobic Reactor for Small Farms. *Biosystems Engineering*, V. 87, I. 3, 345-353. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.11.013.

[39]. Badr Ouhammou, Aggour Mohammed, Smouh Sliman, Abdelmajid Jamil, Bakraoui Mohammed, Fadoua Karouach, Hassan El Bari, Tarik Kousksou (2022). Experimental conception and thermo-energetic analysis of a solar biogas production system. *Case Studies in Thermal Engineering*, V. 30, 101740. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101740.

[40]. M. R. Darwesh, M. S. Ghoname (2021). Experimental studies on the contribution of solar energy as a source for heating biogas digestion units. *Energy Reports*, V. 7, 1657-1671. https://doi.org/10.1016/

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

j.egyr.2021.03.014.

[41]. B. Ouhammou, M. Naciri, M. Aggour, M. Bakraoui, F. Karouach, H. El Bari (2017). Design and Analysis of Integrating the Solar Thermal energy in Anaerobic Digester using TRNSYS: Application kenitra-Morocco. *Energy Procedia*, V. 141, 13-17. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.004.

[42]. Rong Feng, Jinping Li, Ti Dong, Xiuzhen Li (2016). Performance of a novel household solar heating thermostatic biogas system. *Applied Thermal Engineering*, V. 96, 519-526. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.003.

[43]. Yong Lu, Ye Tian, Haowei Lu, Lei Wu, Xianlin Li (2015). Study of solar heated biogas fermentation system with a phase change thermal storage device. *Applied Thermal Engineering*, V. 88, 418-424. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.065.

[44]. Jinping Li, Shirong Jin, Dandan Wan, Hui Li, Shuyuan Gong, Vojislav Novakovic (2022). Feasibility of annual dry anaerobic digestion temperature-controlled by solar energy in cold and arid areas. *Journal of Environmental Management*, V. 318, 115626. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115626.

[45]. Yuan Zhong, Mauricio Bustamante Roman, Yingkui Zhong, Steve Archer, Rui Chen, Lauren Deitz, Dave Hochhalter, Katie Balaze, Miranda Sperry, Eric Werner, Dana Kirk, Wei Liao (2015). Using anaerobic digestion of organic wastes to biochemically store solar thermal energy. *Energy*, V. 83, 638-646. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.070.

[46]. Eid S. Gaballah, Tarek Kh Abdelkader, Shuai Luo, Qiaoxia Yuan, Abd El-Fatah Abomohra (2020). Enhancement of biogas production by integrated solar heating system: A pilot study using tubular digester. *Energy*, V. 193, 116758. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116758.

[47]. Vikram P. Rathod, Jotiprasad Shete, Purnanand V. Bhale (2016). Experimental investigation on biogas reforming to hydrogen rich syngas production using solar energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 41, I. 1, 132-138. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.09.158.

[48]. Bosheng Su, Wei Han, Hongguang Jin (2017). Proposal and assessment of a novel integrated CCHP system with biogas steam reforming using solar energy. *Applied Energy*, V. 206, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.028.

[49]. Bosheng Su, Wei Han, Xiaosong Zhang, Yi Chen, Zefeng Wang, Hongguang Jin (2018) Assessment of a combined cooling, heating and power system by synthetic use of biogas and solar energy. *Applied Energy*, V. 229, 922-935. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.037.

[50]. A. S. Mehr, M. Gandiglio, M. Mosaye Nezhad, A. Lanzini, S.M.S. Mahmoudi, M. Yari, M. Santarelli (2017). Solar-assisted integrated biogas solid oxide fuel cell (SOFC) installation in wastewater treatment plant: Energy and economic analysis. *Applied Energy*, V. 191, 620-638. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.070.

[51]. G. Zhang, Y. Li, Y. J. Dai, R. Z. Wang (2016). Design and analysis of a biogas production system utilizing residual energy for a hybrid CSP and biogas power plant. *Applied Thermal Engineerin*g, V. 109, Part A, 423-431. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.092.

[52]. Minli Yu, Ke Wang, Harrie Vredenburg (2021). Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(41). https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.016.

[53]. Hermesmann M., Müller T. E. (2022). Green, Turquoise, Blue, or Grey? Environmentally friendly Hydrogen Production in Transforming Energy Systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 90, 100996. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.100996.

[54]. Chun-Yu Lai, Linjie Zhou, Zhiguo Yuan, Jianhua Guo (2021). Hydrogen-driven microbial biogas upgrading: Advances, challenges and solutions. *Water Research*, V. 197, 117120. https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117120.

[55]. Irini Angelidaki, Laura Treu, Panagiotis Tsapekos, Gang Luo, Stefano Campanaro, Henrik Wenzel, Panagiotis G. Kougias (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, V. 36, I. 2, 452-466. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011.

[56]. Diego Curto, Mariano Martín (2019). Renewable based biogas upgrading. *Journal of Cleaner Production*, V. 224, 50-59. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.176.

[57]. Shanfei Fu, Irini Angelidaki, Yifeng Zhang (2021). In situ Biogas Upgrading by CO2-to-CH4 Bioconversion. *Trends in Biotechnology*, V. 39, I. 4, 336-347. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.08.006.

[58]. Ansys. Engineering Simulation Software. https://www.ansys.com/

[59]. Panchenko V., Chirskiy S., KharchenkoV. V. Application of the Software System of Finite Element Analysis for the Simulation and Design Optimization of Solar Photovoltaic Thermal Modules. *Handbook of Research on Smart Computing for Renewable Energy and Agro-Engineering*, 2019, 106-131, DOI: 10.4018/978-1-7998-1216-6.ch005.

[60]. Panchenko V., Izmailov A., Kharchenko V., Lobachevskiy Ya (2020). Photovoltaic Solar Modules of Different Types and Designs for Energy Supply. *International Journal of Energy Optimization and Engineering*, Volume 9, Issue 2, 74-94. DOI: 10.4018/IJEOE.2020040106.

[61]. Panchenko V. A., Daus Yu. V., Kovalev A. A., Litty Yu. V., Katraeva I. V. Modeling the energy supply of a biogas plant based on solar modules of various designs. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 51, Part D, 2023, 119-129. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.320.

[62]. Wong H. Y. *Handbook of essential formulae and data for Heat Transfer for Engineers* (1977). London, New York: Longman, 236 pp.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Статья поступила в редакцию 12.02.24. Ред. Рег. № 2269-5003-1 The article has entered in publishing office 12.02.24 Ed. Reg. No. 2269-5003-1

УДК 621.472.383.56

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE USE OF THE HEAT COLLECTOR IN SMALL POWER PHOTOELECTRIC PANELS

Toshpulatov Sirojiddin Furqat ugli,

Termez State University, Barkamol avlod Str. 43, Termez 190111, Uzbekistan
e-mail: toshpulatovs@tersu.uz

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.037-042

Referred: 25.02.24 Received in revised form: 26.02.24 Accepted: 29.02.24

The main aim of our experiment is to analyze the electrical parameters of PVT (photothermal) and PV (photoelectric) panels with a power of 60 W. It also consists of studying the influence of the heat collector (HC) on the main electrical parameters. The results obtained in our article were measured in a stationary state. The tilt angle of both panels is $\theta = 30°$, taking into account that when the sun is at the zenith point, solar radiation falls vertically to the panel. Electrical parameters were measured every half hour. As a result of the experiment, it was found that the power produced by the PVT panel in the operation mode of the heat collector is maximum 5,2 % higher than the power of the PV panel. It was found that the effect of the heat collector increases the value of the open circuit voltage, but has almost no effect on the short circuit current. To add this that heat losses of the power can be kept to a minimum level under the influence of the heat collector on high temperature days.

Keywords: photothermal, photoelectric, power, short circuit current, open circuit voltage, solar radiation, electric efficiency.

Тошпулатов Сироджиддин Фуркат угли. Анализ эффективности использования теплоколлектора в Фотоэлектрических панелях малой мощности // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 02 (419) 2024, с. 37-42

Toshpulatov Sirojiddin Furqat ugli. Analysis of the efficiency of the use of the heat Collector in small power photoelectric panels // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 02 (419) 2024, pp. 37-42

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОКОЛЛЕКТОРА В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАНЕЛЯХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Тошпулатов Сироджиддин Фуркат угли

Термезский государственный университет, ул. 43, Термез 190111, Узбекистан
e-mail: toshpulatovs@tersu.uz

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.037-042

Заключение совета рецензентов: 25.02.24 Заключение совета экспертов: 26.02.24 Принято к публикации: 29.02.24

Основная цель нашего эксперимента – анализ электрических параметров PVT (фототермических) и PV (фотоэлектрических) панелей мощностью 60 Вт. Она также заключается в изучении влияния теплового коллектора (ТК) на основные электрические параметры. Результаты, полученные в нашей статье, были измерены в стационарном состоянии. Угол наклона обеих панелей составляет θ = 30° с учетом того, что при нахождении Солнца в зените солнечное излучение падает на панель вертикально. Электрические параметры измерялись каждые полчаса. В результате эксперимента установлено, что мощность, вырабатываемая PVT-панелью в режиме работы теплосборника, максимально на 5,2 % превышает мощность фотоэлектрической панели. Установлено, что воздействие теплосборника увеличивает величину напряжения холостого хода, но практически не влияет на ток короткого замыкания. Добавим к этому, что тепловые потери электроэнергии можно свести к минимальному уровню под воздействием теплового коллектора в дни с высокой температурой.

Ключевые слова: фототермический, фотоэлектрический, мощность, ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, солнечное излучение, электрический КПД.

Toshpulatov Sirojiddin Furqat o’g’li (ugli)

Тошпулатов Сироджиддин Фуркат угли

Author information: PhD student, Termez state university «Theoretical physics» department.

Education: National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek. (UzMU) (2020).

Scientific interests area: Renewable energy sources, solar energy.

Publications: 10 scientific works. Scopus h-index. https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58036200400

Сведения об авторе: аспирант, кафедры «Теоретическая физика» Термезского государственного университета.

Образование: Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека. (УзМУ) (2020 г.).

Область научных интересов: Возобновляемые источники энергии, солнечная энергия.

Публикации: 10 научных трудов.

Индекс Хирша: Scopus – 2. https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58036200400

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Introduction

Today, a number of projects related to the use of renewable energy sources are being implemented abroad and in our country. Solar energy is one of the main renewable energy sources. However, there are several factors that negatively affect the performance of PVs [1-4]. Among these factors, one of the main factors is the reduction of electrical efficiency as a result of the heating of a large part of the solar energy falling on the PV surface without turning into electrical energy [5-7]. In order to reduce such electrical losses, active, passive and hybrid cooling methods are used [8-10]. Depending on the purpose and function of each cooling method, distinctive results are obtained. In addition, the compatibility of the cooling method with the requirements of the specified area is also an important factor. A system of PV combined with a thermal collector is called PVT. Various types of heat collectors are used to cool PVTs. As a coolant, various liquids, mainly water, in some cases air are used and they are passed through heat collectors. In addition, cooling using thermocouples is also effective in regions with water scarcity [11, 12]. In addition, air cooling with coolers is also appropriate in water-scarce areas [13]. Heat collectors of different materials and shapes were tested in PTBs [14]. The influence of reflectors on PVT panel parameters is also widely covered in many works, and its main function is to increase the radiation energy coming from the sun and protect PV panels from dusting [15, 16]. Polycarbonate collector has been tested in PVTs of different power [17-20], the main advantage is the flat surface and uniform parallel movement of the coolant along the polycarbonate channel. These are the advantages of the polycarbonate collector over copper, air or other heat collectors [21, 22].

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Table of abbreviations and designations	
List of symbols	
Letters of the Latin alphabet	
S_{PV}	PV surface
d	PV frame width
S_q	The surface of the back cover
d_q	The thickness of the back cover
P_{max}	Maximum power of PV
U_{oc}	Open circuit voltage of PV
I_{sc}	Short circuit current of PV
FF	The fill factor of the PV's volt-ampere characteristic
Letters of the Greek alphabet	
η	Electrical efficiency of PV
θ	The tilt angle

1. Material and methods

In our article, the electrical efficiency of two identical 60 W PV and PVT panels was studied. In this case, the measurements were carried out in the open air in the summer between 9:00 and 17:00. Short circuit current and open circuit voltage were measured simultaneously at half-hour intervals. Before the start of the experiment, both panels were installed on a special device at a nominal angle, so that the rays fall vertically on the surface of the panel during the zenith of the sun (Fig. 1). In June, $\theta = 30°$ is the installation angle in the stationary mode for the region of Tashkent city.

Fig. 1. Overview of PV and PVT panels
Рис. 1. Обзор фотоэлектрических и PVT-панелей

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Table 1 shows the general electrical parameters and dimensions of our panels. During the experiment, external parameters such as solar radiation, ambient temperature, wind speed and humidity were also measured at the same time.

Table 1

Geometric dimensions, physical and technical characteristics of PVT parts

Таблица 1

Геометрические размеры, физико-технические характеристики деталей PVT

Parameters	Dimension
Geometric dimensions	
PV surface, SPV	0,33 m^2
PV frame width, d	2,5 sm
The surface of the back cover, Sq	0,33 m^2
The thickness of the back cover, dq	4 mm

Physical and technical characteristics	
Maximum power of PV, Pmax	60 W
Electrical efficiency of PV, η	18,36 %
Open circuit voltage of PV, Uoc	21,6 V
Short circuit current of PV, Isc	3,53 A
The fill factor of the PV's volt-ampere characteristic, FF	0,786

The article focuses on the heat collector, which is made of polycarbonate with parallel channels. Unlike the previous work, the prepared heat collector is glued to the back of the PV panel with thermal paste. The aim is to increase the efficiency of heat exchange and thereby restore the open circuit voltage. In this case, attention is focused only on restoring electrical efficiency. In addition, the efficiency of the obtained thermal energy was not analyzed in our work.

2. Results

In our experiment, short circuit current, open circuit voltage and solar radiation falling on the panel surface of PV panels were measured every 30 minutes. On June 3, the air temperature rose from 31 °C to a maximum of 35 °C. The average wind speed varied from 0,3 m/s to 5 m/s. Our panels were stationary during the measurement. Figure 2 presents graphs of short circuit current and solar radiation of both panels over time. As can be seen from the graphs, both parameters are very similar each other. The graph also indicates that the short circuit current is directly proportional to the radiation. These indicators of both panels are equal. The time dependence of the solar radiation falling on the surface of the panels is shown in Figure 2. At 12:30 p.m., the highest value of almost 975 w/m^2 was recorded. And that time short circuit current was 3,35 A which was maksimum data in the day for both panels.

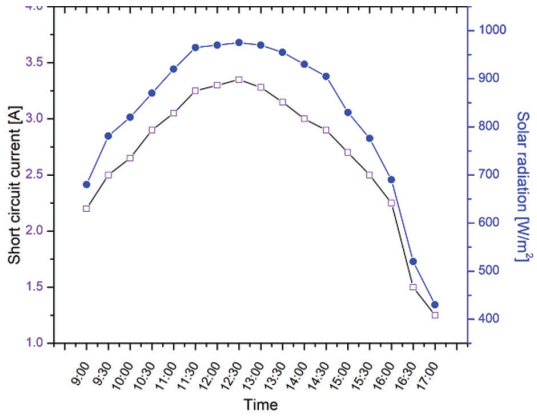


Fig. 2. Time dependence of I_{sc} and solar radiation in PV and PVT panel
Рис. 2. Временная зависимость I_{sc} и солнечной радиации в фотоэлектрических и PVT-панелях

Open circuit voltage drops due to increase in panel temperature. In this case, in the PV panel, this value dropped sharply at the beginning of the day and remained at its value of 19,8 V after the solar zenith point. However, at the beginning of the experiment in the cooled PVT, due to the fact that water was not transferred from the heat collector, the open circuit voltage dropped sharply to a minimum of 19,2 V. The reason for such a sharp drop is the absence of convection heat exchange between the PVT and the environment. With the start of cooling, the open circuit voltage began to increase sharply and rose to 20,8 V and remained almost at this value until the end of the experiment.

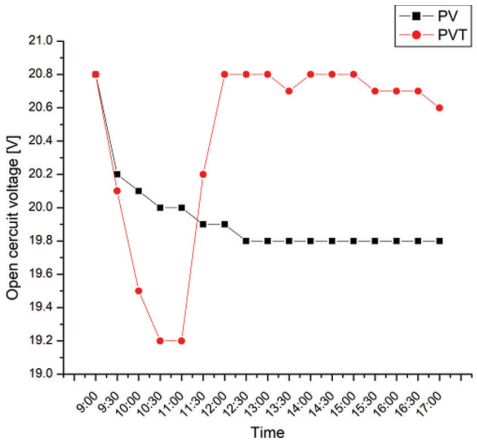


Fig. 3. Dependence of open circuit voltages on time of the day
Рис. 3. Зависимость напряжений холостого хода от времени суток

The differences in the open circuit voltages are equal to 1 V, which ensures the preservation of the efficiency of the PVT panel. Therefore, if we also analyze the power graphs (Fig. 4). Of course, power is one of the most important quantities. It can be easily calculated using the obtained parameters.

$$P = FF \cdot I_{sc} \cdot U_{oc} \quad (1)$$

Figure 4 shows the power values of both panels, and we can see that the power value produced by the PVT panel was always greater when it cooled. The maximum values reached at 12:30 were 54,8 W for the PVT panel and 52,1 W for the PV panel. This means that the PVT panel has 5,2 % more power at the peak value. Power differences would have been even greater on hot summer days. The reason is explained by the fact that the open circuit voltage in the cooling PVT panel does not change much, but the PV panel indicator drops. During the experiment, the difference between the incoming and outgoing water varied from 10 ^{0}C to 12 ^{0}C. Bu esa qo'shimcha issiqlik energiya degani. This heat energy can also be used effectively.

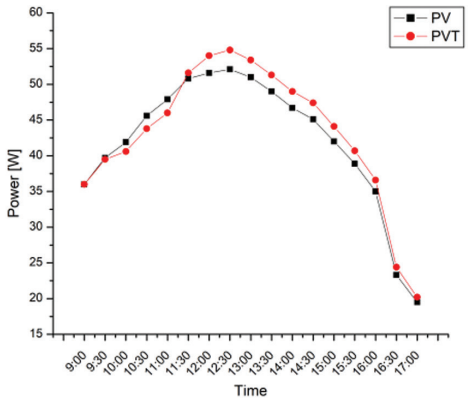


Fig. 4. Time dependence of the power of PV and PVT panels
Рис. 4. Зависимость мощности фотоэлектрических и PVT-панелей от времени

It can be seen from the results that the cooling gave its result. The difference between PVT and PV panel capacities also increases on hot days. This ensures PVT panel performance advantage on high temperature days.

3. Conclusion

From the experimental results in natural conditions, we can conclude that the PVT panel is able to provide more power by 5,2 % compared to the normal panel. In addition, It will also be possible to get hot water from HC. The use of HC on hot days minimizes temperature-induced electrical losses. The use of reflectors for such a PVT system increases the efficiency of electrical and thermal energy several times.

Acknowledgment

The author express our gratitude to the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan of the Institute of Physical-Technical and Termez State University for all their scientific and technical support.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

References

[1]. Mamun, M. A. A., Islam, M. M., Hasanuzzaman, M., & Selvaraj, J. Effect of tilt angle on the performance and electrical parameters of a PV module: Comparative indoor and outdoor experimental investigation. Energy and Built Environment. Vol. 3, pp. 278-290, 2022, https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.02.001

[2]. Fouad, M. M., Shihata, L. A., Morgan, E. S. I. An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 80, pp. 1499-1511, 2017, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.141

[3]. IEA, Net renewable capacity additions by technology, 2017-2023, IEA, Paris https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/net-renewable-capacity-additions-by-technology-2017-2023, IEA. Licence: CC BY 4.0

[4]. Abdiev U. B., Yuldoshov B. A. Inspection electrical and heat parameters of photovoltaic-thermal battery, studying the effects of pollution / Scientific reports of Bukhara state university. Bukhara, 2021, № 5-6. pp. 2-20.

[5]. Boysori Yuldoshov, Elyor Saitov, Jasur Khaliyarov, Sardor Bobomuratov. Effect of Temperature on Electrical Parameters of Photovoltaic Module // Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT. Volume 11, Issue 1, pp. 291-295. (DOI: 10.25673/101957)

[6]. A. R. Amelia, Y. M. Irwan, W. Z. Leow, M. Irwanto, I. Safwati, M. Zhafarina. «Investigation of the Effect Temperature on Photovoltaic (PV) Panel Output Performance». International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology, Vol. 6 (2016). – № 5, pp. 682-688.

[7]. Yogeswara Rao Golive, Anil Kottantharayil, Narendra Shiradkar. Improving the accuracy of temperature coefficient measurement of a PV module by accounting for the transient temperature difference between cell and backsheet. Solar Energy. – Vol. 237, pp. 203-212, 2022, https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.049.

[8]. B. M. Ziapour, V. Palideh, F. Mokhtari. «Performance improvement of the finned passive PVT system using reflectors like removable insulation covers», Applied Thermal Engineering. – Vol. 94, pp. 341–349, 2016, doi:10.1016/j.applthermaleng. 2015.10.143.

[9]. E. Roslan, I. Hassim. «Solar PV system with pulsating heat pipe cooling», Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – Vol. 14, pp. 311-318, 2019, doi: 10.11591/ijeecs.v14.i1. pp. 311-318.

[10]. S. A. Zubeer, O. M. Ali. «Performance analysis and electrical production of photovoltaic modules using active cooling system and reflectors», Ain Shams Engineering Journal, – Vol. 12, № 2, pp. 2009-2016, 2021, doi: 10.1016/j.asej.2020.09.022.

[11]. J. Kaiprath, V. V. Kishor Kumar. 2023. A review on solar photovoltaic-powered thermoelectric coolers, performance enhancements, and recent advances. Int. Jour. of Air. Cond. and Ref. – Vol. 31. № 6. pp. 1-30. http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.01.026.

[12]. T. Liao, Q. He, Q. Xu, Y. Dai, C. Cheng, M. Ni. 2021. Coupling properties and parametric optimization of a photovoltaic panel driven thermoelectric refrigerators system. Energy. –Vol. 220, pp. 1-8. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119798.

[13]. Avezov R. R., Akhatov J. S., and Avezova N. R. «A review on photovoltaic-thermal (PV-T) air and water collectors». Appl. Sol. Energy, 2011, vol. 47, № 3, pp. 169-183.

[14]. M. A. Rosli, Suhaimi Misha, Kamaruzzaman Sopian, Sohif Mat, Mohd Yusof Sulaiman, and Elias Salleh. «Thermal Efficiency of the Photovoltaic Thermal System with Serpentine Tube Collector». Applied Mechanics & Materials 699 (2014), pp. 455-461.

[15]. Muminov R. A., Tursunov M. N., Sabirov X., Abdiev U., Yuldoshov B. A., Abilfayziev Sh. N. «Study of methods for protecting the surface of photovoltaic batteries from pollution». Asian journal of research, 2020, № 1-3, pp. 331-335.

[16]. R. A. Muminov, M. N. Tursunov, Kh. Sabirov, Sh. N. Abilfayziyev, B. A. Yuldoshov and S. F. Toshpulatov. Testing of crystalline silicon-based photoelectric and photothermal batteries in real climate conditions and comparison of parameter changes. Journal of Physics: Conference Series 2388 (2022) 012128. doi: 10.1088/1742-6596/2388/1/012128

[17]. Tursunov M. N., Sabirov Kh., Abilfayziyev Sh. N., Yuldoshov B. A. «Testing of different material type photoelectric battery and photothermal batteries composed» / Eurasian Physical Technical Journal // 2022, № 4 (42), pp.44-50.

[18]. Abilfayziyev Sh. N. «Electrical efficiency analysis of different types of photoelectric batteries through cooling». Scientific research of the SCO countries: synergy and integration. Beijing, China 2024, 136-142 pp.

[19]. Yuldoshev I. A., Shoguchkarov S. K., Kudratov A. R., and Jamolov T. R. «A Study of the Parameters of a Combined Photo-Thermoelectric Installation under Field Conditions» // Applied Solar Energy, 2020, Vol. 56, No. 2, pp. 125-130.

[20]. M. Tursunov, H. Sabirov, T. Axtamov, M. Tursunov, M. Chariyev and H. Abdullayev. «Creation of All-Season Photothermal Installation of Increased Efficiency» // Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT. –Volume 11, Issue 2, pp. 125-129. (DOI: 10.25673/113002).

[21]. Charalambous P. G., Maidment G. G., Kalogirou S. A., Yiakoumetti, K. (2007). «Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review» / Applied thermal engineering // 27(2-3), 275-286.

[22]. Jian-Wei He, Jie-Hong Deng, Xiao-Yan Huang, Zheng-Yu Shu, Yang Cai, You Lv, Fu-Yun Zhao. «Comparative study on the performance of a solar photocatalytic Trombe wall with different types of collectors: Copper/Thermoelectric/PV plate» / Applied Thermal Engineering // Volume 239, 15 February 2024, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122131.

Транслитерация по BSI

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА

RENEWABLE ENERGY

ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА

WIND ENERGY

ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

ELECTRIC POWER GENERATORS FOR WIND ENERGY

Статья поступила в редакцию 02.02.24 Ред. Рег. № 304-002-24 The article has entered in publishing office 02.02.24 Ed. Reg. No. 304-002-24

УДК 621.313

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESEARCH ON COGGING TORQUE MINIMIZATION FOR PM SYNCHRONOUS MACHINE

Dmitriy M. Toporkov, Anna Yu. Arestova

Новосибирский государственный технический университет, 630073,
Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
Тел +7-913-752-41-69, +7-923-246-71-98

toporkov@corp.nstu.ru, arestova@corp.nstu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.043-054

Referred: 14.02.24 Received in revised form: 19.02.24 Accepted: 28.02.24

The paper presents the cogging torque minimization method based on numerical calculation. The considered method assumes that the amplitude of the permeance harmonic is a periodic function of the slot opening, and it will be equal to zero if the opening value is a multiple of or equal to the period of the permeance harmonic. The numerical methods are applied for accuracy enchantment under magnetic field calculation. The air gap permeance function is calculated considering the actual pattern of field distribution in the area of the gap and slot opening, the edge effects, and steel saturation. The two-dimensional finite element model corresponding to the cross-section of a cylindrical machine and the Maxwell stress tensor method is used for cogging torque calculation. The paper provides a quantitative comparison of the relative slot opening values under analytical and finite element method calculation. The developed permanent magnet machine prototype is presented. The harmonic composition of cogging torque is obtained for machine prototype, and the fundamental harmonic is determined. Thus, the fundamental harmonic of the cogging torque can be eliminated by means of optimal slot opening width. The experimental and analytical results confirmed the cogging torque could be reduced by 2-8 times.

Keywords: Auxiliary slots, claw-pole, cogging torque, magnetic flux density, numerical analysis, permanent magnet synchronous machines, torque ripple.

Топорков Д. М., Арестова А.Ю. Экспериментальные и теоретические исследования по минимизации зубчатого момента синхронной машины с постоянными магнитами // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 02 (419) 2024, с. 43-54

Topjrkov D. M., Arestova A.Yu. Experimental and Theoretical Research on Cogging Torque Minimization for PM Synchronous Machine // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 02(419) 2024, pp. 43-54

Топорков
Дмитрий Михайлович
Dmitriy M. Toporkov

Сведения об авторе: к.т.н., доцент, заведующий кафедрой Электромеханики факультета Мехатроники и автоматизации НГТУ.

Образование: НГТУ, 2012, магистр по специальности «Электротехника, электромеханика и электротехнологии».

Область научных интересов: проектирование и расчет электрических машин, теоретическое и экспериментальное исследование режимов их работы.

Публикации: 69.

Индекс Хирша: 4.

Information about the author: PhD, Associate Professor, Head of the Electromechanics Department, Faculty of Mechatronics and Automation, NSTU.

Education: NSTU, 2012, Master's degree in Electrical Engineering, Electromechanics and Electrical Technology.

Research interests: design and calculation of electrical machines, theoretical and experimental study of their operation modes.

Publications: 69.

Hirsch Index: 4.

Арестова
Анна Юрьевна
Anna Yu. Arestova

Сведения об авторе: старший преподаватель кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем факультета Энергетики НГТУ.

Образование: НГТУ, 2009, инженер по специальности «Электроэнергетические системы и сети».

Область научных интересов: противоаварийная автоматика, анализ динамической устойчивости.

Публикации: 83.

Индекс Хирша: 6.

Information about the author: Senior lecturer of Automated power systems Department, NSTU.

Education: NSTU, 2009, M.Sc. in Power Engineering at Novosibirsk State Technical University.

Research interests: emergency control, dynamic stability analysis..

Publications: 83.

H-index: 6.

Introduction

Electrical machines, in general, can be classified as alternating current synchronous/asynchronous machines and direct current machines [1]. In recent years, the permanent magnet synchronous machine (PMSM) has become a competitor for induction motors [2-4]. A PMSM consists of three-phase windings in the stator and permanent magnets in the rotor [5-6]. This feature simplifies the machine design by removal of dc supply for field excitation. A PMSM drive gives a wide range of motion control applications and could be used in robotics, machine tools, actuators, and vehicular propulsion [7-10]. PM synchronous motors are widely used in industrial applications for high efficiency and high output density [11-14].

Issues related to the conversion of energy from renewable sources are becoming more and more relevant from year to year [15-17]. At the same time, much attention is paid to the reliability and efficiency of energy conversion systems of such sources as wind, waves, tides [18-20]. One of the main elements of such systems is a direct drive permanent magnet synchronous generator. The use of permanent magnets significantly increases the efficiency of the generator and the entire system, and the use of fractional slot windings makes it possible to abandon the mechanical transmission and thereby increase reliability [21-23]. The use of various designs of electric generators with permanent magnets is described in modern literature [24-26]. The object of study in this paper is a synchronous wind generator with permanent magnets and fractional slot windings.

Large penetration of PMSM is operationally and safety critical. The reliable monitoring and timely diagnosis of PMSM faults have become an important requirement for its effective utilization. The authors of [27] give the list of contributing factors to the deterioration of the electrical machine condition as well as classification of causing factors. Thus, there are five factors causing machine failure:

1. Environmental: temperature, moisture, rust, ventilation
2. Operations: vibration, overload, excessive starts, alignment
3. Equipment: aging, quality, design defects, manufacturing defects
4. Human: bad selection of electric motor, bad use, lack of maintenance, improper maintenance
5. Electrical Power: short circuit, fluctuations, resonance, transfers, reconnections, etc.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

In terms of the current research, the operational problems are of interest [28-30]. The cogging torque as well as rotor's static and dynamic eccentricity could be followed by electromagnetic noise and vibration, damage to the core due to friction with the stator, destruction of insulation, wedges overheating, bearing failure, shaft currents, and production of sparks by discharges. Bearings, stator, and rotor in total contribute up to 70 % of the machine failure [31-33]. High vibration is the top second reason for failures according to the severity level after normal deterioration from age and reaches 15,5 % [34-36]. Detection of static eccentricity in PMSM is important because static eccentricity growth increases the unbalanced magnetic pull and vibrations on the rotor.

The currently applied techniques by research groups for static and dynamic eccentricity identification and analysis are listed below:

- Fast Fourier Transform (FFT) [37];
- Short Time Fast Fourier Transform (STFT) [38];
- Park's Vector Square Modulus (PVSM) and Park-Hilbert (P-H) [39];
- Statistical analysis based on an additive model [40];
- Wavelet Packet Decomposition (WPD) [41];
- MCSA (FFT) [42];
- Higher-Order Spectra (HOS) [43];
- Zero sequence voltage [44].

Many studies are devoted to PMSM cogging torque minimization. A few of them are listed below.

The authors of [45] propose a claw-pole motor design with auxiliary slots and stator claw skewing. The findings show that the fundamental frequency of the cogging torque can be doubled, and its peak-to-peak values can be reduced successfully by 70 % in both the simulations and experiments.

The authors of [46] investigate the cogging torque caused by manufacturing tolerances through analytical, finite element analysis, and experimental methods. The rotation lamination is proposed for improving stator and rotor stacks. As a result, the cogging torque of the motor is reduced by about 75 %.

The analytical technique combined with a modified particle swarm optimization algorithm considering the effect of winding slotting and tooth-tips is presented in [47]. Authors prove the technique effectiveness for obtaining design parameters with a low level of cogging torque.

The current paper presents theoretical and experimental results of cogging torque minimization method based on numerical calculation of the field and elimination cogging torque fundamental harmonic. The paper is arranged as follows: sections 2, 3 – theoretical and numerical results, section 4 – experimental results.

List of abbreviations

b_{s0}	Slot opening width
b_{s1}	Stator slot top width
b_{s2}	Stator slot bottom width
B_y	Magnetic flux density
D_a	Stator outer diameter
D_s	Stator bore diameter
EMF	Electromotive force
FEMM	Finite element method
F_{mi}	Amplitudes of the ith MMF harmonics
F_{mk}	Amplitudes of the kth MMF harmonics
h_m	Magnet thickness
k^{th}, i^{th}	Harmonic order
l_δ	Effective length of machine
MMF	Magnetomotive force
n_{atp}	Harmonic sequential number of additional torque due to static eccentricity
n_{ats}	Harmonic sequential number of additional torque due to dynamic eccentricity
n_{cg}	Fundamental harmonic of the cogging torque
N_s	Stator slot number
p	Number of pole pairs
PM	Permanent magnet
P_{max}	Maximum value of the gap permeance

P_{min}	Minimum value of the gap permeance
PMSM	Permanent magnet synchronous machine
$P_{m\nu}$	Amplitude of the νth air gap magnetic permeance harmonic
q	Number of slot per pole per phase
R_δ	Mean air gap radius
T_ν	Period of the νth harmonic
x	Angular coordinate
y_s	Slot pitch
γ_m	Magnet width
δ	Air gap length
δ'	Fictitious air gap
θ	Rotation angle of rotor
θ_{cg}	Rotation angle of the rotor for the fundamental harmonic of the cogging torque
μ_{st}	Magnetic permeability of steel
π	Mathematical constant
τ_{cg}	Cogging torque
$\tau_{max.abs}$	Absolute maximum of the cogging torque amplitude
$\tau_{max.loc}$	Local maximum of the cogging torque amplitude

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

1. Cogging Torque

The paper [48] shows that cogging torque arises from the interaction between certain harmonics of the permanent magnet magnetomotive force (MMF) and certain harmonics of the specific magnetic permeance of the air gap:

$$\tau_{cg}(\theta)=\frac{\pi l_\delta R_\delta p}{2}\left[\sum_{\nu=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty}kF_{mk}^2P_{m\nu}\sin\nu N_s\theta\right.$$
$$\left.+2\sum_{\nu=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{\substack{i=1\\ i\neq k}}^{\infty}kF_{mk}F_{mi}P_{m\nu}\sin\nu N_s\theta\right] \quad (1)$$

where l_δ is the effective length of machine, R_δ is the mean air gap radius, p is the number of pole pairs, N_s is the stator slot number, F_{mk} and F_{mi} are the amplitudes of the kth and i^{th} MMF harmonics respectively, $P_{m\nu}$ is the amplitude of the νth air gap magnetic permeance harmonic, θ is the rotation angle of rotor.

The paper also shows that the expressions being added in the square brackets are not equal to zero under the following conditions:

$$\frac{k}{\nu}=\frac{N_s}{2p},\quad \frac{(k\pm i)}{\nu}=\frac{N_s}{p} \quad (2)$$

where the first condition applies to the first expression, and the second one applies to the second condition.

One can see that, in order to reduce the cogging torque, the curves of magnet MMF and magnetic permeance of the air gap must be formed in such a way that the amplitudes of their harmonics, which participate in the creation of cogging torque, tend to zero.

The harmonic composition of the air gap magnetic permeance is determined by the geometry of the gap itself, which is formed by the stator and rotor surfaces. In the design process, the choice of a particular rotor design depends on many factors related to the requirements of the machine. These include rotor speed, machine size, developed electromagnetic torque, shape of the electromotive force (EMF) curve, etc. In general, the combination of all the factors leads to the choice of a particular rotor design. Therefore, the formation of the magnet MMF curve which is optimal in terms of the cogging torque may contradict other requirements specified in the scope of work. In this case, it remains to form the magnetic conductivity curve of the air gap due to the inner surface of the stator. In this case, the only remaining option is to shape the air gap magnetic permeance curve by using the inner surface of the stator. Under these conditions, the main parameter that can be varied without a significant change in electromagnetic torque is the value of stator slot opening.

The curve of magnetic permeance of the air gap will look like in Fig.1, if the following assumptions are made:

1) there is no saturation of the parts of machine magnetic circuit;

2) the magnetic permeability of steel is equal to infinity $\mu_{st}=\infty$;

3) the stator surface has a slotted structure; the rotor surface is smooth;

4) the magnetic field lines in the air gap are directed along the normal to the surface of the rotor.

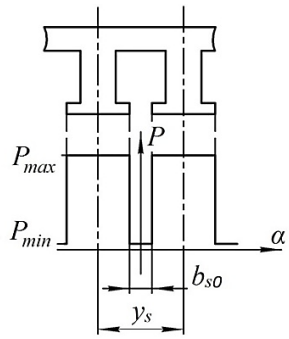


Fig. 1. Magnetic permeance of the air gap

Рис. 1. Магнитная проводимость воздушного зазора

For ease of analysis, let us expand the function shown in Fig. 1 in a Fourier series:

$$P_\nu(\alpha,b_{s0})=P_{m\nu}(b_{s0})\cos\left(\frac{2\pi\alpha}{T_\nu}\right) \quad (3)$$

where $P_{m\nu}$ is the amplitude of the νth permeance harmonic, which depends on the value of slot opening:

$$P_{m\nu}(b_{s0})=\frac{2}{\pi\nu}\left(P_{min}-P_{max}\right)\sin\left(\frac{\pi b_{s0}}{T_\nu}\right) \quad (4)$$

where $T_\nu=y_s/\nu$ is the period of the νth harmonic, y_s is the slot pitch.

It can be seen from expression (4) that the amplitude of the permeance harmonic is a periodic function of the slot opening, and it will be equal to zero if the opening value is a multiple of or equal to the period of the permeance harmonic. If the value of the slot opening is a multiple of *(1/2, 3/2, 5/2,...)*$T_{P\nu}$, then the amplitude of the harmonic reaches its maximum.

It should be noted that the assumptions made are rough. In order to obtain the dependence of the air gap permeance on the angular coordinate, taking into account the real pattern of field distribution in the area of the gap and slot opening, considering the edge effects and steel saturation, the magnetic field must be calculated with a sufficiently high accuracy. This can be done by numerical methods.

It can be assumed that the steel permeance is equal to

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

infinity and the difference in magnetic potential between the surfaces of the rotor and stator is constant and equal to one, it can be argued that:

$$B_y(x) = P(x) = \frac{\mu_0}{\delta'(x)} \tag{5}$$

where $\delta'(x)$ is the fictitious air gap.

In this case, the specific magnetic permeance curve will follow the shape of the field. With a reasonable accuracy the resulting curve can be described by a mathematical expression:

$$P(x) = \begin{cases} P_{min} + \dfrac{\delta(P_{max} - P_{min})}{\sqrt{\delta^2 + (0{,}5b_{s0} - x)^2}}, x \in \left[0; \dfrac{b_{s0}}{2}\right] \\ P_\delta + \dfrac{\delta(P_{min} - P_\delta)}{\sqrt{\delta^2 + (x - 0{,}5b_{s0})^2}}, x \in \left[\dfrac{b_{s0}}{2}; \dfrac{y_s}{2}\right] \end{cases} \tag{6}$$

where P_{max} is the maximum value of the gap permeance under the border of the tooth crown and the slot opening, P_δ is the constant value to which the function tends at $x = 0{,}5b_{s0}$. P_{min} is the constant value to which the function tends at $x = 0$.

In Fig. 2, the dashed line represents the curve of the magnetic flux density distribution in the air gap at half of the slot pitch, obtained by the finite element method (FEMM) in a smooth rotor machine. The solid line represents the permeance function calculated from (6).

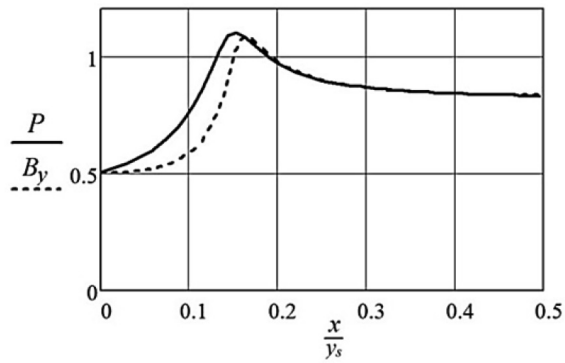


Fig. 2. Air gap permeance function and magnetic flux density distribution in the air gap according to the numerical model
Рис. 2. Функция проводимости воздушного зазора и распределение индукции в воздушном зазоре в соответствии с численной моделью

The Fourier series coefficient of function (6) is equal to:

$$P_{m\nu}(b_{s0}) = \frac{4}{t_1}\left[\int_0^{0{,}5b_{s0}} \left(P_{min} + \frac{\delta(P_{max} - P_{min})}{\sqrt{\delta^2 + (0{,}5b_{s0} - x)^2}} \cos\left(\frac{2\pi\nu x}{y_s}\right)\right) dx + \int_{0{,}5b_{s0}}^{0{,}5y_s} \left(P_\delta + \frac{\delta(P_{max} - P_\delta)}{\sqrt{\delta^2 + (x - 0{,}5b_{s0})^2}} \cos\left(\frac{2\pi\nu x}{y_s}\right)\right) dx\right] \tag{7}$$

The obtained expressions cannot be integrated analytically, therefore the dependence $P_{m\nu}(b_{s0})$ can be obtained only by means of numerical integration.

2. Numerical Simulation

For more accurate calculation of cogging torque, it is reasonable to use a two-dimensional finite element model corresponding to the cross section of a cylindrical machine (Fig. 3). The model under study has a winding with $q = 3/8$, 18 slots and 8 pole pairs. The model consists of the stator *1* with the slots *2*, magnetic yoke *3* of the rotor with the radially magnetized magnets *4*, separated from the stator by the air gap *5*. The slot opening width b_{s0} is a variable value.

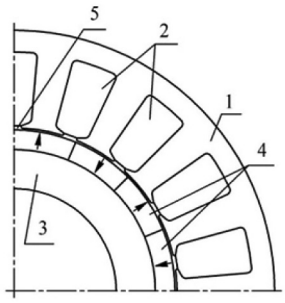


Fig. 3. Model for cogging torque calculation (1 – stator, 2 – slots, 3 – magnetic yoke, 4 – radially magnetized magnets, 5 – air gap)
Рис. 3. Модель для расчета зубцовых пульсаций момента (1 – статор, 2 – пазы, 3 – магнитное ярмо, 4 – радиально намагниченные магниты, 5 – воздушный зазор)

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

The torque calculation is carried out by the Maxwell stress tensor method at different positions of the rotor relative to the stator, and at different values of the slot opening. The rotation angle of the rotor varies from zero to the value θ_{cg}, equal to the period of the fundamental harmonic of the cogging torque:

$$\theta_{cg} = \frac{360^\circ}{N_s p} = \frac{360^\circ}{18 \cdot 8} = 2{,}5^\circ$$

The slot opening width varies from zero, which corresponds to a closed slot, to a value equal to the slot width b_s, which corresponds to a fully open slot. As a result of the calculation, a family of dependences of the cogging torque on the rotor angular position at different values of the slot opening was obtained. Some of them are shown in Fig. 4.

The shape of the curves in Figure 4 shows that many of them have a second harmonic component. Therefore, in order to determine the amplitude of the fundamental harmonic of the cogging torque more accurately, the obtained dependences were expanded in a Fourier series. Thus, a certain value of fundamental harmonic amplitude of the cogging torque corresponds to each value of the slot opening.

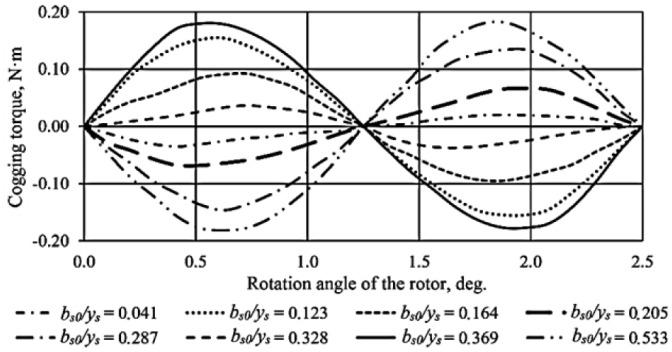


Fig. 4. Family of dependences of the cogging torque on the rotation angle of the rotor at different values of the slot opening
Рис. 4. Семейство зависимостей зубцовых пульсаций момента от угла поворота ротора при различных величинах открытия паза

The final result is shown in Fig. 5 as the dependence of the fundamental harmonic amplitude of cogging torque on the relative width of the slot opening. The same figure shows the dependence calculated by using expressions (7).

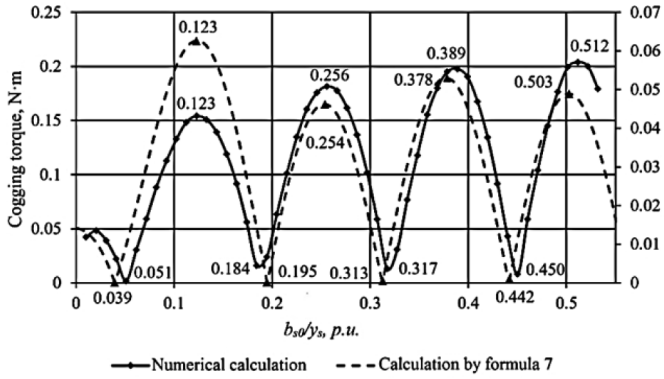


Fig. 5. Dependence of the fundamental harmonic amplitude of the cogging torque on the relative slot opening
Рис. 5. Зависимость амплитуды основной гармоники зубцовых пульсаций момента от относительного открытия паза

The dependence values calculated by numerical simulation were plotted on the axis of ordinates to the left of the graph area, and the dependence values calculated by expressions (7) were plotted on the axis of ordinates to the right. The values of the relative slot opening, corresponding to the maxima and minima of the presented functions, were marked in the figure with the markers with captions. Fig. 5 shows that the local maxima and minima of the cogging torque, calculated numerically and using expressions (7), correspond to almost the same slot opening. The numerical calculation result has an offset comparing to calculation by expressions (7) because of

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

airgap magnetic permeance distribution (6) is shifted relative to airgap flux density distribution as it can be seen in Fig. 3.

The periodicity of the dependencies in Fig. 5 is determined by the period of the air gap magnetic permeance harmonic, participating in the creation of the cogging torque. For the machine under study, it is equal to:

$$T_{P8} = \frac{y_s}{\nu} = \frac{0{,}0122}{8} = 1{,}525 \cdot 10^{-3}\ mm,$$

$$\frac{T_{P8}}{y_s} = \frac{1{,}525 \cdot 10^{-3}}{12{,}2 \cdot 10^{-3}} = 0{,}125\ p.u.$$

Table I provides a comparison of the relative slot opening, at which the dependences calculated analytically and by the finite element method have extrema. It can be seen that the maxima and minima of the compared functions correspond to the slot opening, which differ from each other by no more than 1,2 % of the slot pitch value.

Table 1

Values of the Relative Slot Opening Corresponding to the Extrema of the Fundamental Harmonic Amplitude

Таблица 1

Значения относительного открытия паза, соответствующие экстремумам амплитуды основной гармоники зубцовых пульсаций момента

	jT_{P8}	0,125	0,25	0,375	0,5
Max	FEMM	0,123	0,254	0,389	0,512
	Eq. 7	0,123	0,256	0,378	0,503
	$(j/2)T_{P8}$	0,0625	0,1875	0,3125	0,4375
Min	FEMM	0,051	0,184	0,317	0,45
	Eq.7	0,039	0,195	0,313	0,442

Based on the results of calculation according to equation 7 and the slot opening width corresponding to the relative opening $b_{s0}/\gamma_s = 0{,}195$, then the amplitude of the fundamental harmonic of the cogging torque will be equal to $\tau_{cg} = 0{,}0241$ N•m according to the result of numerical simulation. This corresponds to 13,3 % of the value of the nearest maximum of the cogging torque amplitude (at $b_{s0}/\gamma_s = 0{,}256$) or 11,8 % of the value of the absolute maximum of the cogging torque amplitude (at $b_{s0}/\gamma_s = 0{,}512$) over the entire range of relative slot opening studied. A similar comparison was made for all points of the extremum of the dependence obtained from numerical calculation and (7). It is presented in Table II.

Table 2

Comparison of Analytical and Numerical Torque Calculation Results

Таблица 2

Сравнение результатов аналитического и численного расчета момента

b_{s0}/y_s, p.u.	$\tau_{cg}(b_{s0}/y_s)$, N·m	$\tau_{max.loc}$, N·m	$\tau_{max.abs}$, N·m	$[\tau_{cg}(b_{s0}/y_s)/\tau_{max.loc}]$, %	$[\tau_{cg}(b_{s0}/y_s)/\tau_{max.abs}]$, %
0,039	0,0222	0,154	0,204	14,4	10,9
0,123	0,154	0,154		100	75,5
0,195	0,0241	0,181		13,3	11,8
0,254	0,18	0,181		99,4	88,2
0,313	0,0304	0,197		15,4	14,9
0,378	0,195	0,197		99	95,6
0,442	0,0405	0,204		19,8	19,8
0,503	0,199	0,204		97,5	97,5

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

3. Experimental Results

The electric machine prototype described in Table III and shown in Fig. 6 was developed based on the results of the analytical and numerical studies given above. The prototype has the slot pitch of:

$$y_s = \frac{\pi D}{N_s} = \frac{\pi \cdot 91}{18} = 15{,}9\,mm,$$

and the ratio:

$$\frac{b_{s0}}{y_s} = \frac{3}{15.9} = 0{,}189$$

is close to the value that should provide the minimum level of ripple (Fig. 5).

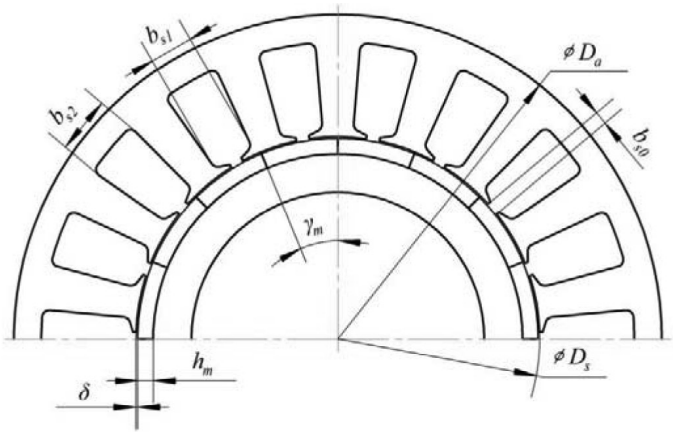


Fig. 6. Cross-sectional configuration of the motor used in the experiment
Рис. 6. Конфигурация поперечного сечения двигателя, использованного в эксперименте

Table 3

Таблица 3

Parameters and Dimensions of the Prototype

Параметры и габариты прототипа

Parameter	Symbols in Fig. 6	Value
Rated torque, N·m		28
Stator slot number		18
Rotor pole number		16
Active length of machine, mm		22
Stator outer diameter, mm	D_a	146
Stator bore diameter, mm	D_s	91
Stator slot top width, mm	b_{s1}	9,8
Stator slot bottom width, mm	b_{s2}	12,8
Slot opening width, mm	b_{s0}	3
Air gap length, mm	δ	0,4
Magnet thickness, mm	h_m	3,5
Magnet width, el. deg.	γ_m	180

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

The study of the prototype cogging torque was carried out as shown in Fig. 7. The angular position of the rotor relative to the stator with opened armature terminals was set with the help of an optical dividing head, which allows fixing the position with an accuracy of one second. The shaft of the machine under study was connected to the shaft of the optical dividing head through flexible couplings and a Magtrol TM 304/011 torque sensor. The torque sensor readings were recorded at full rotor revolution in increments of 1 mechanical degree.

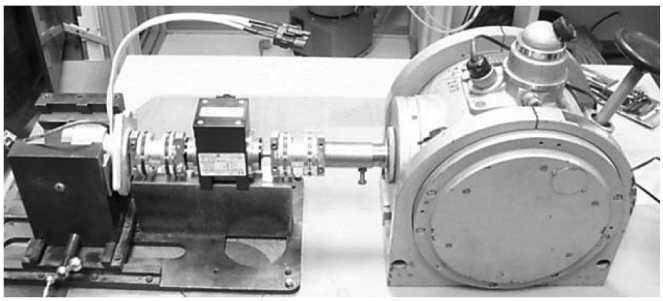


Fig. 7. Test bench for measuring cogging torque
Рис. 7. Испытательный стенд для измерения зубцовых пульсаций момента

Fig. 8 shows the results of the experiment. The obtained dependence was expanded in a Fourier series, and its spectrum is shown in Fig. 9.

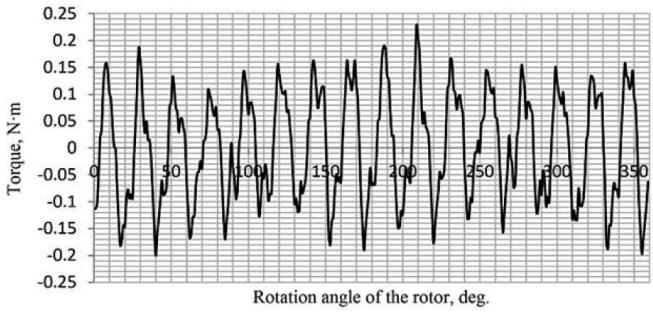


Fig. 8. Dependence of torque on the rotation angle of the rotor
Рис. 8. Зависимость крутящего момента от угла поворота ротора

Fig. 9 clearly shows that the torque has harmonics with sequential numbers 16, 18, 32, 36, 48, 54, 64, 72, 80, 90, 96, ..., 144. Harmonic with sequential number 144 is the fundamental harmonic of the cogging torque and it is determined by the product of the slot number and the number of pole pairs:

$$n_{cg} = N_s \cdot p = 18 \cdot 8 = 144$$

All other harmonics presented are multiples of either 16 (the number of rotor poles) or 18 (the number of stator slots).

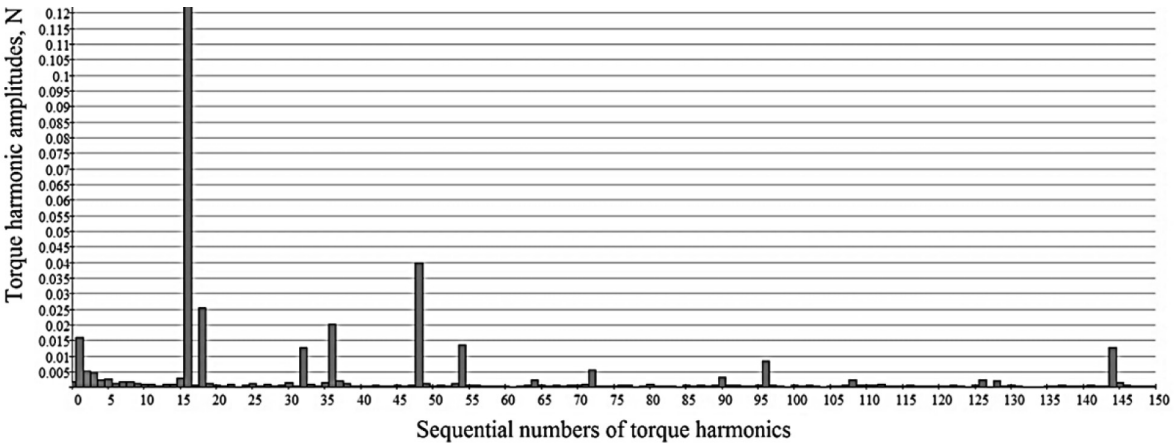


Fig. 9. Harmonic composition of cogging torque
Рис. 9. Гармонический состав зубцовых пульсаций момента

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Harmonics with the sequential numbers that are multiples of 16 are due to static eccentricity, and harmonics with the numbers that are multiples of 18 are due to dynamic eccentricity. Indeed, the numbers of the harmonics of the additional torque due to static eccentricity:

$$n_{atp} = j \cdot p = 16, 32, 48, ...$$

and harmonic numbers of additional torque due to dynamic eccentricity:

$$n_{ats.} = j \cdot N_s = 18, 36, 54, ...$$

Harmonic with sequential number 1 is caused by misalignment between the optical dividing head shaft and the motor shaft.

As can be seen from Fig. 9, the 144th harmonic, which elimination is the aim of this study, has an amplitude of about 0,013 N·m, which is 0,05 % of the rated torque of the machine. At the same time, the harmonics due to static and dynamic eccentricity of the rotor have much greater amplitudes.

Thus, by choosing the optimal slot opening width, the fundamental harmonic of the cogging torque can be virtually eliminated. However, the experiment has also showed that particular attention should be paid to the level of eccentricity in the machine, since it leads to the appearance of the cogging torque harmonics of a smaller order with greater amplitude.

Conclusion

Analytical studies of the dependence of the cogging torque on the slot opening width have shown that this dependence has a periodic nature, and its period is determined by the period of the permeance harmonic, which is involved in the creation of the cogging torque. The calculation based on the permeance curve distribution along the air gap obtained by numerical calculation of the field taking into account saturation and edge effects in the slot opening area confirmed the conclusion about the periodicity of the dependence under study. A comparison between the results of this calculation and the results of the calculation based on the numerical determination of torque by the Maxwell stress tensor method showed that the choice of the optimal slot opening width, determined by the proposed method, allows to reduce the cogging torque by 2-8 times. For a more accurate determination of the optimal slot opening, it is necessary to calculate torque using the stress tensor method based on the numerical calculation of the field. This will make it possible to almost completely eliminate the fundamental harmonic of the cogging torque, and its value in this case will depend on the adequacy of the computational model and on the dimensions of the mesh elements.

Referens

[1]. E. Agamloh, A. Von Jouanne and A. Yokochi. «An overview of electric machine trends in modern electric vehicles» Machines, vol. 8(2), pp. 1-20, April 2020.

[2]. T. He, Z. Zhu, F. Eastham, Y. Wang, H. Bin, D. Wu, and J. Chen, «Permanent magnet machines for high-speed applications» World Electric Vehicle Journal, vol. 13(1), pp. 1-18, Jan. 2022.

[3]. X. C. Le, M. Q. Duong, and K. H. Le. «Review of the modern maximum power tracking algorithms for permanent magnet synchronous generator of wind power conversion systems». Energies, vol. 16(1), pp.1-25, Dec. 2022.

[4]. T. Y. Heng, T. J. Ding, C. C. W. Chang, T. J. Ping, H. C. Yian, and M. Dahari, «Permanent Magnet Synchronous Generator design optimization for wind energy conversion system: A review». Energy Reports, vol. 8, pp. 277-282, Dec. 2022.

[5]. J. Zhao, X. Liu, S. Wang, and L. Zheng, «Review of Design and Control Optimization of Axial Flux PMSM in Renewable-energy Applications». Chinese Journal of Mechanical Engineering, vol. 36(1), pp. 1-21, 2023.

[6]. S. Singh, S. N. Singh, and A. N. Tiwari, «PMSM drives and its application: An overview». Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering, vol. 16(1), pp. 4-16, 2023.

[7]. I. Boldea, L. N. Tutelea, N. Muntean, A. Popa, and F. Blaabjerg. «Robotics Electric Actuators: Recent Progress in High Torque Density Designs and Their Advanced Motion Control–A Review». Proceedings of the Romanian Academy Series A-Mathematics Physics Technical Sciences Information Science, vol. 21(4), pp. 337-355, 2020.

[8]. K. Ullah, J. Guzinski, and A. F. Mirza, «Critical review on robust speed control techniques for permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed regulation». Energies, vol. 15(3), pp. 1-13, Feb. 2022.

[9]. Q. Hou, S. Ding, and X. Yu, «Composite super-twisting sliding mode control design for PMSM speed regulation problem based on a novel disturbance observer» IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 36(4), pp. 2591-2599, 2020.

[10]. Z. Li, J. An, Q. Zhang, H. Liu and H. Sun, «Design of PMSLM position controller based on model predictive control algorithm». IEEE Access, vol. 9, pp. 78835-78846, 2021.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

[11]. Y. Lu, Z. Jiang, C. Chen, and Y. Zhuang. «Energy efficiency optimization of field-oriented control for PMSM in all electric system» Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 48, pp. 1-8, 2021.

[12]. K. Dambrauskas, J. Vanagas, T. Zimnickas, A. Kalvaitis, and M. Ažubalis. «A method for efficiency determination of permanent magnet synchronous motor» Energies, vol. 13(4), pp. 1-15, 2020.

[13]. C. Candelo-Zuluaga, J. R. Riba, and A. Garcia. «PMSM torque-speed-efficiency map evaluation from parameter estimation based on the stand still test» Energies, vol. 14(20), pp. 1-15, 2021.

[14]. Y. Yang, Q. He, C. Fu, S. Liao, and P. Tan. «Efficiency improvement of permanent magnet synchronous motor for electric vehicles». Energy, vol. 213, pp. 1-11, 2020.

[15]. P. J. Megia, A. J. Vizcaíno, J. A. Calles, and A. Carrero. «Hydrogen production technologies: from fossil fuels toward renewable sources. A mini review». Energy & Fuels, vol. 35(20), pp. 16403-16415, 2021.

[16]. A. T. Hoang, and X. P. Nguyen. «Integrating renewable sources into energy system for smart city as a sagacious strategy towards clean and sustainable process». Journal of Cleaner Production, vol. 305, pp. 1-33, 2021.

[17]. F. Chien, H. W. Kamran, G. Albashar, and W. Iqbal. «Dynamic planning, conversion, and management strategy of different renewable energy sources: a sustainable solution for severe energy crises in emerging economies». International Journal of Hydrogen Energy, vol. 46(11), pp. 7745-7758, 2021.

[18]. S. Kumar, R. K. Saket, D. K. Dheer, J. B. Holm-Nielsen, and P. Sanjeevikumar. «Reliability enhancement of electrical power system including impacts of renewable energy sources: a comprehensive review» IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 14(10), pp. 1799-1815, 2020.

[19]. D. Cevasco, S. Koukoura, and A. J. Kolios. «Reliability, availability, maintainability data review for the identification of trends in offshore wind energy applications». Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 136, pp. 1-21, 2021.

[20]. S. Peyghami, F. Blaabjerg, and P. Palensky. «Incorporating power electronic converters reliability into modern power system reliability analysis» IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 9(2), pp. 1668-1681, 2020.

[21]. P. M. Tlali, R. J. Wang, S. Gerber, C. D. Botha, and M. J. Kamper. «Design and performance comparison of vernier and conventional PM synchronous wind generators». IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56(3), pp. 2570-2579, 2020.

[22]. R. M. Pindoriya, R. K. Thakur, B. S. Rajpurohit, and R. Kumar. «Numerical and experimental analysis of torsional vibration and acoustic noise of PMSM coupled with DC generator». IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69(4), pp. 3345-3356, 2021.

[23]. S. German-Galkin, and M. Staude. «Energy properties of a hybrid DC generator with PMSM». In 2020 19th International Conference on Mechatronics-Mechatronika, pp. 1-7, Dec. 2020.

[24]. Y. Xu, M. Ai, and Z. Xu. «Influence of partial winding fault on electromagnetic performance of permanent magnet wind generator with double three-phase winding». Energy Reports, vol. 7, pp. 6462-6472, Nov. 2021.

[25]. H. Fang, Y. Wei, and Y. Feng. «Design of dual-rotor PMSG for wave energy conversion». Energy Reports, vol. 6, pp. 397-401, Dec. 2020.

[26]. V. Prakht, V. Dmitrievskii, V. Kazakbaev, and M. N. Ibrahim. «Comparison between rare-earth and ferrite permanent magnet flux-switching generators for gearless wind turbines». Energy Reports, vol. 6, pp. 1365-1369, Dec. 2020.

[27]. Y. Merizalde, L. Hernández-Callejo, and O. Duque-Perez. «State of the art and trends in the monitoring, detection and diagnosis of failures in electric induction motors». Energies, vol. 10(7), pp. 1056, July 2017.

[28]. F. Bu, Z. Yang, Y. Gao, Z. Pan, T. Pu, M. Degano, and C. Gerada. «Speed ripple reduction of direct-drive PMSM servo system at low-speed operation using virtual cogging torque control method». IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68(1), pp. 160-174, 2020.

[29]. X. Duan, X. Zhang, Y. Tang, and M. Hao. «Cogging torque reduction in pmsm in wide temperature range by response surface methodology». Symmetry, vol. 13(10), pp. 1-17, 2021.

[30]. D. M. Toporkov, and G. B. Vialcev. «Impact of equalizing currents on losses and torque ripples in electrical machines with fractional slot concentrated windings». In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 87(3), pp. 1-7, Oct. 2017

[31]. T. Orlowska-Kowalska, M. Wolkiewicz, P. Pietrzak, M. Skowron, P. Ewert, G. Tarchala, and C. T. Kowalski. «Fault diagnosis and fault-tolerant control of PMSM drives-state of the art and future challenges.». IEEE Access, vol. 10, pp. 59979-60024, 2022.

[32]. Z. Ullah, B. A. Lodhi, and J. Hur. «Detection and identification of demagnetization and bearing faults in PMSM using transfer learning-based VGG». Energies, vol. 13(15), pp. 1-17, 2020.

[33]. M. Skowron, T. Orlowska-Kowalska, and C. T. Kowalski. «Detection of permanent magnet damage of PMSM drive based on direct analysis of the stator phase currents using convolutional neural network». IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69(12), pp. 13665-13675, 2022.

[34]. X. Li, L. Zhang, H. Ying Ying, S. Huang, and Q. Zhang. «Study of suppression of vibration and noise of PMSM for electric vehicles». IET Electric Power Applications, vol. 14(7), pp. 1274-1282, 2020.

[35]. N. Remus, M. S. Toulabi, S. Mukundan,

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

H. Dhulipati, W. Li, C. Novak, and N. C. Kar. «Electromagnetic noise and vibration in pmsm and their sources: An overview». In 2020 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 1-4, Aug. 2020.

[36]. R. M. Pindoriya, R. K. Thakur, B. S. Rajpurohit, and R. Kumar. «Numerical and experimental analysis of torsional vibration and acoustic noise of PMSM coupled with DC generator». IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69(4), pp. 3345-3356, 2021.

[37]. H. K. Lee, T. K. Bang, J. H. Woo, H. S. Shin, and J. Y. Choi. «Electromagnetic characteristic analysis of permanent magnet synchronous machine considering current waveform according to static rotor eccentricity». Applied Sciences, vol. 10(23), pp. 8453, Nov. 2020.

[38]. Y. Chen, S. Liang, W. Li, H. Liang, and C. Wang. «Faults and diagnosis methods of permanent magnet synchronous motors: A review». Applied Sciences, vol. 9(10), pp. 2116, May 2019.

[39]. M. Sahraoui, A. Ghoggal, S. Guedidi, and S. E. Zouzou. «Detection of inter-turn short-circuit in induction motors using Park–Hilbert method». International Journal of System Assurance Engineering and Management, vol. 5(3), pp. 337-351, June 2014.

[40]. L. A. García-Escudero, O. Duque-Perez, M. Fernandez-Temprano, and D. Morinigo-Sotelo «Robust detection of incipient faults in VSI-fed induction motors using quality control charts». IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53(3), pp. 3076-3085, Oct. 2016.

[41]. Z. Liu, Q. Xia, L. Chen, H. Zhang, C. Wang, and X. Li. «Demagnetization fault diagnosis of PMSM based on fuzzy extreme learning machine». In 2020 Chinese Automation Congress (CAC), pp. 5690-5695, Nov. 2020.

[42]. G. A. Skarmoutsos, K. N. Gyftakis, and M. Mueller. «Analytical prediction of the MCSA signatures under dynamic eccentricity in pm machines with concentrated non-overlapping windings.». IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 37(2), pp. 1011-1019, Oct. 2021.

[43]. P. Ewert, and M. Jaworski. «Application of selected higher-order methods to detect rotor unbalance of drive system with PMSM». In 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), pp. 874-879, Apr. 2021.

[44]. J. De Bisschop, P. Sergeant, A. Hemeida, H. Vansompel, and L. Dupré. «Analytical model for combined study of magnet demagnetization and eccentricity defects in axial flux permanent magnet synchronous machines». IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53(9), pp.1-12, May 2017.

[45]. S. Leitner, H. Gruebler, and A. Muetze. «Cogging torque minimization and performance of the sub-fractional HP BLDC claw-pole motor». IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55(5), pp. 4653-4664, Oct. 2019.

[46]. J. Ou, Y. Liu, R. Qu, and M. Doppelbauer. «Experimental and theoretical research on cogging torque of PM synchronous motors considering manufacturing tolerances». IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65(5), pp. 3772-3783, Oct. 2017.

[47]. Z. Xue, H. Li, Y. Zhou, N. Ren, and W. Wen. «Analytical prediction and optimization of cogging torque in surface-mounted permanent magnet machines with modified particle swarm optimization». IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64(12), pp. 9795-9805, June 2017.

[48]. A. G. Pristup, D. M. Toporkov, and A. F. Shevchenko. «A study of cogging torque in permanent magnet synchronous machines with fractional slot windings». Russian Electrical Engineering, 85(12), pp. 743-747, Feb. 2014.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА
RENEWABLE ENERGY

ЭНЕРГИЯ БИОМАССЫ
ENERGY OF BIOMASS

ЭНЕРГИЯ БИОМАССЫ И ЭКОЛОГИЯ
ENERGY OF BIOMASS AND ECOLOGY

Статья поступила в редакцию 05.02.24 Ред. Рег. № 353-002-24
The article has entered in publishing office 05.02.24 Ed. Reg. No. 353-002-24

УДК 620.95

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СТРАТЕГИЙ РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНОЙ БИОЭНЕРГЕТИКИ КАК КЛЮЧЕВЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Вельможина К. А. [1]***, Политаева Н. А.*** [1]***, Ильин И. В.*** [1]***, Шинкевич П. С.*** [1]

[1]ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29
Автор-корреспондент – Вельможина Ксения Алексеевна, +7 (999) 476-70-30

e-mail: anizhomlev@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.055-078

Заключение совета рецензентов: 19.02.24 Заключение совета экспертов: 21.02.24 Принято к публикации: 26.02.24

Водородная биоэнергетика представляет собой перспективное направление в области устойчивого развития, которое имеет потенциал стать ключевым компонентом энергетической системы будущего. В данной статье проведен обзор современных стратегий развития водородной биоэнергетики, исследуя их влияние на достижение целей устойчивого развития. Анализируя последние научные исследования, были рассмотрены потенциальные преимущества и вызовы, связанные с развитием данной отрасли, а также выявлены возможные пути для оптимизации стратегий развития водородной биоэнергетики. Целью работы являлось представление всестороннего обзора актуальных тенденций и перспектив данной области, способствующих развитию эффективных решений для достижения устойчивого развития.

Ключевые слова: *энергетика, биоэнергетика, водород, устойчивое развитие, биоводород, биомасса, биотопливо.*

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Вельможина К. А., Политаева Н. А., Ильин И. В., Шинкевич П. С. Обзор современных стратегий развития водородной биоэнергетики как ключевых направлений для достижения целей устойчивого развития // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 02 (419) 2024, с.55-78

Velmozhina K. A., Politaeva N. A., Ilyin I. V., Shinkevich P. S. Review of modern strategies for the development of hydrogen bioenergy as key areas for achieving sustainable development goals // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 02 (419) 2024, pp. 55-78

A REVIEW OF MODERN STRATEGIES FOR THE DEVELOPMENT OF HYDROGEN BIOENERGY AS KEY DIRECTIONS FOR ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

Velmozhina K. A. [1], Politaeva N. A. [1], Ilin I. V. [1], Shinkevich P. S. [1]

[1]Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University»
195251, Russia, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya 29
Corresponding author – Velmozhina Ksenia Alekseevna, +7 (999) 476-70-30

e-mail: anizhomlev@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.055-078

Referred: 19.02.24 Received in revised form: 21.02.24 Accepted: 26.02.24

Hydrogen bioenergy represents a promising direction in the field of sustainable development, with the potential to become a key component of the future energy system. This article provides an overview of contemporary strategies for the development of hydrogen bioenergy, examining their impact on achieving sustainable development goals. By analyzing recent scientific research, potential advantages and challenges associated with the development of this industry were considered, and possible pathways for optimizing strategies for the development of hydrogen bioenergy were identified. The aim of the study was to present a comprehensive review of current trends and prospects in this area, contributing to the development of effective solutions for achieving sustainable development.

Keywords: *energy, bioenergy, hydrogen, sustainable development, biohydrogen, biomass, biofuels.*

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Вельможина К. А.

Velmozhina K. A.

Сведения об авторе:

Место работы: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», инженер в НИЛ «Промышленная экология».

Образование: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (2023)

Область научных интересов: получение биогаза, получение биоводорода, экология, биомасса, микроводоросли, биоэнергетика.

Публикации: 17 научных статей, 4 из которых в журналах, рецензируемых SCOPUS (Q1-Q2), 1 изобретение.

About the author:

Place of work: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University», engineer at the research Laboratory of «Industrial Ecology».

Education: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University» (2023).

Research interests: biogas production, biohydrogen production, ecology, biomass, microalgae, bioenergy.

Publications: 17 scientific articles, 4 of which in SCOPUS peer-reviewed journals (Q1-Q2), 1 invention.

Политаева Н. А.

Politaeva N. A.

Сведения об авторе:

Место работы: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства.

Образование: ГОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет» (1994).

Научное звание: профессор.

Ученая степень: доктор технических наук.

Область научных интересов:

инновационные сорбционные материалы для очистки сточных вод;

использование и переработка отходов по принципу циркулярной экономики;

получение биодизеля из биомассы;

интенсификация фиторемедиационных технологий для доочистки стоков.

Разработка технологических режимов выращивания микроорганизмов-продуцентов (культивирование микроводорослей) для получения биомассы, ее компонентов, продуктов метаболизма.

Создание эффективных композиций биопрепаратов и разработка способов их применения.

Сгущение биомассы, разделения клеточных суспензий, сушки, грануляции, экстракции, выделения, фракционирования, очистки, контроля и хранения конечных целевых продуктов.

Публикации: более 300 научных работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и входящие в базу данных SCOPUS (87 научных статей), автор 10 патентов, 8 монографий (3 монографии изданы за рубежом), автор 8 учебных пособий.

About the author:

Place of work: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University», professor at the Higher School of Hydraulic and Energy Construction.

Education: State Educational Institution of Higher Professional Education «Saratov State Technical University» (1994).

Scientific title: professor.

Academic degree: Doctor of Technical Sciences.

Research interests:

innovative sorption materials for wastewater treatment;

use and recycling of waste according to the principle of circular economy;

production of biodiesel from biomass;

intensification of phytoremediation technologies for wastewater treatment.

Development of technological modes of cultivation of producing microorganisms (cultivation of microalgae) to obtain biomass, its components, metabolic products.

Creation of effective compositions of biological products and development of methods of their application.

Thickening of biomass, separation of cell suspensions, drying, granulation, extraction, isolation, fractionation, purification, control and storage of final target products.

Publications: more than 300 scientific papers published in peer-reviewed scientific publications recommended by the Higher Attestation Commission and included in the SCOPUS database (87 scientific articles), author of 10 patents, 8 monographs (3 monographs published abroad), author of 8 textbooks.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Ильин И. В.

Ilin I. V.

Сведения об авторе:

Место работы: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», директор Высшей школы бизнес-инжиниринга.

Образование: ФГБОУ ВО «СПбГУ» (1984).

Научное звание: профессор.

Ученая степень: доктор экономических наук.

Область научных интересов:
архитектура предприятия;
цифровая трансформация бизнеса;
управление ИТ-проектами;
управление бизнес-процессами;
управление данными.
математическое и инструментальное моделирование в экономике.

Публикации: более 380 научных работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и входящие в базу данных SCOPUS (95 научных статей), 30 монографий и учебных пособий.

About the author:

Place of work: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University», Director of the Graduate School of Business Engineering.

Education: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint-Petersburg State University» (1984).

Scientific title: professor.

Academic degree: Doctor of Economics.

Research interests:
enterprise architecture;
digital business transformation;
OT project management;
business process management;
data management.
mathematical and instrumental modeling in economics.

Publications: more than 380 scientific papers published in peer-reviewed scientific publications recommended by the Higher Attestation Commission and included in the SCOPUS database (95 scientific articles), 30 monographs and textbooks.

Шинкевич П. С.

Shinkevich P. S.

Сведения об авторе:

Место работы: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», инженер в НИЛ «Промышленная экология».

Образование: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (2023).

Область научных интересов: исследование способов снижения карбонового следа с применением микроводорослей, получение биоводорода.

Публикации: 13 научных статей, 5 из которых в журналах, рецензируемых SCOPUS, 1 изобретение.

About the author:

Place of work: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University», engineer at the research Laboratory of «Industrial Ecology».

Education: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University» (2023).

Research interests: research on ways to reduce the carbon footprint using microalgae, production of biohydrogen.

Publications: 13 scientific articles, 5 of which in SCOPUS peer-reviewed journals, 1 invention.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Введение

В настоящее время развитие энергетики обусловлено некоторыми важными особенностями. Основной из них является изучение и постепенное внедрение альтернативной энергетики. Водородная биоэнергетика представляет собой перспективное направление в области устойчивого развития, которое имеет потенциал стать ключевым компонентом энергетической системы будущего.

Актуальность данной научной статьи обусловлена необходимостью исследования и обзора современных стратегий развития водородной биоэнергетики в контексте достижения целей устойчивого развития. В современном мире проблемы изменения климата, уменьшения запасов нефти и газа, а также необходимость снижения выбросов парниковых газов ставят перед обществом задачу поиска альтернативных источников энергии. Водородная биоэнергетика представляет собой перспективное и экологически чистое направление, которое может стать ключевым компонентом будущей энергетической системы.

Исследование современных стратегий развития водородной биоэнергетики имеет большое значение для научного сообщества, индустрии и принятия решений на уровне государственной политики. Анализ эффективности различных стратегий, выявление потенциальных преимуществ и вызовов, а также определение путей оптимизации развития данной отрасли позволят создать основу для разработки эффективных решений, способствующих устойчивому развитию и сокращению зависимости от традиционных источников энергии.

Таким образом, целью данной работы является обзор современных тенденций в области биоводородной энергетики.

Для достижения цели были выдвинуты следующие задачи:

1) Оценка нынешнего состояния водородной и биоводородной энергетики и ее роли в энергетическом кластере мировой экономики.

2) Анализ современных стратегий производства биоводорода.

3) Сравнение существующих технологий производства биоводорода из биомассы микроводорослей и выбор наиболее эффективной методики.

4) Оценка необходимости дальнейших исследований в области биоводородной энергетики и определение возможных направлений развития.

Список сокращений и символов	
H_2	Водород
ЗНБ	Зеленые несерные бактерии
ЗВ	Зеленые водоросли
pH	Водородный показатель
CO_2	Углекислый газ
H_2O	Вода
O_2	Кислород
H^+	Ион водорода

1. Методы и материалы

Согласно международному энергетическому прогнозу ожидается, что мировое потребление энергии возрастет на 50 % до 2050 года [1]. Эта потребность в энергии удовлетворяется главным образом за счет использования огромных объемов ископаемого топлива. В настоящее время ископаемое топливо обеспечивает 80 % мирового потребления энергии. Статистический обзор мировой энергетики (2020) сообщает, что на ископаемые виды топлива, включая сырую нефть, уголь и природный газ, приходится около трех четвертей общего потребления энергии во всем мире [2]. Способность ископаемых видов топлива выступать в качестве эффективных энергоносителей, их простота преобразования в различные виды энергии сделали их двигателем энергетического развития [3]. Однако, с другой стороны, сжигание ископаемых видов топлива несет за собой значительные нежелательные экологические и социальные эффекты, такие, как выбросы парниковых газов, способствующие глобальному потеплению и изменению климата [4-7], утрата биоразнообразия [8, 9], загрязнение земельных и водных ресурсов [10, 11], а также различные нежелательные последствия для здоровья [12-14].

Производство парниковых газов, которые вызывают глобальное потепление и изменение климата [15, 16], является одной из наиболее важных эко-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

логических проблем, связанных с использованием ископаемого топлива [17], требующих немедленного решения [18-20]. Согласно Парижскому соглашению, вступившему в силу 4 ноября 2016 г., необходимо ограничить повышение средней температуры в пределах ниже 2 °C по сравнению с доиндустриальным уровнем и продолжить деятельность в целях ограничения роста температуры до 1,5 °C [21, 22]. Достижение таких амбициозных климатических целей требует резкого сокращения выбросов парниковых газов до достижения чистого нулевого уровня выбросов [23], что, в свою очередь, требует быстрого сокращения добычи и использования ископаемого топлива [24]. Использование биотоплива вместо ископаемого топлива позволило бы решить множество экологических проблем. Согласно Gielen et al., переход к более энергоэффективным методам и использованию возобновляемых источников энергии потенциально может привести к сокращению антропогенных выбросов углекислого газа на 94 % к 2050 году [25]. С другой стороны, исследование Zheng et al., проведенное в 30 провинциях Китая, показывает, что увеличение отрасли возобновляемых источников энергии на 0,01 % могло бы сократить выбросы углекислого газа на 0,028-0,043 % [26]. Стоит отметить, что в 2020 году, несмотря на пандемию COVID-19, глобальная мощность возобновляемых источников энергии увеличилась на 45 % [27]. Это самый быстрый годовой темп роста с 1999 года [28]. Постепенная замена существующего ископаемого топлива чистым биотопливом является идеальной целью для перехода к циркулярной экономике, отвечающей целям устойчивого развития энергетики [29].

Согласно Дэвидсону, устойчивая энергетика – это энергетика, предоставляющая недорогие, доступные и надежные энергетические услуги, которые удовлетворяют экономические, социальные и экологические потребности в рамках общего контекста развития общества, для которого предназначены эти услуги, в условиях рационального распределения ресурсов для удовлетворения этих потребностей [30]. Одним из популярных экологических решений в рамках устойчивой энергетики является получение водорода. Водород (H_2) обладает наиболее высокой плотностью энергии (142 МДж/кг) [31-33] по сравнению с бензином (47 МДж/кг), метаном (56 МДж/кг) и природным газом (54 МДЖ/кг) [34], что позволяет сделать вывод о том, что это перспективный и эффективный энергоноситель [35]. Также он быстро производится и транспортируется [36-39]. Однако, использование водорода как основного энергетического ресурса на данный момент связано со следующими технологическими ограничениями:

1) Модернизация систем управлениями технологическими процессами [40].

2) Проблемы, связанные с хранением и транспортировкой водорода, обусловленные коррозией металла [41, 42].

3) Технико-экономические сложности коммерциализации водорода [43].

По мнению многих ученых, биологические методы получения биоводорода могут эффективно устранить эти ограничения [44].

2. Результаты

Биоводород, полученный из биомассы, часто называют зеленым водородом из-за его углеродной нейтральности. Биоводород может быть получен термохимическим [45-48] и биологическим способами [49-51]. Биотопливо и синтез-газ, обычно производимые из древесной щепы, сельскохозяйственных отходов и твердых бытовых отходов, являются основными видами биотоплива, получаемыми путем термохимической конверсии. Биотопливо, производимое из биомассы, потенциально может вытеснить до 27 % мирового транспортного топлива к 2050 году, что может привести к сокращению выбросов парниковых газов до 3,7 миллиарда метрических тонн в год [52].

Технологии термохимической конверсии включают обжиг, пиролиз, газификацию и гидротермальную обработку. Недавно было исследовано высушивание в качестве альтернативы предварительной обработке для синтеза биоводорода из кукурузной стружки. Торрефикация значительно увеличивала выход сахара и образование биоводорода по сравнению с необработанной кукурузной крупой [53]. Биоводород возможно получать и путем газификации. В отличие от сжигания, при котором биомасса сжигается для получения тепла и электроэнергии, газификация преобразует биомассу в газ, называемый синтез-газом, путем контролируемого окисления [54]. Процесс газификации включает нагрев биомассы до высоких температур (700-1000 °C) в присутствие ограниченного количества кислорода или пара, которое приводит к расщеплению биомассы на смесь газов, включая водород, монооксид углерода и метан [55]. В настоящее время основной проблемой газификации является образование трудноудаляемой смолы, которая значительно снижает выход водорода [56]. Также стоит отметить, что все термохимические способы получения биоводорода имеют серьёзный экологический эффект в виде выбросов парниковых газов, что снижает привлекательность использования альтернативных источников энергии по сравнению с ископаемыми видами топлива. Кроме того, термохимические процессы являются достаточно энергоемкими и требуют тщательного контроля температуры и других условий для достижения оптимальных результатов.

Биологические технологии производства H_2 яв-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ляются наиболее предпочтительными в связи с тем, что они менее энергоемки и наиболее безопасны для окружающей среды в отношении глобального сокращения выбросов углекислого газа [57-60]. Также важным преимуществом биологических методов получения биоводорода является повышение энергетической безопасности при производстве и снижение зависимости от импортируемого ископаемого топлива, если учитывать возможность получения биоводорода из различных отходов, образующихся на производствах [61].

В последние годы использование биомассы в качестве сырья для производства ценных компонентов, в том числе биоэнергии, биотоплива, биоводорода, биоэтанола и т.д. [62-67], становится все более популярным. В большей степени это связано с необходимостью сокращения выбросов парниковых газов и зависимости от ископаемого топлива [68, 69]. Энергия из биомассы выгодна, благодаря разнообразию сырья, которое может быть использовано для получения энергии. Как правило, энергия из биомассы растительного происхождения широко известна тем, что является углеродной нейтрально, поскольку выбросы парниковых газов при добыче ресурсов ничтожно малы. Однако, это утверждение справедливо только в том случае, если уровень выбросов при производстве альтернативной энергии эквивалентен уровню улавливания углерода той биомассой, которая используется в качестве сырья (различные растения).

В данном контексте более эффективным и экологичным видится использование биомассы микроводорослей для получения энергии [70-73], так как для получения данного вида сырья не нужно осуществлять вырубку растений и лесов, при этом для их выращивания нужны гораздо меньшие территории. В качестве территорий для выращивания водорослей могут быть использованы земли, непригодные для сельского хозяйства [74]. Также микроводоросли обладают высокими удельными темпами наращивания биомассы [75, 76] при высоком уровне фотосинтеза. Эффективность процесса фотосинтеза микроводорослей (3 %) превышает эффективность производства биомассы наземными растениями (0,2-2 %) [77]. Для естественного роста микроводорослям необходим свет, углекислый газ и некоторые питательные вещества из окружающей среды. Это снижает потребность во внешних источниках питательных веществ. Кроме того, использование диоксида углерода из атмосферы в качестве источника неорганического углерода помогает уменьшить углеродный след. Еще одним преимуществом выращивания микроводорослей является их экологически чистое производство, которое устраняет необходимость в различных удобрениях, позволяет избежать конкуренции с плодородными сельскохозяйственными почвами и требует меньше воды, чем наземные культуры, способствуя эффективному использованию ресурсов пресной воды. На данный момент из биомассы микроводорослей получают добавки для интенсификации анаэробного сбраживания отходов [78], биодизель методами экстракции, переэтерификации [79], гидротермального сжижения, а также биоводород [80, 81].

Биоводород из биомассы микроводорослей может быть получен несколькими методами [82], а именно:

- ферментация:
  - фотоферментация [83-85];
  - темная ферментация [86-88];
- биофотолиз [89]:
  - прямой [90];
  - непрямой [91];
- электрохимические методы:
  - электролиз;
  - фотоэлектрохимический метод.

Для выявления преимуществ и недостатков каждого из методов в статье приведен краткий анализ каждой стратегии производства биоводорода.

2.1. Ферментация

2.1.1. Фотоферментация

Фотоферментация – это процесс получения биоводорода, включающий обязательную ферментативную обработку биомассы фотосинтезирующими бактериями с использованием световой энергии. Для получения водорода с помощью фотоферментации требуются зеленые несерные бактерии (ЗНБ) видов Halobacterium, Chlorobium, Rhodobater, Rhodospirillum, Rhodopseudomonas и Chromatium [92, 93]. Количество производимого биоводорода тесно связано с интенсивностью света. Повышение интенсивности света вызывает фотоингибирование, что увеличивает синтез биоводорода при одновременном снижении выработки кислорода. Преимущества данного способа заключаются в высоком выходе H_2, высоком процентном содержании водорода и минимальной потребности в органических материалах. Однако, процесс преобразования биомассы в биоводород в процессе ферментации предполагает сложные метаболические и биохимические процессы. На данный момент способ требует достаточно большой модернизации для выхода на экономический рынок. Основной проблемой ферментации является низкая эффективность преобразования биомассы в биоводород. По мнению ученых, эта проблема обусловлена тем, что большинство органических компонентов остаются в виде растворенного ферментативного субстрата [94].

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

2.1.2. Темная ферментация

Более перспективным направлением получения биоводорода из микроводорослей является ферментация биомассы микроводорослей в темноте [95, 96]. Темная ферментация представляет собой биологический процесс, при котором в результате анаэробной ферментации в отсутствие света образуется водород. Эта технология набирает популярность благодаря своей экологичности, энергоэффективности и экономичности. Основное отличие темной ферментации от фотофермантации – отсутствие необходимости в обработке биомассы солнечной энергией, что делает данную технологию более доступной в связи с уменьшением требуемой площади поверхности [97], а также расширяет возможности получения биоводорода в различных условиях [98]. Для получения водорода с помощью темной ферментации требуются зеленые водоросли (ЗВ) вида Chlorella [99] и водородпродуцирующие бактерии.

При темной ферментации многие ферментативные бактерии могут производить биоводород, используя в качестве субстрата разнообразный спектр органической биомассы или отходов. Фермент гидрогеназа будет способствовать выработке водорода во время ферментации [100]. Наибольший выход водорода при темной ферментации зависит от типа субстрата, инокулянта и технологических факторов, таких как pH, температура и другие. При темной ферментации использовались многие конфигурации реакторов, такие как резервуарные реакторы с непрерывным перемешиванием, мембранные реакторы, реакторы с уплотненным слоем и анаэробные реакторы с псевдоожиженным слоем [101]. Температура является одним из важнейших факторов, влияющих на выход биоводорода. Наиболее успешные результаты были получены при ферментации при температуре 55 °C из-за большего расщепления глюкозы и формиата [102]. Помимо этого, в большинстве исследований был определен наиболее оптимальный диапазон pH, в котором необходимо поддерживать субстрат в биореакторах – от 5,5 до 6,5 [103]. Также необходимо отслеживать время выдержки субстрата в реакторах. Недавние исследования показали, что сокращение времени выдержки с 8 ч до 3 ч увеличивает выход биоводорода и скорость его производства [104]. Также одной из недавних инноваций в процессе получения биоводорода путем темного ферментирования является внесение наночастиц в сбраживаемый субстрат. Так, например, в исследовании Rambabu et al. в сбраживаемую биомассу были внесены нанокомпозиты с графитово-активированным углем, покрытые нанокомпозитом оксида железа, что привело к увеличению выхода биоводорода почти в три раза [105].

Также популярным направлением является использование остаточной биомассы микроводорослей методом темной ферментации [73]. Известно, что микроводоросли способны поглощать CO_2 [106], а также очищать сточные воды [107, 108]. Было предложено использовать остаточную биомассу микроводорослей, образующуюся после очистки сточных вод и утилизации углекислого газа для производства биоводорода [73]. Максимальное количество биоводорода (44,24 мл/л суспензии) было получено в условиях анаэробной ферментации в темноте. Использование остаточной биомассы микроводорослей для производства не только отвечает принципам циркулярной экономики, но и значительно удешевляет процесс, создавая экономически выгодный и экологически целесообразный источник энергии.

Объединение двух вышеописанных методов также является актуальным инновационным методом получения биоводорода [109]. Технология синергии фотоферментации и темной ферментации предполагает предварительную обработку биомассы микроволновым излучением, дальнейший нагрев биомассы с разбавленной кислотой, обработка методом темной ферментации с применением водородпродуцирующих бактерий в течение 48-72 ч. Далее остаточную биомассу центрифугировали, а получившуюся надосадочную жидкость обрабатывали цеолитами для снижения концентрации аммиака. Далее обработанную жидкость использовали для получения H_2 методом фотоферментации в течение 96-120 ч с добавлением ЗНБ. Данный способ показал наибольший выход биоводорода по сравнению с выходом H_2, полученном при использовании каждого из методов отдельно [110, 111]. По заявлению авторов вышеописанных работ, дальнейшие исследования в этой области следует проводить для оптимизации условий предварительной обработки биомассы микроводорослей, ферментации и метаногенеза, тем самым повышая эффективность получения биоводорода.

Ферментация имеет множество преимуществ перед другими способами получения биоводорода. Во-первых, это недорогой эффективный процесс, который позволяет получать высококачественное биотопливо из различных видов сырья. Во-вторых, это экологически чистый способ, использование которого в энергетике позволяет достичь целей устойчивого развития касаемо углеродной нейтральности, а также поможет снизить зависимость от ископаемых видов топлива.

Основным недостатком получения биоводорода методом ферментации является высокая чувствительность процесса к изменениям температуры, кислотности сбраживамой биомассы и другим внешним факторам, воздействующим на процесс. Кроме того, процесс ферментации является непостоянным, что говорит о том, для выхода на экономический рынок необходимо провести достаточно исследований по улучшению процесса получения биоводорода путем ферментации.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

2.2. Биофотолиз

Биофотолиз – это диссоциация молекул воды с образованием водорода и кислорода в биологических организмах под действием солнечной радиации. Биофотолитические процессы можно разделить на две основные категории: прямой биофотолиз и непрямой биофотолиз [112]. Общая химическая реакция, описывающая эти 2 процесса [113]:

$2H_2O$ + солнечное излучение → $2H_2 + O_2$

2.2.1. Прямой биофотолиз

В процессе прямого биофотолиза биомасса поглощает световую энергию и переносит электроны к ферредоксину. Это явление приводит к восстановлению воды [114]. Восстановленный ферредоксин может транспортировать электроны к гидрогеназе. После этого гидрогеназа катализирует превращение протона в биоводород [115] с дополнительным образованием кислорода. Такое количество кислорода подавляет активность фермента гидрогеназы и является основной проблемой в процессе прямого биофотолиза.

2.2.2. Непрямой биофотолиз

При непрямом биофотолизе электроны, образующиеся в результате расщепления воды, сначала поступают для синтеза запасных углеводов (крахмал, гликоген), а затем эти органические запасы служат донорами электронов для образования биоводорода [116]. Преимущество непрямого биофотолиза по сравнению с прямым заключается в том, что стадия образования кислорода отделена от стадии выделения водорода, поэтому кислород не ингибирует выделение биоводорода.

Биофотолиз в основном используется в лабораторных масштабах, так как данный способ получения биоводорода при своей высокой теоретической эффективности и экономической привлекательности показывал достаточно низкие практические результаты. Помимо этого, использование биофотолиза связано с другими сопутствующими проблемами, а именно: значительное потребление энергии на поддержание постоянного искусственного освещения, что значительно сказывается на стоимости конечного продукта, а также постоянная выработка кислорода, которая мешает эффективному продуцированию биоводорода. Таким образом, на данный момент биофотолиз является наименее перспективным методом получения биоводорода из-за своей низкой производительности.

2.3. Электрохимические методы

2.3.1. Электролиз

Катализируемые микробами электролизные ячейки вырабатывают биоводород во время ферментации растворимых органических веществ, содержащихся в сточных водах, при пропускании небольшого количества электрического тока.

Ячейка для микробного электролиза является современным альтернативным вариантом получения биоводорода. Электрохимически активные микроводоросли производят углекислый газ и электроны, которые передаются через анод к катоду с внешним напряжением [117], соединяясь с атомами водорода в растворе и затем высвобождая H^+. Следовательно, эффективность производства биоводорода повышается в присутствии фотосинтезирующих и нефотосинтезирующих микроорганизмов, инокулированных в источнике биомассы, таком, как сточные воды в электролизере.

2.3.2. Фотоэлектрохимический метод

Микробная фотоэлектрохимическая ячейка – это передовая технология, которая позволяет получать биоводород из органических отходов с помощью синергетической микробиологической конверсии при помощи света. Полупроводники и солнечный свет используются непосредственно в фотоэлектрохимическом процессе для разделения воды на водород и кислород. Во время фотоэлектрохимического процесса молекулы воды окисляются, что приводит к образованию кислорода и восстановлению биоводорода, поскольку образование H_2 происходит на противоположном электроде [118].

Таким образом, считается, что данный метод получения биоводорода является перспективным, однако с условием устранения некоторых его недостатков. Основными ограничениями данного метода являются:

- потеря электронов, необходимых для процесса метаногенеза;
- метаболическое разнообразие и сопротивление электрода (анода);
- сложная схема подключения в конструкции ячейки, источник питания;
- проблемы с мембранами, такие как высокая стоимость, обрастание биопленкой, переход субстрата и газа, а также долговременная стабильность;
- препятствия, связанные с катодом, включая долгосрочную стабильность, высокую стоимость катализатора, побочные реакции и сопротивление электродам.

Использование микробных топливных элементов на данный момент имеют низкое распространение в связи с низкой выходной мощностью [119] и высокими капитальными затратами на производство. Также основными недостатками электрохимических методов принято считать нестабильность работы, невозможность масштабирования, высокие потери биоводорода в процессе его получения. Однако, по мнению ученых, это достаточно перспективная технология для получения молекулярного водорода на основе

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

утилизации ингредиентов сточных вод [119, 120] сочетающая высокий теоретический выход биоводорода, а также высокую степень разложения биомассы. Будущие исследования в этой области должны быть направлены на модернизацию установленных выше недостатков [121]. Микробиологические электролизные ячейки эффективно работают в сочетании с методом темной ферментации. Применение комбинированного метода способно обеспечивать увеличение выхода биоводорода примерно на 98 % по сравнению с одностадийным процессом [122], однако на данный момент это является экономически нецелесообразным.

2.4. Генная инженерия

Генная инженерия является одним из перспективных и инновационных направлений увеличения выхода биоводорода. На данный момент разработано несколько подходов к генетической модификации микроводорослей для увеличения выхода H_2 [123, 124]. Для улучшения способности штамма микроводорослей к продуцированию биоводорода используют различные мутации, или генетические модификации путем генного нокаута. Однако данные разработки связаны с рисками получения неспецефических штаммов, которые или никак не влияют, или ухудшают выход ценного продукта. Мутантные штаммы в основном изучают методом темной ферментации. Использование измененных штаммов при производстве биоводорода методом темной ферментации позволило увеличить выход биоводорода в 5 раз [125-127]. Развитие технологий в области генной инженерии также помогает снизить чувствительность ферментов биомассы к кислороду, увеличивая при этом выход H_2. Однако, необходимо более глубокое изучение данного метода, прежде чем возможно будет использовать его в промышленных масштабах.

2.5. Сравнение существующих технологий производства биоводорода из биомассы микроводорослей

Было установлено, что наиболее популярными методами получения биоводорода из микроводорослей являются методы ферментации и биофотолиза. На данный момент они являются наиболее часто встречаемыми в научной литературе, а различные исследования, связанные с модификациями этих способов получения H_2 доказывают высокий уровень заинтересованности в них. Поэтому в табл. 1 было произведено сравнение данных методов для определения наиболее эффективного способа получения биоводорода из микроводорослей.

Таблица 1

Сравнение существующих технологий производства биоводорода из биомассы

Table 1

Comparison of existing technologies for the production of biohydrogen from biomass

Параметр сравнения	Технология производства биоводорода				Источники
	Ферментация		Биофотолиз		
	Фотоферментация	Темная ферментация	Прямой биофотолиз	Непрямой биофотолиз	
Необходимость в кислороде	-	-	-	+	[128]
Необходимость в солнечном излучении	+	-	+	+	[128]
Биохимическая реакция	Биомасса + солнечное излучение + ЗНБ → H_2	Биомасса + ЗВ → H_2	H_2O + солнечное излучение → H_2	CO_2 + H_2O + солнечное излучение → глюкоза + O_2 → H_2	[119]
Используемые микроводоросли	Chlorella sp. Scenedesmus obliquus	Lyngbya limnetica Scenedesmus Chlorella vulgaris Chlorella sp. Chlorella vulgaris Chlorella sorokiniana Chlorella vulgaris	Chlorella sp. Chlorella pyrenoidosa Chlorella vulgaris Scenedesmus obliquus Tetraspora sp. Chlamydomonas reinhardtii	Cyanobacterium Anabaena variabilis Chlorella reinhardtii	[128]

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Водород-продуцирующие бактерии	PNSB Rhodobacter sphaeroides TISTR 1952 Consortia of Rhodopseudomonas palustris Rhodospirillum rubrum Rhodopseudomonas capsularis Rhodobactercapsulatus Rhodobacter sphaeroides	Clostridium butyricum CGS5 Clostridium beijerinckii Clostridium butyricum Clostridium acetobutylicum Clostridium roseum Thermoanaerobacterium Sp	-	-	[129]
Продолжительность, ч	96–120	48–72	120-240	148–168	[129]
Мощность, млн м^3/день	0,01-0,03	0,03-0,1	0,1-0,3	0,1-0,3	[130, 131]
Выход биоводорода	125 мл H_2/г	16,2-135 мл H_2/г	1,2–73,5 мл H_2/л	6,625–243 мл H_2/л	[129]
Преимущества	Широкий световой диапазон Полное преобразование субстрата Небольшие энергетические затраты (по сравнению с биофотолизом) Высокий выход биоводорода Возможность перерабатывать побочные продукты темной ферментации Биоремедиация	Нет необходимости в кислороде и световом излучении Низкие экономические затраты Высокий выход биоводорода Низкое время выработки биоводорода → высокая эффективность Возможность утилизировать органические отходы В качестве побочных продуктов образуется широкий спектр органических кислот Широкий спектр используемых видов микроводорослей Биоремедиация Высокая мощность	Легкое культивирование микроводорослей Нет необходимости в использовании водород-продуцирующих бактерий Широкий спектр используемых видов микроводорослей Высокая теоретическая мощность	Культивирование микроорганизмов в простой среде (без содержания серы) Преодоление чувствительности к кислороду Нет необходимости в использовании водород-продуцирующих бактерий Высокая теоретическая мощность	[132-135]
Недостатки	Высокая зависимость от источника света Требуется большая площадь Необходим дорогостоящий специализированный анаэробный биореактор Низкая эффективность фотосинтеза Более высокая продолжительность процесса (по сравнению с темной ферментацией)	Необходима предварительная обработка биомассы Эффективность преобразования биомассы ниже, чем в процессе фотоферментации Необходима дополнительная очистка биоводорода от побочных газов (CO_2, CO, H_2S, CH_2)	Зависимость от источника света Высокая чувствительность к кислороду Образование взрывоопасной смеси H_2–O_2 Высокая продолжительность Низкий выход биоводорода Низкая производительность	Ограниченность в выборе видов микроводорослей Высокие инвестиционные и эксплуатационные затраты Высокая продолжительность Низкий выход биоводорода Низкая производительность	[132-135]

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Анализируя таблицу 1, можно прийти к выводу, что на данный момент наиболее эффективной технологией получения биоводорода из микроводорослей является темная ферментация. Основные преимущества данной технологии, отличающей ее от других:

- процесс не требует наличия кислорода и солнечного излучения, что делает его более эффективным и менее энергозатратным. Это делает данную технологию экономически более эффективной и устойчивой с точки зрения затрат;
- в процессе темной ферментации выделяется до 135 мл H_2/г, обеспечивая наиболее высокий выход биоводорода среди других методов. В этом процессе микроводоросли разлагаются под действием бактерий в анаэробных условиях, что способствует высокой производительности биогаза;
- темная ферментация позволяет использовать различные виды микроводорослей, что делает этот метод более гибким и универсальным.

В целом, технология темной ферментации для получения биоводорода из микроводорослей считается наиболее эффективной благодаря своей высокой производительности, экономической эффективности, гибкости и экологической устойчивости.

Также важно отметить, что в данной таблице были рассмотрены только самые популярные на данный момент используемые методы получения биоводорода. Однако, исходя из литературного обзора, можно сделать вывод о том, что метод, объединяющий фотоферментацию и темную ферментацию, в перспективе является наиболее эффективным и устойчивым. Также важным трендом в инновационных открытиях в области получения биоводорода является использование генной инженерии. Таким образом, можно предположить, что наиболее перспективным направлением в области биоводородной энергетики сейчас является использование измененных при помощи генной инженерии штаммов микроводорослей в процессе, объединяющем фотоферментацию и темную ферментацию.

3. Обсуждение

Процесс производства биоводорода из микроводорослей является многообещающим способом получения энергии с наименьшим воздействием на окружающую среду. Однако большинство ученых сходятся во мнении, что на данный момент технология требует определенных доработок, связанных со следующими, возникающими в процессе получения биоводорода, проблемами:

- низкий выход биоводорода [136]. На данный момент эффективность производства биоводорода из микроводорослей все еще относительно низкая по сравнению с другими методами производства водорода. Это означает, что для получения значительных объемов биоводорода требуется большое количество микроводорослей и процесс может быть неэффективным с экономической точки зрения;
- низкая эффективность преобразования биомассы;
- чувствительность некоторых ферментов биомассы к кислороду [137];
- высокие капитальные затраты при коммерческом масштабировании [138]. Одной из основных технологических сложностей производства биоводорода из микроводорослей является обеспечение оптимальных условий для их культивирования, сбора и разложения. Это может потребовать значительных инвестиций в инфраструктуру и технологическое оборудование;
- проблемы, возникающие с хранением и транспортировкой полученного биоводорода [37];
- экологичная утилизация побочных продуктов [37];
- биореакторы, поддающиеся разгерметизации [136].

Таким образом, если инновационные открытия в области получения биоводорода приведут к значительному снижению капитальных затрат при коммерческом масштабировании, данная технология сможет вызвать большой интерес к ее коммерциализации и внедрению.

Заключение

Производство биоводорода из микроводорослей представляет собой перспективное и экологически устойчивое решение для снабжения чистой энергией. Технология темной ферментации микроводорослей для производства биоводорода выделяется своей эффективностью, так как она позволяет получать наибольшее количество биоводорода при минимальных затратах. Этот метод имеет потенциал стать важным инструментом в секторе возобновляемой энергии и сможет удовлетворить потребности в чистой энергии, снизив при этом зависимость от ископаемых топлив.

Также многообещающим направлением в области получения биоводорода является использование мутантных штаммов, измененных при помощи генной инженерии в процессе темной ферментации. Одним из инновационных направлений получения биоводорода является использование таких штаммов в процессе, объединяющим методы фотоферметации и темной ферментации.

Однако необходимо отметить, что для практического внедрения этой технологии требуется дальнейшее исследование и разработка инженерных ре-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

шений. Важно продолжать работу над оптимизацией процесса производства биоводорода из микроводорослей, а также развивать методы для повышения его эффективности и экономической целесообразности. В целом, использование микроводорослей для производства биоводорода представляет собой многообещающую альтернативу для обеспечения общества чистой энергией в будущем.

Благодарности:

The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2022-1136 dated 01.07.2022)/ Исследование выполнялось при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2022-1136 от 01.07.2022).

Список литературы

[1]. INTERNATIONAL ENERGY OUTLOOK 2023 – URL: https://www.eia.gov/outlooks/ieo/ (Дата обращения: 23.12.2023).

[2]. Omar, Md & Hasanujzaman, Muhammad. (2023). The role of national culture in renewable energy consumption: Global evidence. Energy Reports. 10. 1765-1784. 10.1016/j.egyr.2023.08.033.

[3]. Bayro-Kaiser, V.; Nelson, N. Microalgal hydrogen production: Prospects of an essential technology for a clean and sustainable energy economy. Photosynth. Res. 2017, 133, 49-62.

[4]. Kanwal, Fariha & Torriero, Angel. (2022). Biohydrogen – A Green Fuel for Sustainable Energy Solutions. Energies. 15. 7783. 10.3390/en15207783.

[5]. Norgate, T. E., Jahanshahi, S., Rankin, W. J., 2007. Assessing the environmental impact of metal production processes. J. Clean. Prod. 15 (8-9), 838-848. https://doi.org/ 10.1016/j.jclepro.2006.06.018.

[6]. Norgate, Terry, Jahanshahi, Sharif, 2011. Reducing the greenhouse gas footprint of primary metal production: Where should the focus be? Miner. Eng. 24 (14), 1563-1570. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.08.007.

[7]. Rankin, W. John, 2011. Minerals, metals and sustainability: meeting future material needs. CSIRO Publishing. ISBN 0-643-09726-0.

[8]. Sonter, Laura J., Dade, Marie C., Watson, James E.M., Valenta, Rick K., 2020. Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. Nat. Commun. 11 (1), 4174. https://doi.org/10.1038/s41467-020-17928-5.

[9]. Luckeneder, Sebastian, Giljum, Stefan, Schaffartzik, Anke, Maus, Victor, Tost, Michael, 2021. Surge in global metal mining threatens vulnerable ecosystems. Glob. Environ. Chang. 69 https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102303.

[10]. El Rasafi, Taoufik, Nouri, Mohamed, Haddioui, Abdelmajid, 2021. Metals in mine wastes: environmental pollution and soil remediation approaches – a review. Geosyst. Eng. 24 (3), 157-172. https://doi.org/10.1080/12269328.2017.1400474.

[11]. Bardi, Ugo, 2014. Extracted: How the quest for mineral wealth is plundering the planet. Chelsea Green Publishing. ISBN 1-60358-541-9.

[12]. Bhattacharya, M., Churchill, S. A., Paramati, S.R., 2017. The dynamic impact of renewable energy and institutions on economic output and CO2 emissions across regions. Renew. Energy 111, 157-167.

[13]. Duscha, V., Fougeyrollas, A., Nathani, C., Pfaff, M., Ragwitz, M., Resch, G., Walz, R. .., 2016. Renewable energy deployment in europe up to 2030 and the aim of a triple dividend. Energy Policy 95, 314-323.

[14]. Thapar, S., Sharma, S., Verma, A., 2017. Local community as shareholders in clean energy projects: Innovative strategy for accelerating renewable energy deployment in India. Renew. Energy 101, 873–885.

[15]. Wheeler, T.; von Braun, J. Climate change impacts on global food security. Science 2013, 341, 508–513.

[16]. Tai, A.P.; Martin, M.V.; Heald, C.L. Threat to future global food security from climate change and ozone air pollution. Nat. Clim. Chang. 2014, 4, 817

[17]. Morya, Raj & Raj, Tirath & Lee, Youngkyu & Pandey, Ashutosh & Kumar, Deepak & Singhania, Reeta & Singh, Saurabh & Verma, Jay & Kim, Sang-Hyoun. (2022). Recent updates in biohydrogen production strategies and life–cycle assessment for sustainable future. Bioresource Technology. 366. 128159. 10.1016/j.biortech.2022.128159.

[18]. Corlett, R. T.; Westcott, D. A. Will plant movements keep up with climate change? Trends Ecol. Evol. 2013, 28, 482-488.

[19]. Franks, S. J.; Weber, J. J.; Aitken, S. N. Evolutionary and plastic responses to climate change in terrestrial plant populations. Evol. Appl. 2014, 7, 123-139.

[20]. Moritz, C.; Agudo, R. The future of species under climate change: Resilience or decline? Science 2013, 341, 504-508.

[21]. Rogelj, Joeri, den Elzen, Michel, Hohne, Niklas, Fransen, Taryn, Fekete, Hanna, Winkler, Harald, Roberto Schaeffer, Fu, Sha, Keywan Riahi, Meinshausen, Malte, 2016. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 ^{0}C. Nature 534 (7609), 631-639. https://doi.org/10.1038/nature18307.

[22]. Schleussner, Carl-Friedrich, Rogelj, Joeri, Schaeffer, Michiel, Lissner, Tabea, Licker, Rachel, Fischer, Erich M., Knutti, Reto, Levermann, Anders, Frieler, Katja, Hare, William, 2016. Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. Nature Climate Change 6 (9), 827-835. https://doi.org/10.1038/nclimate3096

[23]. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Connors,

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

S.L., Pean, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekci, O., Yu, R., Zhou, B., 2021. Summary for Policymakers. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Cambridge University Press. Technical report.

[24]. Smith, Christopher J., Forster, Piers M., Allen, Myles, Fuglestvedt, Jan, Millar, Richard J., Rogelj, Joeri, Zickfeld, Kirsten, 2019. 38 Current fossil fuel infrastructure does not yet commit us to 1,5 ^{0}C warming. Nature Commun. 10 (1), 101. https://doi.org/ 10.1038/ s41467-018-07999-w.

[25]. Gielen D, Boshell F, Saygin D, Bazilian MD, Wagner N, Gorini R (2019) The role of renewable energy in the global energy transformation. Energ Strat Rev 24:38-50

[26]. Zheng H. Y., Song M. L., Shen Z. Y. (2021) The evolution of renewable energy and its impact on carbon reduction in China. Energy 237:121639

[27]. Lanjekar, Pranay & Panwar, N. L. (2023). A Review on Hydrogen Production from Biomass and Commercialization Assessment Through Technology Readiness Levels (TRLs). BioEnergy Research. 1-20. 10.1007/s12155-023-10697-1.

[28]. Chen W. -H., Chong C. T., Thomas S. et al. (2021) Impacts of COVID-19 pandemic on the global energy system and the shift progress to renewable energy: Opportunities, challenges, and policy implications. Energy Policy 154:112322

[29]. A. C. Lewis Optimising air quality co-benefits in a hydrogen economy: a case for hydrogen-specific standards for NO x emissions. Environ. Sc.: Atmos., 1 (2021), pp. 201-207.

[30]. Vidadili, N.; Suleymanov, E.; Bulut, C.; Mahmudlu, C. Transition to renewable energy and sustainable energy development in azerbaijan. Renew. Sustain. Energy Rev. 2017, 80, 1153-1161.

[31]. Kanwal, F.; Torriero, A. A. J. Biohydrogen – A Green Fuel for Sustainable Energy Solutions. Energies 2022, 15, 7783. https://doi.org/10.3390/en15207783

[32]. Водород в энергетике : учеб. пособие / Р. В. Радченко, А. С. Мокрушин, В. В. Тюльпа. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 229, [3] с.

[33]. Alagumalai, Avinash & Devarajan, Balaji & Song, Hua & Wongwises, Somchai & Ledesma-Amaro, Rodrigo & Mahian, Omid & Sheremet, Mikhail & Lichtfouse, Eric. (2023). Machine learning in biohydrogen production: a review. Biofuel Research Journal. 10. 1844-1858. 10.18331/BRJ2023.10.2.4.

[34]. Al-Dailami, Anas & Ahmad, Imran & Iwamoto, Koji & Abdullah, Norhayati & Yuzir, Ali. (2022). Feasibility and viability of procuring biohydrogen from microalgae: An emerging and sustainable energy resource technology. Journal of Physics: Conference Series. 2259. 10.1088/1742-6596/2259/1/012014.

[35]. Kapdan, I. K., Kargi, F., 2006. Bio-hydrogen production from waste materials. Enzyme Microb. Technol. 38(5), 569-582.

[36]. Lewis Oscar, F. L., Vismaya, S., Arunkumar, M., Thajuddin, N., Dhanasekaran, D., Nithya, C., 2016. Algal Nanoparticles: Synthesis and Biotechnological Potentials, in: Thajuddin, N., Dhanasekaran, D. (Eds.). – Intech Open, Rijeka, p. Ch. 7.

[37]. Nagarajan, D., Lee, D.J., Kondo, A., Chang, J. S., 2017. Recent insights into biohydrogen production by microalgae-from biophotolysis to dark fermentation. Bioresour. Technol. 227, 373- 387.

[38]. Show, K. Y., Yan, Y., Ling, M., Ye, G., Li, T., Lee, D. J., 2018. Hydrogen production from algal biomass-advances, challenges and prospects. Bioresour. Technol. 257, 290-300.

[39]. Kumar, G., Mathimani, T., Rene, E. R., Pugazhendhi, A., 2019. Application of nanotechnology in dark fermentation for enhanced biohydrogen production using inorganic nanoparticles. Int. J. Hydrogen Energy. 44(26), 13106-13113.

[40]. Dawood, F., Anda, M., and Shafiullah, G. M. (2020). Hydrogen Production for Energy: An Overview. Int. J. Hydrogen Energ. 45, 3847-3869. doi:10.1016/ j.ijhydene.2019.12.059

[41]. Nagarajan, D., Lee, D. -J., Kondo, A., and Chang, J. -S. (2017). Recent Insights into Biohydrogen Production by Microalgae – from Biophotolysis to Dark Fermentation. Bioresour. Tech. 227, 373-387. doi:10.1016/ j.biortech.2016.12.104

[42]. Abdalla, A. M., Hossain, S., Nisfindy, O. B., Azad, A. T., Dawood, M., and Azad, A. K. (2018). Hydrogen Production, Storage, Transportation and Key Challenges with Applications: A Review. Energ. Convers. Manage. 165, 602-627. doi:10.1016/j.enconman.2018.03.088

[43]. Das, D., Khanna, N., and Dasgupta, C. N. (2019). Biohydrogen Production: Fundamentals and Technology Advances. Boca Raton: CRC Press.

[44]. Ahmed, Shams & Rafa, Nazifa & Rahman, Md. Mofijur & Badruddin, Irfan & Inayat, Abrar & Ali, Md & Farrok, Omar & T. M., Yunus Khan. (2021). Biohydrogen Production From Biomass Sources: Metabolic Pathways and Economic Analysis. Frontiers in Energy Research. 10.3389/fenrg.2021.753878.

[45]. Demirbas, A. Hydrogen-rich gas from fruit shells via supercritical water extraction. Int. J. Hydrog. Energy 2004, 29, 1237-1243.

[46]. Pipitone, G.; Zoppi, G.; Pirone, R.; Bensaid, S. A critical review on catalyst design for aqueous phase reforming. Int. J. Hydrog. Energy 2022, 47, 151-180.

[47]. Tak, S. S.; Shetye, O.; Muley, O.; Jaiswal, H.; Malik, S. N. Emerging technologies for hydrogen production from wastewater. Int. J. Hydrog. Energy 2022.

[48]. Zoppi, G.; Pipitone, G.; Galletti, C.; Rizzo, A.M.; Chiaramonti, D.; Pirone, R.; Bensaid, S. Aqueous phase reforming of lignin-rich hydrothermal liquefaction

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

by-products: A study on catalyst deactivation. Catal. Today 2021, 365, 206-213.

[49]. Rahman, S.; Masdar, M.; Rosli, M.; Majlan, E.; Husaini, T.; Kamarudin, S.; Daud, W. Overview biohydrogen technologies and application in fuel cell technology. Renew. Sustain. Energy Rev. 2016, 66, 137–162.

[50]. Torzillo, G.; Scoma, A.; Faraloni, C.; Giannelli, L. Advances in the biotechnology of hydrogen production with the microalga chlamydomonas reinhardtii. Crit. Rev. Biotechnol. 2015, 35, 485-496.

[51]. Rumpel, S.; Siebel, J. F.; Farès, C.; Duan, J.; Reijerse, E.; Happe, T.; Lubitz, W.; Winkler, M. Enhancing hydrogen production of microalgae by redirecting electrons from photosystem i to hydrogenase. Energy Environ. Sci. 2014, 7, 3296-3301.

[52]. Osman, Ahmed & Lai, Zhi Ying & Farghali, Mohamed & Yiin, Chung Loong & Elgarahy, Ahmed & Hammad, Ahmed & Ihara, Ikko & Alfatesh, Ahmed & Rooney, David & Yap, Pow Seng. (2023). Optimizing biomass pathways to bioenergy and biochar application in electricity generation, biodiesel production, and biohydrogen production. Environmental Chemistry Letters. 10.1007/s10311-023-01613-2.

[53]. Chen W. -H., Lin B. -J., Lin Y. -Y., Chu Y. -S., Ubando A. T, Show P. L., Ong H. C., Chang J. -S., Ho S. -H., Culaba A. B. (2021 b.) Progress in biomass torrefaction: principles, applications and challenges. Prog Energy Combust Sci 82:100887

[54]. Mishra S., Upadhyay R. K. (2021). Review on biomass gasification: gasifiers, gasifying mediums, and operational parameters. Mater Sci Energy Technol 4:329-340

[55]. Sajid M., Raheem A., Ullah N., Asim M., Rehman M. S. U., Ali N. (2022). Gasification of municipal solid waste: progress, challenges, and prospects. Renew Sustain Energy Rev 168:112815

[56]. Li B., Mbeugang C. F. M., Huang Y., Liu D., Wang Q., Zhang S. J. E. (2022). A review of CaO based catalysts for tar removal during biomass gasification. Energy. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022. 123172

[57]. Bundhoo, M. Z.; Mohee, R. Inhibition of dark fermentative bio-hydrogen production: A review. Int. J. Hydrog. Energy 2016, 41, 6713–6733

[58]. Ghimire, A.; Frunzo, L.; Pirozzi, F.; Trably, E.; Escudie, R.; Lens, P.N.; Esposito, G. A review on dark fermentative biohydrogen production from organic biomass: Process parameters and use of by-products. Appl. Energy 2015, 144, 73-95.

[59]. Liu, H.; Hu, H.; Chignell, J.; Fan, Y. Microbial electrolysis: Novel technology for hydrogen production from biomass. Biofuels 2010, 1, 129-142.

[60]. Srivastava, R. K., Shetti, N. P., Reddy, K. R., Aminabhavi, T. M., 2020. Biofuels, biodiesel and biohydrogen production using bioprocesses. a review. Environ. Chem. Lett. 18, 1049-1072.

[61]. Demirbas, A., 2009. Biofuels from agricultural biomass. Energy Sources, Part A. 31(17), 1573-1582.

[62]. Kasiteropoulou, Dorothy & Metsoviti, M. & Papadopoulou, Katerina & Gougoulias, Nikolaos & Mpesios, Anastasios & Ntoufas, L. & Spiliotis, Xenofon & Papapolymerou, George. (2021). USE OF ANAEROBIC DIGESTRATE FROM BIOGAS PLANT EFFLUENTS AND GLYCEROL AS RAW MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF BIOMASS AND BIOENERGY.

[63]. Мировые тенденции в области получения энергии из биомассы / К. А. Мещерякова, Н. А. Политаева, А. М. Опарина, Н. В. Зибарев // Неделя науки ИСИ: Сборник материалов Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 03-09 апреля 2023 года / Печатается по решению Совета по издательской деятельности Ученого совета Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.. Том Часть 1. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2023. – С. 251-253. – EDN ZNCMYW.

[64]. Politaeva, Natalia & Smyatskaya, Yulia & Alafif, Rafat & Pfeifer, Christoph & Mukhametova, Liliya. (2020). Development of Full-Cycle Utilization of Chlorella sorokiniana Microalgae Biomass for Environmental and Food Purposes. Energies. 13. 2648. 10.3390/en13102648.

[65]. Rudras Baliga. Sustainable Algae Biodiesel Production in Cold Climates / Rudras Baliga, Susan E. Powers. // International Journal of Chemical Engineering. – 2010. – Vol.2010. Article ID 102179. – 13 p.

[66]. Kothari, R.; Pandey, A. K.; Ahmad, S.; Kumar, A.; Pathak, V. V.; Tyagi, V. V. Microalgal cultivation for value-added products: A critical enviro-economical assessment. 3 Biotech 2017, 7, 243.

[67]. Tao, J.; Ge, Y.; Liang, R.; Sun, Y.; Cheng, Z.; Yan, B.; Chen, G. Technologies integration towards bio-fuels production: A state-of-the-art review. Appl. Energy Combust. Sci. 2022, 10, 100070.

[68]. Osman A. I., Chen L., Yang M., Msigwa G., Farghali M., Fawzy S., Rooney D. W., Yap P. -S. (2022a) Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. Environ Chem Lett 21:741–764. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01532-8

[69]. Osman A. I., Farghali M., Ihara I., Elgarahy A. M., Ayyad A., Mehta N., Ng K. H., Abd El-Monaem E. M., Eltaweil A. S., Hosny M., Hamed S. M., Fawzy S., Yap P. -S., Rooney D. W. (2023) Materials, fuels, upgrading, economy, and life cycle assessment of the pyrolysis of algal and lignocellulosic biomass: a review. Environ Chem Lett 21:1419–1476. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01573-7

[70]. Sengmee D., Cheirsilp B., Suksaroge T. T., Prasertsan P. Biophotolysis-based hydrogen and lipid production by oleaginous microalgae using crude glycerol as exogenous carbon source. Int J Hydrog Energy. 2017;42:1970–6. https://doi.org/10.1016/

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

j.ijhydene.2016.10.089.

[71]. Oncel S., Kose A. Comparison of tubular and panel type photobioreactors for biohydrogen production utilizing Chlamydomonas reinhardtii considering mixing time and light intensity. Bioresour Technol. 2014;151:265–70. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.076.

[72]. Giannelli L., Torzillo G. Hydrogen production with the microalga Chlamydomonas reinhardtii grown in a compact tubular photobioreactor immersed in a scattering light nanoparticle suspension. Int J Hydrog Energy. 2012;37:16951–61. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.08.103.

[73]. Velmozhina, K.; Shinkevich, P.; Zhazhkov, V.; Politaeva, N.; Korablev, V.; Vladimirov, I.; Morales, T. C. Production of Biohydrogen from Microalgae Biomass after Wastewater Treatment and Air Purification from CO_2. Processes 2023, 11, 2978. https://doi.org/10.3390/pr11102978

[74]. Иванова, П. В. Микроводоросли как источник альтернативного топлива / П. В. Иванова, А. А. Натальина. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2020. – № 22 (312). – С. 591-594.

[75]. Borowiak, Daniel & Krzywonos, Małgorzata. (2022). Bioenergy, Biofuels, Lipids and Pigments – Research Trends in the Use of Microalgae Grown in Photobioreactors. Energies. 15. 5357. 10.3390/en15155357.

[76]. Muhammad, G., Alam, M. A., Mofijur, M., Jahirul, M. I., Lv, Y., Xiong, W., et al. (2021). Modern Developmental Aspects in the Field of Economical Harvesting and Biodiesel Production from Microalgae Biomass. Renew. Sust. Energ. Rev. 135, 110209. doi:10.1016/j.rser.2020.110209

[77]. Pignolet, O.; Jubeau, S.; Vaca-Garcia, C.; Michaud, P. Highly valuable microalgae: Biochemical and topological aspects. J. Ind. Microbiol. Biotechnol. 2013, 40, 781-796.

[78]. Вельможина, К. А. Применение микроводорослей Chlorella kessleri для интенсификации анаэробного сбраживания пищевых отходов / К. А. Вельможина, П. С. Шинкевич // Технологии переработки отходов с получением новой продукции: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Киров, 30 ноября 2022 года. – Киров: Вятский государственный университет, 2022. – С. 183-184. – EDN GQKYUA.

[79]. Зибарев, Н. В. Получение биодизеля из микроводорослей путём переэтерификации биомассы / Н. В. Зибарев, Н. А. Политаева, Л. М. Молодкина // Бутлеровские сообщения. – 2023. – Т. 73, № 1. – С. 101-108. – DOI 10.37952/ROI-jbc-01/23-73-1-101. – EDN APBICH.

[80]. Velmozhina, K.; Shinkevich, P.; Zhazhkov, V.; Politaeva, N.; Korablev, V.; Vladimirov, I.; Morales, T. C. Production of Biohydrogen from Microalgae Biomass after Wastewater Treatment and Air Purification from CO2. Processes 2023, 11, 2978. https://doi.org/10.3390/pr11102978

[81]. Gaffron H, Rubin J. 1942 Fermentative and photochemical production of hydrogen in algae The Journal of General Physiology 26(2) 219-40.

[82]. Bartels JR, Pate MB, Olson NK (2010) An economic survey of hydrogen production from conventional and alternative energy sources. Int J Hydrogen Energy 35:8371–8384. https://doi.org/ 10.1016/j.ijhydene.2010.04.035

[83]. Benemann, J. R. Hydrogen and methane production through microbial photosynthesis. In Living Systems as Energy Converters; Elsevier/North-Holland Biomedical Press: Amsterdam, The Netherlands, 1977; pp. 285–298.

[84]. Bhatia S. K., Jagtap S. S., Bedekar A. A., Bhatia R. K., Rajendran K., Pugazhendhi A., Rao C. V., Atabani A., Kumar G., Yang Y. –H. (2021) Renewable biohydrogen production from lignocellulosic biomass using fermentation and integration of systems with other energy generation technologies. Sci Total Environ 765:144429

[85]. Saravanan A., Kumar P. S., Aron N. S., Jeevanantham S., Karishma S., Yaashikaa P., Chew K. W., Show P. L. (2022a) A review on bioconversion processes for hydrogen production from agroindustrial residues. Int J Hydrog Energy 47(88):37302–37320

[86]. Benemann, J. Hydrogen biotechnology: Progress and prospects. Nat. Biotechnol. 1996, 14, 1101-1103.

[87]. Benemann, J. R. Hydrogen production by microalgae. J. Appl. Phycol. 2000, 12, 291-300.

[88]. Nath, K.; Das, D. Improvement of fermentative hydrogen production: Various approaches. Appl. Microbiol. Biotechnol. 2004, 65, 520-529.

[89]. Huesemann, M. H.; Benemann, J. R. Biofuels from Microalgae: Review of Products, Processes and Potential, with Special Focus on Dunaliella sp. In The Alga Dunaliella; CRC Press: London, UK, 2009; pp. 445-474.

[90]. S. N. A. Rahman et al., Overview biohydrogen technologies and application in fuel cell technology, Renew. Sustain. Energy Rev. 66, 137-162 (2016)

[91]. Melitos, George & Voulkopoulos, Xenofon Michail & Zabaniotou, Anastasia. (2021). Waste to Sustainable Biohydrogen Production Via Photo-Fermentation and Biophotolysis − A Systematic Review. Renewable Energy and Environmental Sustainability. 6. 45. 10.1051/rees/2021047.

[92]. Sasikala K., Ramana C. V., Raghuveer Rao P. (1991) Environmental regulation for optimal biomass yield and photoproduction of hydrogen by Rhodobacter sphaeroides O.U. 001. Int J Hydrogen Energy 16:597–601. https://doi.org/10.1016/0360- 3199(91)90082-T

[93]. Barbosa M. J., Rocha JMS, Tramper J, Wijfels RH (2001) Acetate as a carbon source for hydrogen production by photosynthetic bacteria. J Biotechnol 85:25–33. https://doi.org/10.1016/ S0168-1656(00)00368-0

[94]. Kothari R., Singh D. P., Tyagi V. V., Tyagi S. K. (2012) Fermentative hydrogen production – an alternative clean energy source. Renew Sustain Energy Rev 16:2337–2346. https://doi.org/10.1016/

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

j.rser. 2012.01.002

[95]. Sallam, E. R.; Khairy, H. M.; Elshobary, M.; Fetouh, H. A. Application of algae for hydrogen generation and utilization. In Handbook of Research on Algae as a Sustainable Solution for Food, Energy, and the Environment; El-Sheekh, M.M., Abdullah, N., Ahmad, I., Eds.; IGI Global: Hershey, PA, USA, 2022; pp. 354-378.

[96]. Martínez, V. L.; Salierno, G. L.; García, R. E.; Lavorante, M. J.; Galvagno, M. A.; Cassanello, M. C. Biological Hydrogen Production by Dark Fermentation in a Stirred Tank Reactor and Its Correlation with the pH Time Evolution. Catalysts 2022, 12, 1366.

[97]. Dincer I., Acar C. (2016) Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. International Scientifc Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE) 2495:14-36 https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.11-12.014-036

[98]. Ubando, A. T.; Chen, W. -H.; Hurt, D. A.; Conversion, A.; Rajendran, S.; Lin, S. -L. Biohydrogen in a circular bioeconomy: A critical review. Bioresour. Technol. 2022, 366, 128168.

[99]. Jim´enez-Llanos, J., Ramírez-Carmona, M., Rendon-Castrill ´ on, ´ L., Ocampo-Lopez, ´ C., 2020. Sustainable biohydrogen production by Chlorella sp. microalgae: A review. Int. J. Hydrogen Energy 45, 8310-8328.

[100]. Mishra P., Krishnan S., Rana S., Singh L., Sakinah M., Ab. Wahid Z. (2019) Outlook of fermentative hydrogen production techniques: an overview of dark, photo and integrated dark-photo fermentative approach to biomass. Energ Strat Rev 24:27–37

[101]. Brindhadevi K, Shanmuganathan R, Pugazhendhi A, Gunasekar P, Manigandan S (2021) Biohydrogen production using horizontal and vertical continuous stirred tank reactor-a numerical optimization. Int J Hydrog Energy 46(20):11305–11312

[102]. Chen H., Wu J., Huang R., Zhang W., He W., Deng Z., Han Y., Xiao B., Luo H., Qu W. J. C. (2022a) Effects of temperature and total solid content on biohydrogen production from dark fermentation of rice straw: Performance and microbial community characteristics. Chemosphere 286:131655

[103]. Ziara R. M., Miller D. N., Subbiah J., Dvorak B. I. (2019) Lactate wastewater dark fermentation: the effect of temperature and initial pH on biohydrogen production and microbial community. Int J Hydrog Energy 44(2):661–673

[104]. Gorgec FK, Karapinar I (2019) Biohydrogen production from hydrolyzed waste wheat by dark fermentation in a continuously operated packed bed reactor: the effect of hydraulic retention time. Int J Hydrog Energy 44(1):136–143

[105]. Rambabu K., Bharath G., Banat F., Hai A., Show P. L. (2021) Ferric oxide/date seed activated carbon nanocomposites mediated dark fermentation of date fruit wastes for enriched biohydrogen production. Int J Hydrog Energy 46(31):16631–16643

[106]. Politaeva, N.; Ilin, I.; Velmozhina, K.; Shinkevich, P. Carbon Dioxide Utilization Using Chlorella microalgae. Environments 2023, 10, 109.

[107]. Zibarev, N. V.; Politaeva, N. A.; Andrianova, M. Y. Use of Chlorella sorokiniana (Chlorellaceae, Chlorellales) Microalgae for Purification of Brewing-Industry Wastewaters. Biol. Bull. 2022, 49, 1776-1780.

[108]. Zibarev, N. V.; Zhazhkov, V. V.; Andrianova, M. Y.; Politaeva, N. A. Integrated use of microalgae in wastewater treatment and waste recycling food industry. Ecol. Ind. Russ. 2021, 25, 18-23.

[109]. Xia, A., Cheng, J., Ding, L., Lin, R., Huang, R., Zhou, J., Cen, K., 2013a. Improvement of the energy conversion efficiency of Chlorella pyrenoidosa biomass by a three-stage process comprising dark fermentation, photofermentation, and methanogenesis. Bioresour. Technol. 146, 436-443.

[110]. Cheng, J., Liu, Y., Lin, R., Xia, A., Zhou, J., Cen, K., 2014. Cogeneration of hydrogen and methane from the pretreated biomass of algae bloom in Taihu Lake. Int. J. Hydrogen Energy 39, 18793-18802.

[111]. Xia, A., Cheng, J., Lin, R., Lu, H., Zhou, J., Cen, K., 2013b. Comparison in dark hydrogen fermentation followed by photo hydrogen fermentation and methanogenesis between protein and carbohydrate compositions in Nannochloropsis oceanica biomass. Bioresour. Technol. 138, 204-213.

[112]. Melitos, George & Voulkopoulos, Xenofon Michail & Zabaniotou, Anastasia. (2021). Waste to Sustainable Biohydrogen Production Via Photo-Fermentation and Biophotolysis − A Systematic Review. Renewable Energy and Environmental Sustainability. 6. 45. 10.1051/rees/2021047.

[113]. S. Anto et al. Algae as green energy reserve: technological outlook on biofuel production, Chemosphere242, 125079 (2020)

[114]. S. N. A. Rahman et al., Overview biohydrogen technologies and application in fuel cell technology, Renew. Sustain. Energy Rev. 66, 137-162 (2016)

[115]. S. Mona et al. Green technology for sustainable biohydrogen production (waste to energy): a review, Sci. Total Environ. 728, 138481 (2020)

[116]. Бозиева А. М., Заднепровская Е. В., Аллахвердиев С. И. Получение биоводорода: последние достижения и современное состояние // Глобальная энергия. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 59-78. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28404

[117]. Kadier, A., Kalil, M. S., Chandrasekhar, K., Mohanakrishna, G., Saratale, G. D., Saratale, R. G., et al. (2018). Surpassing the Current Limitations of High Purity H_2 Production in Microbial Electrolysis Cell (MECs): Strategies for Inhibiting Growth of Methanogens. Bioelectrochemistry. Bioelectrochemistry 119, 211-219. doi:10.1016/j.bioelechem.2017.09.014

[118]. El-Dalatony, M. M., Zheng, Y., Ji, M. -K., Li, X., and Salama, E. -S. (2020). Metabolic Pathways for Microalgal Biohydrogen Production: Current Progress

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

and Future Prospectives. Bioresour. Tech. 318, 124253. doi:10.1016/j.biortech.2020.124253

[119]. Марков С. А., Протасов Е. С., Быбин В. А., Стом Д. И. Получение водорода с помощью микроорганизмов и микробных топливных элементов на основе утилизации ингредиентов сточных вод и различных отходов // АЭЭ. 2013. – № 1-2 (118).

[120]. Liu H., Grots S. and Logan B. Electrochemically Assisted microbial production of hydrogen from acetate // Environ. Sci. Technol. – 2005. – Vol. 39. – P. 4317-4320.

[121]. Hosseinzadeh, A.; Zhou, J.L.; Li, X.; Afsari, M.; Altaee, A. Techno-economic and environmental impact assessment of hydrogen production processes using bio-waste as renewable energy resource. Renew. Sustain. Energy Rev. – 2022, 156, 111991.

[122]. Lee, H. -S.; Xin, W.; Katakojwala, R.; Mohan, S.V.; Tabish, N.M.D. Microbial electrolysis cells for the production of biohydrogen in dark fermentation – A review. Bioresour. Technol. 2022, 363, 127934.

[123]. Mathews, J., Wang, G., 2009. Metabolic pathway engineering for enhanced biohydrogen production. Int. J. Hydrogen Energy 34, 7404-7416.

[124]. Show, K.Y., Yan, Y., Ling, M., Ye, G., Li, T., Lee, D. J., 2018. Hydrogen production from algal biomass – advances, challenges and prospects. Bioresour. Technol. 257, 290-300.

[125]. Chien, L. F., Kuo, T. T., Liu, B. H., Lin, H. D., Feng, T. Y., Huang, C. C., 2012. Solar-to-bio H_2 production enhanced by homologous overexpression of hydrogenase in green alga Chlorella sp. DT. Int. J. Hydrogen Energy 37, 17738-17748.

[126]. Oey, M., Sawyer, A. L., Ross, I. L., Hankamer, B., 2016. Challenges and opportunities for hydrogen production from microalgae. Plant Biotechnol. J. 14, 1487-1499.

[127]. Polle, J. E. W., Kanakagiri, S. D., Melis, A., 2003. Tla1, a DNA insertional transformant of the green alga Chlamydomonas reinhardtii with a truncated light-harvesting chlorophyll antenna size. Planta 217, 49-59.

[128]. Al-Dailami, Anas & Ahmad, Imran & Iwamoto, Koji & Abdullah, Norhayati & Yuzir, Ali. (2022). Feasibility and viability of procuring biohydrogen from microalgae: An emerging and sustainable energy resource technology. Journal of Physics: Conference Series. 2259. 10.1088/1742-6596/2259/1/012014.

[129]. Karthik, Obuli & Goswami, Rahul Kumar & Verma, Pradeep. (2021). Advanced microalgae-based renewable biohydrogen production systems: A review. Bioresource Technology. 320. 124301. 10.1016/j.biortech.2020.124301.

[130]. Садраддинова, Э. Р. Микробная переработка целлюлозосодержащего органического сырья в водород [Текст]: дис. … канд. биол. наук: 03.02.03, 03.01.06 / Э. Р. Садраддинова. – Москва, 2010. – 115 с.: ил. – Библиогр.: с. 83-115.

[131]. Claassen, P. A. M., De Vrije, T. Non-thermal production of pure hydrogen from biomass: Hyvolution [Text] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2006. – V. 31. – №. 11. – P. 1416-1423.

[132]. Bechara, R., Azizi, F., and Boyadjian, C. (2021). Process simulation and optimization for enhanced biophotolytic hydrogen production from green algae using the sulfur deprivation method. Int. J. Hydrogen Energy 46, 14096–14108. https://doi.org/10. 1016/j.ijhydene.2021.01.115.

[133]. Liu, H., Zhang, Z., Zhang, H., Lee, D. J., Zhang, Q., Lu, C., and He, C. (2020). Evaluation of hydrogen yield potential from Chlorella by photo-fermentation under diverse substrate concentration and enzyme loading. Bioresour. Technol. 303, 122956. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020. 122956.

[134]. Anwar, M., Lou, S., Chen, L., Li, H., and Hu, Z. (2019). Recent advancement and strategy on bio-hydrogen production from photosynthetic microalgae. Bioresour. Technol. 292, 121972. https://doi.org/10. 1016/j.biortech.2019.121972

[135]. Srivastava, N., Hussain, A., Kushwaha, D., Haque, S., Mishra, P., Gupta, V.K., and Srivastava, M. (2021). Nickel ferrite nanoparticles induced improved fungal cellulase production using residual algal biomass and subsequent hydrogen production following dark fermentation. Fuel 304, 121391. https://doi.org/10.1016/j. fuel.2021.121391.

[136]. Rathi, B. & Kumar, P. & Rangasamy, Gayathri. (2023). A Short Review on Current Status and Obstacles in the Sustainable Production of Biohydrogen from Microalgal Species. Molecular Biotechnology. 1-9. 10.1007/s12033-023-00840-w.

[137]. Bolatkhan, K., Kossalbayev, B. D., Zayadan, B. K., Tomo, T., Veziroglu, T. N., Allakhverdiev, S. I., 2019. Hydrogen production from phototrophic microorganisms: Reality and perspectives. Int. J. Hydrogen Energy 44, 5799-5811.

[138]. Ghosh, R., Bhadury, P., Debnath, M., 2017. Characterization and screening of algal strains for sustainable biohydrogen production: primary constraints. In: Singh A., Rathore D. (Eds.), Biohydrogen Production: Sustainability of Current Technology and Future Perspective. Springer, pp. 115-146.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

References:

[1]. INTERNATIONAL ENERGY OUTLOOK 2023. Available at: https://www.eia.gov/outlooks/ieo/ (Accessed 23December 2023).

[2]. Omar, Md & Hasanujzaman, Muhammad. (2023). The role of national culture in renewable energy consumption: Global evidence. Energy Reports. 10. 1765-1784. 10.1016/j.egyr.2023.08.033.

[3]. Bayro-Kaiser, V.; Nelson, N. Microalgal hydrogen production: Prospects of an essential technology for a clean and sustainable energy economy. Photosynth. Res. 2017, 133, 49–62.

[4]. Kanwal, Fariha & Torriero, Angel. (2022). Biohydrogen – A Green Fuel for Sustainable Energy Solutions. Energies. 15. 7783. 10.3390/en15207783.

[5]. Norgate, T. E., Jahanshahi, S., Rankin, W. J., 2007. Assessing the environmental impact of metal production processes. J. Clean. Prod. 15 (8-9), 838-848. https://doi.org/ 10.1016/j.jclepro.2006.06.018.

[6]. Norgate, Terry, Jahanshahi, Sharif, 2011. Reducing the greenhouse gas footprint of primary metal production: Where should the focus be? Miner. Eng. 24 (14), 1563-1570. https://doi.org/10.1016/ j.mineng.2011.08.007.

[7]. Rankin, W. John, 2011. Minerals, metals and sustainability: meeting future material needs. CSIRO Publishing. ISBN 0-643-09726-0.

[8]. Sonter, Laura J., Dade, Marie C., Watson, James E.M., Valenta, Rick K., 2020. Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. Nat. Commun. 11 (1), 4174. https://doi.org/10.1038/ s41467-020-17928-5.

[9]. Luckeneder, Sebastian, Giljum, Stefan, Schaffartzik, Anke, Maus, Victor, Tost, Michael, 2021. Surge in global metal mining threatens vulnerable ecosystems. Glob. Environ. Chang. 69 https:// doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102303.

[10]. El Rasafi, Taoufik, Nouri, Mohamed, Haddioui, Abdelmajid, 2021. Metals in mine wastes: environmental pollution and soil remediation approaches – a review. Geosyst. Eng. 24 (3), 157-172. https:// doi.org/10.1080/12269328.2017.1400474.

[11]. Bardi, Ugo, 2014. Extracted: How the quest for mineral wealth is plundering the planet. Chelsea Green Publishing. ISBN 1-60358-541-9.

[12]. Bhattacharya, M., Churchill, S. A., Paramati, S. R., 2017. The dynamic impact of renewable energy and institutions on economic output and CO_2 emissions across regions. Renew. Energy 111, 157-167.

[13]. Duscha, V., Fougeyrollas, A., Nathani, C., Pfaff, M., Ragwitz, M., Resch, G., Walz, R. – 2016. Renewable energy deployment in europe up to 2030 and the aim of a triple dividend. Energy Policy 95, 314-323.

[14]. Thapar, S., Sharma, S., Verma, A., 2017. Local community as shareholders in clean energy projects: Innovative strategy for accelerating renewable energy deployment in India. Renew. Energy 101, 873-885.

[15]. Wheeler, T.; von Braun, J. Climate change impacts on global food security. Science 2013, 341, 508-513.

[16]. Tai, A. P.; Martin, M. V.; Heald, C. L. Threat to future global food security from climate change and ozone air pollution. Nat. Clim. Chang. – 2014, 4, 817.

[17]. Morya, Raj & Raj, Tirath & Lee, Youngkyu & Pandey, Ashutosh & Kumar, Deepak & Singhania, Reeta & Singh, Saurabh & Verma, Jay & Kim, Sang-Hyoun. (2022). Recent updates in biohydrogen production strategies and life-cycle assessment for sustainable future. – Bioresource Technology. – 366. 128159. 10.1016/ j.biortech.2022.128159.

[18]. Corlett, R. T.; Westcott, D. A. Will plant movements keep up with climate change? – Trends Ecol. Evol. 2013, 28, 482-488.

[19]. Franks, S. J.; Weber, J. J.; Aitken, S. N. Evolutionary and plastic responses to climate change in terrestrial plant populations. – Evol. Appl. – 2014, 7, 123-139.

[20]. Moritz, C.; Agudo, R. The future of species under climate change: Resilience or decline? – Science. – 2013, 341, 504-508.

[21]. Rogelj, Joeri, den Elzen, Michel, Hohne, Niklas, Fransen, Taryn, Fekete, Hanna, Winkler, Harald, Roberto Schaeffer, Fu, Sha, Keywan Riahi, Meinshausen, Malte, 2016. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 C. Nature 534 (7609), 631-639. https://doi.org/10.1038/nature18307.

[22]. Schleussner, Carl-Friedrich, Rogelj, Joeri, Schaeffer, Michiel, Lissner, Tabea, Licker, Rachel, Fischer, Erich M., Knutti, Reto, Levermann, Anders, Frieler, Katja, Hare, William, 2016. Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. – Nature Climate Change 6 (9), 827-835. https:// doi.org/10.1038/ nclimate3096.

[23]. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Connors, S. L., Pean, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekci, O., Yu, R., Zhou, B., 2021. Summary for Policymakers. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Cambridge University Press. Technical report.

[24]. Smith, Christopher J., Forster, Piers M., Allen, Myles, Fuglestvedt, Jan, Millar, Richard J., Rogelj, Joeri, Zickfeld, Kirsten, 2019. 38 Current fossil fuel infrastructure does not yet commit us to 1,5 ^{0}C warming. Nature Commun. 10 (1), 101. https://doi.org/ 10.1038/ s41467-018-07999-w.

[25]. Gielen D., Boshell F., Saygin D., Bazilian M. D., Wagner N., Gorini R. (2019) The role of renewable

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

energy in the global energy transformation. Energ Strat Rev 24:38-50

[26]. Zheng H. Y., Song M. L., Shen Z. Y. (2021). The evolution of renewable energy and its impact on carbon reduction in China. – Energy 237:121639.

[27]. Lanjekar, Pranay & Panwar, N. L. (2023). A Review on Hydrogen Production from Biomass and Commercialization Assessment Through Technology Readiness Levels (TRLs). BioEnergy Research. 1-20. 10.1007/s12155-023-10697-1.

[28]. Chen W. -H., Chong C. T., Thomas S. et al. (2021) Impacts of COVID-19 pandemic on the global energy system and the shift progress to renewable energy: Opportunities, challenges, and policy implications. Energy Policy 154:112322.

[29]. A. C. Lewis Optimising air quality co-benefits in a hydrogen economy: a case for hydrogen-specific standards for NO x emissions. Environ. Sc.: Atmos., 1 (2021), pp. 201-207.

[30]. Vidadili, N.; Suleymanov, E.; Bulut, C.; Mahmudlu, C. Transition to renewable energy and sustainable energy development in azerbaijan. Renew. Sustain. Energy Rev. 2017, 80, 1153-1161.

[31]. Kanwal, F.; Torriero, A. A. J. Biohydrogen – A Green Fuel for Sustainable Energy Solutions. Energies 2022, 15, 7783. https://doi.org/10.3390/en15207783.

[32]. Водород в энергетике: учеб. пособие / Р. В. Радченко, А. С. Мокрушин, В. В. Тюльпа. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 229, [3] с.

[33]. Alagumalai, Avinash & Devarajan, Balaji & Song, Hua & Wongwises, Somchai & Ledesma-Amaro, Rodrigo & Mahian, Omid & Sheremet, Mikhail & Lichtfouse, Eric. (2023). Machine learning in biohydrogen production: a review. Biofuel Research Journal. 10. 1844-1858. 10.18331/BRJ2023.10.2.4.

[34]. -Dailami, Anas & Ahmad, Imran & Iwamoto, Koji & Abdullah, Norhayati & Yuzir, Ali. (2022). Feasibility and viability of procuring biohydrogen from microalgae: An emerging and sustainable energy resource technology. Journal of Physics: Conference Series. 2259. 10.1088/1742-6596/2259/1/012014.

[35]. Kapdan, I. K., Kargi, F., 2006. Bio-hydrogen production from waste materials. Enzyme Microb. Technol. 38(5), 569-582.

[36]. Lewis Oscar, F. L., Vismaya, S., Arunkumar, M., Thajuddin, N., Dhanasekaran, D., Nithya, C., 2016. Algal Nanoparticles: Synthesis and Biotechnological Potentials, in: Thajuddin, N., Dhanasekaran, D. (Eds.). IntechOpen, Rijeka, p. – Ch. 7.

[37]. Nagarajan, D., Lee, D. J., Kondo, A., Chang, J. S., 2017. Recent insights into biohydrogen production by microalgae-from biophotolysis to dark fermentation. Bioresour. – Technol. – 227, 373-387.

[38]. Show, K. Y., Yan, Y., Ling, M., Ye, G., Li, T., Lee, D. J., 2018. Hydrogen production from algal biomass-advances, challenges and prospects. Bioresour. – Technol. 257, 290-300.

[39]. Kumar, G., Mathimani, T., Rene, E. R., Pugazhendhi, A., 2019. Application of nanotechnology in dark fermentation for enhanced biohydrogen production using inorganic nanoparticles. Int. J. Hydrogen Energy. – 44(26), 13106-13113.

[40]. Dawood, F., Anda, M., and Shafiullah, G. M. (2020). Hydrogen Production for Energy: An Overview. Int. J. Hydrogen Energ. 45, 3847-3869. doi:10.1016/ j.ijhydene.2019.12.059.

[41]. Nagarajan, D., Lee, D. -J., Kondo, A., and Chang, J. -S. (2017). Recent Insights into Biohydrogen Production by Microalgae – from Biophotolysis to Dark Fermentation. Bioresour. – Tech. 227, 373-387. doi:10.1016/ j.biortech.2016.12.104

[42]. Abdalla, A. M., Hossain, S., Nisfindy, O. B., Azad, A. T., Dawood, M., and Azad, A. K. (2018). Hydrogen Production, Storage, Transportation and Key Challenges with Applications: A Review. Energ. Convers. Manage. 165, 602-627. doi:10.1016/ j.enconman.2018.03.088

[43]. Das, D., Khanna, N., and Dasgupta, C. N. (2019). Biohydrogen Production: Fundamentals and Technology Advances. Boca Raton: CRC Press.

[44]. Ahmed, Shams & Rafa, Nazifa & Rahman, Md. Mofijur & Badruddin, Irfan & Inayat, Abrar & Ali, Md & Farrok, Omar & T. M., Yunus Khan. (2021). Biohydrogen Production From Biomass Sources: Metabolic Pathways and Economic Analysis. Frontiers in Energy Research. 10.3389/fenrg.2021.753878.

[45]. Demirbas, A. Hydrogen-rich gas from fruit shells via supercritical water extraction. Int. J. Hydrog. – Energy, 2004, 29, 1237-1243.

[46]. Pipitone, G.; Zoppi, G.; Pirone, R.; Bensaid, S. A critical review on catalyst design for aqueous phase reforming. Int. J. Hydrog. – Energy, 2022, 47, 151-180.

[47]. Tak, S. S.; Shetye, O.; Muley, O.; Jaiswal, H.; Malik, S. N. Emerging technologies for hydrogen production from wastewater. Int. J. Hydrog. – Energy, 2022.

[48]. Zoppi, G.; Pipitone, G.; Galletti, C.; Rizzo, A. M.; Chiaramonti, D.; Pirone, R.; Bensaid, S. Aqueous phase reforming of lignin-rich hydrothermal liquefaction by-products: A study on catalyst deactivation. Catal. – Today, 2021, 365, 206-213.

[49]. Rahman, S.; Masdar, M.; Rosli, M.; Majlan, E.; Husaini, T.; Kamarudin, S.; Daud, W. Overview biohydrogen technologies and application in fuel cell technology. Renew. Sustain. Energy Rev. 2016, 66, 137-162.

[50]. Torzillo, G.; Scoma, A.; Faraloni, C.; Giannelli, L. Advances in the biotechnology of hydrogen production with the microalga chlamydomonas reinhardtii. Crit. Rev. Biotechnol. 2015, 35, 485-496.

[51]. Rumpel, S.; Siebel, J. F.; Farès, C.; Duan, J.; Reijerse, E.; Happe, T.; Lubitz, W.; Winkler, M. Enhancing hydrogen production of microalgae by redirecting electrons from photosystem i to hydrogenase.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Energy Environ. Sci. 2014, 7, 3296-3301.

[52]. Osman, Ahmed & Lai, Zhi Ying & Farghali, Mohamed & Yiin, Chung Loong & Elgarahy, Ahmed & Hammad, Ahmed & Ihara, Ikko & Alfatesh, Ahmed & Rooney, David & Yap, Pow Seng. (2023). Optimizing biomass pathways to bioenergy and biochar application in electricity generation, biodiesel production, and biohydrogen production. Environmental Chemistry Letters. 10.1007/s10311-023-01613-2.

[53]. Chen W. H., Lin B. J., Lin Y. Y., Chu Y. S., Ubando A. T., Show P. L., Ong H. C., Chang J. S., Ho S. H., Culaba AB (2021b) Progress in biomass torrefaction: principles, applications and challenges. Prog Energy Combust Sci 82:100887

[54]. Mishra S., Upadhyay R. K. (2021) Review on biomass gasification: gasifiers, gasifying mediums, and operational parameters. Mater Sci Energy Technol 4:329-340

[55]. Sajid M., Raheem A., Ullah N., Asim M., Rehman M. S. U., Ali N. (2022). Gasification of municipal solid waste: progress, challenges, and prospects. Renew Sustain Energy Rev 168:112815

[56]. Li B., Mbeugang C. F. M., Huang Y., Liu D., Wang Q., Zhang S. J. E. (2022) A review of CaO based catalysts for tar removal during biomass gasification. Energy. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022. 123172.

[57]. Bundhoo, M. Z.; Mohee, R. Inhibition of dark fermentative bio-hydrogen production: A review. Int. J. Hydrog. Energy 2016, 41, 6713-6733.

[58]. Ghimire, A.; Frunzo, L.; Pirozzi, F.; Trably, E.; Escudie, R.; Lens, P. N.; Esposito, G. A review on dark fermentative biohydrogen production from organic biomass: Process parameters and use of by-products. Appl. Energy 2015, 144, 73-95.

[59]. Liu, H.; Hu, H.; Chignell, J.; Fan, Y. Microbial electrolysis: Novel technology for hydrogen production from biomass. Biofuels 2010, 1, 129-142.

[60]. Srivastava, R. K., Shetti, N. P., Reddy, K. R., Aminabhavi, T. M., 2020. Biofuels, biodiesel and biohydrogen production using bioprocesses. a review. Environ. Chem. Lett. 18, 1049-1072.

[61]. Demirbas, A., 2009. Biofuels from agricultural biomass. Energy Sources, Part A. 31(17), 1573-1582.

[62]. Kasiteropoulou, Dorothy & Metsoviti, M & Papadopoulou, Katerina & Gougoulias, Nikolaos & Mpesios, Anastasios & Ntoufas, L & Spiliotis, Xenofon & Papapolymerou, George. (2021). USE OF ANAEROBIC DIGESTRATE FROM BIOGAS PLANT EFFLUENTS AND GLYCEROL AS RAW MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF BIOMASS AND BIOENERGY.

[63]. Meshcheryakova K. A., Politaeva N. A., Oparina A. M., Zibarev N. V. Global trends in the field of energy production from biomass. *Nedelya nauki ISI: Sbornik materialov Vserossijskoj konferencii, Sankt-Peterburg, 03-09 aprelya 2023 goda* [ISI Science Week: Collection of materials of the All-Russian Conference, St. Petersburg, 03-09 April 2023], 2023, pp. 251-253 (in Russian).

[64]. Politaeva, Natalia & Smyatskaya, Yulia & Alafif, Rafat & Pfeifer, Christoph & Mukhametova, Liliya. (2020). Development of Full-Cycle Utilization of Chlorella sorokiniana Microalgae Biomass for Environmental and Food Purposes. Energies. 13. 2648. 10.3390/en13102648.

[65]. Rudras Baliga. Sustainable Algae Biodiesel Production in Cold Climates / Rudras Baliga, Susan E. Powers. // International Journal of Chemical Engineering. – 2010. – Vol.2010. Article ID 102179. – 13 p.

[66]. Kothari, R.; Pandey, A. K.; Ahmad, S.; Kumar, A.; Pathak, V. V.; Tyagi, V. V. Microalgal cultivation for value-added products: A critical enviro-economical assessment. – 3 Biotech, 2017, 7, 243.

[67]. Tao, J.; Ge, Y.; Liang, R.; Sun, Y.; Cheng, Z.; Yan, B.; Chen, G. Technologies integration towards bio-fuels production: A state-of-the-art review. Appl. Energy Combust. Sci. 2022, 10, 100070.

[68]. Osman A. I., Chen L., Yang M., Msigwa G., Farghali M., Fawzy S., Rooney D. W., Yap P. -S. (2022a) Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. Environ Chem Lett 21:741-764. https://doi.org/10.1007/ s10311-022-01532-8

[69]. Osman A. I., Farghali M., Ihara I., Elgarahy A. M., Ayyad A., Mehta N., Ng K. H., Abd El-Monaem E. M., Eltaweil A. S., Hosny M., Hamed S. M., Fawzy S., Yap P. -S., Rooney D. W. (2023) Materials, fuels, upgrading, economy, and life cycle assessment of the pyrolysis of algal and lignocellulosic biomass: a review. Environ Chem Lett 21:1419-1476. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01573-7

[70]. Sengmee D., Cheirsilp B., Suksaroge T. T., Prasertsan P. Biophotolysis-based hydrogen and lipid production by oleaginous microalgae using crude glycerol as exogenous carbon source. Int J Hydrog Energy. – 2017; 42:1970-6. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.089.

[71]. Oncel S., Kose A. Comparison of tubular and panel type photobioreactors for biohydrogen production utilizing Chlamydomonas reinhardtii considering mixing time and light intensity. Bioresour Technol. – 2014; 151:265-70. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.076.

[72]. Giannelli L., Torzillo G. Hydrogen production with the microalga Chlamydomonas reinhardtii grown in a compact tubular photobioreactor immersed in a scattering light nanoparticle suspension. Int J Hydrog Energy. – 2012; 37:16951-61. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.08.103.

[73]. Velmozhina, K.; Shinkevich, P.; Zhazhkov, V.; Politaeva, N.; Korablev, V.; Vladimirov, I.; Morales, T. C. Production of Biohydrogen from Microalgae Biomass after Wastewater Treatment and Air Purification from CO_2. – Processes, 2023, 11, 2978. https://doi.org/10.3390/pr11102978.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

[74]. Ivanova P. V., Natal'ina A. A. Microalgae as an alternative fuel source. *Molodoj uchenyj* [A young scientist], 2020, no. 22 (312), pp. 591-594 (in Russian).

[75]. Borowiak, Daniel & Krzywonos, Małgorzata. (2022). Bioenergy, Biofuels, Lipids and Pigments-Research Trends in the Use of Microalgae Grown in Photobioreactors. – Energies. 15. 5357. 10.3390/en15155357.

[76]. Muhammad, G., Alam, M. A., Mofijur, M., Jahirul, M. I., Lv, Y., Xiong, W., et al. (2021). Modern Developmental Aspects in the Field of Economical Harvesting and Biodiesel Production from Microalgae Biomass. Renew. Sust. Energ. Rev. 135, 110209. doi:10.1016/j.rser.2020.110209

[77]. Pignolet, O.; Jubeau, S.; Vaca-Garcia, C.; Michaud, P. Highly valuable microalgae: Biochemical and topological aspects. J. Ind. Microbiol. Biotechnol. – 2013, 40, 781-796.

[78]. Velmozhina K. A., Shinkevich P. S. The use of Chlorella kessleri microalgae for the intensification of anaerobic digestion of food waste. *Tekhnologii pererabotki othodov s polucheniem novoj produkcii* [Waste recycling technologies with the production of new products], 2022, no. 4, pp. 183-184 (in Russian).

[79]. Zibarev N. V., Politaeva N. A., Molodkina L. M. Production of biodiesel from microalgae by transesterification of biomass. *Butlerovskie soobshcheniya* [Butler's messages], 2023, Vol. 73, no. 1, pp. 101-108 (in Russian).

[80]. Velmozhina, K.; Shinkevich, P.; Zhazhkov, V.; Politaeva, N.; Korablev, V.; Vladimirov, I.; Morales, T. C. Production of Biohydrogen from Microalgae Biomass after Wastewater Treatment and Air Purification from CO_2. – Processes, 2023, 11, 2978. https://doi.org/10.3390/pr11102978.

[81]. Gaffron H., Rubin J. 1942 Fermentative and photochemical production of hydrogen in algae The Journal of General Physiology, 26(2), 219-40.

[82]. Bartels J. R., Pate M. B., Olson N. K. (2010). An economic survey of hydrogen production from conventional and alternative energy sources. Int. J. Hydrogen Energy 35:8371-8384. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.035

[83]. Benemann, J. R. Hydrogen and methane production through microbial photosynthesis. In Living Systems as Energy Converters; Elsevier/North-Holland Biomedical Press: Amsterdam, The Netherlands, 1977; pp. 285-298.

[84]. Bhatia S. K., Jagtap S. S., Bedekar A. A., Bhatia R. K., Rajendran K., Pugazhendhi A., Rao C. V., Atabani A., Kumar G., Yang Y. -H. (2021) Renewable biohydrogen production from lignocellulosic biomass using fermentation and integration of systems with other energy generation technologies. Sci Total Environ 765:144429.

[85]. Saravanan A., Kumar P. S., Aron N. S., Jeevanantham S., Karishma S., Yaashikaa P., Chew K. W., Show PL (2022a). A review on bioconversion processes for hydrogen production from agroindustrial residues. Int J Hydrog Energy 47(88):37302-37320.

[86]. Benemann, J. Hydrogen biotechnology: Progress and prospects. – Nat. Biotechnol. – 1996, 14, 1101-1103.

[87]. Benemann, J. R. Hydrogen production by microalgae. J. Appl. Phycol. – 2000, 12, 291-300.

[88]. Nath, K.; Das, D. Improvement of fermentative hydrogen production: Various approaches. Appl. Microbiol. Biotechnol. – 2004, 65, 520-529.

[89]. Huesemann, M. H.; Benemann, J. R. Biofuels from Microalgae: Review of Products, Processes and Potential, with Special Focus on Dunaliella sp. In The Alga Dunaliella; CRC Press: London, UK, 2009; pp. 445-474.

[90]. S. N. A. Rahman et al. Overview biohydrogen technologies and application in fuel cell technology, Renew. Sustain. – Energy Rev. 66, 137-162 (2016).

[91]. Melitos, George & Voulkopoulos, Xenofon Michail & Zabaniotou, Anastasia. (2021). Waste to Sustainable Biohydrogen Production Via Photo-Fermentation and Biophotolysis − A Systematic Review. Renewable Energy and Environmental Sustainability. 6. 45. 10.1051/rees/2021047.

[92]. Sasikala K., Ramana C. V., Raghuveer Rao P. (1991) Environmental regulation for optimal biomass yield and photoproduction of hydrogen by Rhodobacter sphaeroides O. U. 001. Int J Hydrogen Energy 16:597-601. https://doi.org/10.1016/0360- 3199(91)90082-T.

[93]. Barbosa M. J., Rocha J. M. S., Tramper J., Wijfels R. H. (2001) Acetate as a carbon source for hydrogen production by photosynthetic bacteria. J Biotechnol 85:25-33. https://doi.org/10.1016/ S0168-1656(00)00368-0.

[94]. Kothari R., Singh D. P., Tyagi V. V., Tyagi S. K. (2012) Fermentative hydrogen production – an alternative clean energy source. Renew Sustain Energy Rev 16:2337–2346. https://doi.org/10.1016/j.rser. 2012.01.002.

[95]. Sallam, E. R.; Khairy, H. M.; Elshobary, M.; Fetouh, H. A. Application of algae for hydrogen generation and utilization. In Handbook of Research on Algae as a Sustainable Solution for Food, Energy, and the Environment; El-Sheekh, M. M., Abdullah, N., Ahmad, I., Eds.; IGI Global: Hershey, PA, USA, 2022; pp. 354-378.

[96]. Martínez, V. L.; Salierno, G. L.; García, R. E.; Lavorante, M. J.; Galvagno, M. A.; Cassanello, M. C. Biological Hydrogen Production by Dark Fermentation in a Stirred Tank Reactor and Its Correlation with the pH Time Evolution. Catalysts 2022, 12, 1366.

[97]. Dincer I., Acar C. (2016) Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. International Scientifc Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE) 2495:14-36 https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.11-12.014-036.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

[98]. Ubando, A. T.; Chen, W. -H.; Hurt, D. A.; Conversion, A.; Rajendran, S.; Lin, S. -L. Biohydrogen in a circular bioeconomy: A critical review. Bioresour. Technol. 2022, 366, 128168.

[99]. Jim´enez-Llanos, J., Ramírez-Carmona, M., Rendon-Castrill ´on, ´L., Ocampo-Lopez, ´C., 2020. Sustainable biohydrogen production by Chlorella sp. microalgae: A review. Int. J. Hydrogen Energy 45, 8310–8328.

[100]. Mishra P., Krishnan S., Rana S., Singh L., Sakinah M., Ab Wahid Z. (2019) Outlook of fermentative hydrogen production techniques: an overview of dark, photo and integrated dark-photo fermentative approach to biomass. Energ Strat Rev 24:27–37.

[101]. Brindhadevi K., Shanmuganathan R., Pugazhendhi A., Gunasekar P., Manigandan S. (2021) Biohydrogen production using horizontal and vertical continuous stirred tank reactor-a numerical optimization. Int J Hydrog Energy 46(20):11305–11312

[102]. Chen H., Wu J., Huang R., Zhang W., He W., Deng Z., Han Y., Xiao B., Luo H., Qu W. J. C. (2022a) Effects of temperature and total solid content on biohydrogen production from dark fermentation of rice straw: Performance and microbial community characteristics. Chemosphere 286:131655.

[103]. Ziara R. M., Miller D. N., Subbiah J., Dvorak B. I. (2019) Lactate wastewater dark fermentation: the effect of temperature and initial pH on biohydrogen production and microbial community. Int J Hydrog Energy 44(2):661–673.

[104]. Gorgec F. K., Karapinar I. (2019) Biohydrogen production from hydrolyzed waste wheat by dark fermentation in a continuously operated packed bed reactor: the effect of hydraulic retention time. Int J Hydrog Energy 44(1):136–143.

[105]. Rambabu K., Bharath G., Banat F., Hai A., Show P. L. (2021) Ferric oxide/date seed activated carbon nanocomposites mediated dark fermentation of date fruit wastes for enriched biohydrogen production. Int J Hydrog Energy 46(31):16631–16643.

[106]. Politaeva, N.; Ilin, I.; Velmozhina, K.; Shinkevich, P. Carbon Dioxide Utilization Using Chlorella microalgae. Environments 2023, 10, 109.

[107]. Zibarev, N. V.; Politaeva, N. A.; Andrianova, M. Y. Use of Chlorella sorokiniana (Chlorellaceae, Chlorellales) Microalgae for Purification of Brewing-Industry Wastewaters. Biol. Bull. – 2022, 49, 1776-1780.

[108]. Zibarev, N. V.; Zhazhkov, V. V.; Andrianova, M. Y.; Politaeva, N. A. Integrated use of microalgae in wastewater treatment and waste recycling food industry. Ecol. Ind. Russ. – 2021, 25, 18-23.

[109]. Xia, A., Cheng, J., Ding, L., Lin, R., Huang, R., Zhou, J., Cen, K., 2013a. Improvement of the energy conversion efficiency of Chlorella pyrenoidosa biomass by a three-stage process comprising dark fermentation, photofermentation, and methanogenesis. Bioresour. – Technol. – 146, 436-443.

[110]. Cheng, J., Liu, Y., Lin, R., Xia, A., Zhou, J., Cen, K., 2014. Cogeneration of hydrogen and methane from the pretreated biomass of algae bloom in Taihu Lake. Int. J. Hydrogen Energy 39, 18793-18802.

[111]. Xia, A., Cheng, J., Lin, R., Lu, H., Zhou, J., Cen, K., 2013b. Comparison in dark hydrogen fermentation followed by photo hydrogen fermentation and methanogenesis between protein and carbohydrate compositions in Nannochloropsis oceanica biomass. Bioresour. – Technol. 138, 204-213.

[112]. Melitos, George & Voulkopoulos, Xenofon Michail & Zabaniotou, Anastasia. (2021). Waste to Sustainable Biohydrogen Production Via Photo-Fermentation and Biophotolysis − A Systematic Review. Renewable Energy and Environmental Sustainability. 6. 45. 10.1051/rees/2021047.

[113]. S. Anto et al. Algae as green energy reserve: technological outlook on biofuel production, Chemosphere 242, 125079 (2020).

[114]. S. N. A. Rahman et al. Overview biohydrogen technologies and application in fuel cell technology, Renew. Sustain. – Energy Rev. 66, 137-162 (2016).

[115]. S. Mona et al. Green technology for sustainable biohydrogen production (waste to energy): a review, Sci. Total Environ. 728, 138481 (2020).

[116]. Bozieva A. M., Zadneprovskaya E. V., Allahverdiev S. I. Production of biohydrogen: recent achievements and current state. *Global'naya energiya* [Global energy], 2022, Vol. 28, no. 4, pp. 59-78 (in Russian).

[117]. Kadier, A., Kalil, M. S., Chandrasekhar, K., Mohanakrishna, G., Saratale, G. D., Saratale, R. G., et al. (2018). Surpassing the Current Limitations of High Purity H_2 Production in Microbial Electrolysis Cell (MECs): Strategies for Inhibiting Growth of Methanogens. Bioelectrochemistry. Bioelectrochemistry 119, 211-219. doi:10.1016/j.bioelechem.2017.09.014

[118]. El-Dalatony, M. M., Zheng, Y., Ji, M. -K., Li, X., and Salama, E. -S. (2020). Metabolic Pathways for Microalgal Biohydrogen Production: Current Progress and Future Prospectives. Bioresour. – Tech. 318, 124253. doi:10.1016/j.biortech.2020.124253

[119]. Markov S. A., Protasov E. S., Bybin V. A., Stom D. I. Production of hydrogen with the help of microorganisms and microbial fuel cells based on the utilization of waste water ingredients and various wastes. – *AEE* [AE], 2013, no. 1-2 (118) (in Russian).

[120]. Liu H., Grots S. and Logan B. Electrochemically Assisted microbial production of hydrogen from acetate // Environ. Sci. – Technol. – 2005. – Vol. 39. – P. 4317-4320.

[121]. Hosseinzadeh, A.; Zhou, J. L.; Li, X.; Afsari, M.; Altaee. A. Techno-economic and environmental impact assessment of hydrogen production processes using bio-waste as renewable energy resource. Renew. Sustain. Energy Rev. – 2022, 156, 111991.

[122]. Lee, H. -S.; Xin, W.; Katakojwala, R.; Mohan,

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

S. V.; Tabish, N. M. D. Microbial electrolysis cells for the production of biohydrogen in dark fermentation – A review. Bioresour. – Technol. – 2022, 363, 127934.

[123]. Mathews, J., Wang, G., 2009. Metabolic pathway engineering for enhanced biohydrogen production. – Int. J. Hydrogen Energy 34, 7404-7416.

[124]. Show, K. Y., Yan, Y., Ling, M., Ye, G., Li, T., Lee, D. J., 2018. Hydrogen production from algal biomass – advances, challenges and prospects. Bioresour. – Technol. 257, 290-300.

[125]. Chien, L. F., Kuo, T. T., Liu, B. H., Lin, H. D., Feng, T. Y., Huang, C. C., 2012. Solar-to-bioH_2 production enhanced by homologous overexpression of hydrogenase in green alga Chlorella sp. DT. Int. – J. Hydrogen Energy 37, 17738-17748.

[126]. Oey, M., Sawyer, A. L., Ross, I. L., Hankamer, B., 2016. Challenges and opportunities for hydrogen production from microalgae. – Plant Biotechnol. – J. 14, 1487-1499.

[127]. Polle, J. E. W., Kanakagiri, S. D., Melis, A., 2003. Tla1, a DNA insertional transformant of the green alga Chlamydomonas reinhardtii with a truncated light-harvesting chlorophyll antenna size. – Planta 217, 49-59.

[128]. Al-Dailami, Anas & Ahmad, Imran & Iwamoto, Koji & Abdullah, Norhayati & Yuzir, Ali. (2022). Feasibility and viability of procuring biohydrogen from microalgae: An emerging and sustainable energy resource technology. Journal of Physics: Conference Series. 2259. 10.1088/1742-6596/2259/1/012014.

[129]. Karthik, Obuli & Goswami, Rahul Kumar & Verma, Pradeep. (2021). Advanced microalgae-based renewable biohydrogen production systems: A review. Bioresource Technology. 320. 124301. 10.1016/j.biortech.2020.124301.

[130]. Sadraddinova E. R. Microbial processing of cellulose-containing organic raw materials into hydrogen. *Extended abstract of candidate's thesis.* – Moscow, 2010, 115 p. (in Russian).

[131]. Claassen, P. A. M., De Vrije, T. Non-thermal production of pure hydrogen from biomass: Hyvolution [Text] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2006. – V. 31. – №. 11. – P. 1416-1423.

[132]. Bechara, R., Azizi, F., and Boyadjian, C. (2021). Process simulation and optimization for enhanced biophotolytic hydrogen production from green algae using the sulfur deprivation method. – Int. J. Hydrogen Energy 46, 14096-14108. https://doi.org/10. 1016/j.ijhydene.2021.01.115.

[133]. Liu, H., Zhang, Z., Zhang, H., Lee, D. J., Zhang, Q., Lu, C., and He, C. (2020). Evaluation of hydrogen yield potential from Chlorella by photo-fermentation under diverse substrate concentration and enzyme loading. – Bioresour. Technol. 303, 122956. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020. 122956.

[134]. Anwar, M., Lou, S., Chen, L., Li, H., and Hu, Z. (2019). Recent advancement and strategy on bio-hydrogen production from photosynthetic microalgae. – Bioresour. Technol. 292, 121972. https://doi.org/10. 1016/j.biortech.2019.121972

[135]. Srivastava, N., Hussain, A., Kushwaha, D., Haque, S., Mishra, P., Gupta, V. K., and Srivastava, M. (2021). Nickel ferrite nanoparticles induced improved fungal cellulase production using residual algal biomass and subsequent hydrogen production following dark fermentation. – Fuel 304, 121391. https://doi.org/10.1016/j. fuel.2021.121391.

[136]. Rathi, B. & Kumar, P. & Rangasamy, Gayathri. (2023). A Short Review on Current Status and Obstacles in the Sustainable Production of Biohydrogen from Microalgal Species. Molecular Biotechnology. 1-9. 10.1007/s12033-023-00840-w.

[137]. Bolatkhan, K., Kossalbayev, B. D., Zayadan, B. K., Tomo, T., Veziroglu, T. N., Allakhverdiev, S. I., 2019. Hydrogen production from phototrophic microorganisms: Reality and perspectives. – Int. J. Hydrogen Energy 44, 5799-5811.

[138]. Ghosh, R., Bhadury, P., Debnath, M., 2017. Characterization and screening of algal strains for sustainable biohydrogen production: primary constraints. In: Singh A., Rathore D. (Eds.), Biohydrogen Production: Sustainability of Current Technology and Future Perspective. Springer, pp. 115-146.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА RENEWABLE ENERGY

МАЛАЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

SMALL HYDROENERGETICS

Статья поступила в редакцию 12.02.24 Ред. Рег. № 001-002-24 The article has entered in publishing office 12.02.24 Ed. Reg. No. 001-002-24

УДК 621.31

ORCID 0009-0004-7849-8918

RESEARCH ON THE USE OF ASYNCHRONOUS MACHINE IN GENERATOR MODE IN MICROHYDROELECTRIC PLANTS OF A RENEWABLE ALTERNATIVE ENERGY SOURCE DEVICE

Pirmatov N. B.[1], Matkosimov M. M.[2], Mahamadzhanov S. Yu[3].

[1]Corresponding Author: Depte of Tashkent State Technical University, Uzbekistan, muhammadsodiqmatqosimov@gmail.com

[2]Dept. Electrotechnical electromexanical electrotexnologias Andijan Machine building Institute. Uzbekistan, muhammadsodiqmatqosimov@gmail.com

[3]Dept. Andijan Machine building Institute, Uzbekistan, s.mahamadjonov@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.079-085

Referred: 15.02.24 Received in revised form: 28.02.24 Accepted: 29.02.24

This article considers the use of a short-circuit rotor asynchronous motor in mini and micro HPP switching to generator mode in the case where the capacitor elements are connected to the stator coil in order to provide reactive power. The main purpose of using an asynchronous motor in generator mode is as follows:

- Low cost of asynchronous motor;
- Ease of operation work;
- Permanent immutable vine source consumption not to do;
- Ease of holding the frequency in one norm;
- Length of working life.

To operate an asynchronous motor in generator mode, it is required to provide mechanical energy to the shaft of the motor at a speed greater than the nominal rotation of its motor (5 %), while it is necessary to use it by connecting the capacitor elements of the required capacity to the stator coil for reactive power consumption of the motor. It is important to select correctly the capacitance of the capacitor elements, incorrectly selected capacitor elements can negatively affect the quality indicators of the electricity being produced. At the time when current demand for electricity is increasing constantly, the production of quality and affordable electricity using renewable energy sources wisely due to the dwindling natural energy resources is one of the pressing issues therefore, this article considers measures for using an asynchronous motor in generator mode, gives the necessary data and conclusions. The use of an asynchronous generator in relation to a synchronous generator in mini and micro HPP leads us to reduce the cost of electricity therefore, the research work carried out is relevant [1-3].

Keywords: asynchronous motor, asynchronous generator, stator, frequency, magnetic field, capacitor, slip, reactive power, lead, rotor [1-3-7-8].

Пирматов Н. Б., Маткосимов М. М., Махамаджанов С. Ю. Исследование по использованию асинхронной машины в генераторе, изготовленном на микрогидроэлектростанциях из возобновляемого альтернативного источника энергии // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 02 (419) 2024, с. 79-85

Pirmatov N. B., Matkosimov M. M., Mahamadzhanov S. Yu. Research on the use of asynchronous machine in generator mode in microhydroelectric plants of a renewable alternative energy source device // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 02 (419) 2024, pp. 79-85

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ В ГЕНЕРАТОРЕ, ИЗГОТОВЛЕННОМ НА МИКРОГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ ИЗ ВОЗОБНОВЛЯЕМОГО АЛЬТЕРНАТИВНОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ

Пирматов Н. Б.[1], Маткосимов М. М.[2], Махамаджанов С. Ю.[3]

[1]Автор-корреспондент – кафедра Ташкентского государственного технического университета, Узбекистан, muhammadsodiqmatqosimov@gmail.com

[2]Кафедра электротехнических электромеханических электротехнологий

Андижанский машиностроительный институт, Узбекистан, muhammadsodiqmatqosimov@gmail.com

[3]Кафедра Андижанского машиностроительного института, Узбекистан, s.mahamadjonov@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.079-85

Заключение совета рецензентов: 15.02.24 Заключение совета экспертов: 28.02.24 Принято к публикации: 29.02.24

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

В данной статье рассматривается применение асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при переключении мини- и микро ГЭС в генераторный режим в случае, когда конденсаторные элементы подключены к обмотке статора для обеспечения реактивной мощности. Основная цель использования асинхронного двигателя в генераторном режиме заключается в следующем:

- Низкая стоимость асинхронного двигателя;
- Простота в эксплуатации;
- Не требуется постоянное потребление постоянного источника питания;
- Простота поддержания частоты в пределах одной нормы;
- Длительный срок службы.

Для работы асинхронного двигателя в режиме генератора требуется подавать механическую энергию на вал двигателя со скоростью, превышающей номинальное вращение его двигателя (на 5 %), при этом необходимо использовать ее, подключив конденсаторные элементы требуемой емкости к обмотке статора для реактивного потребляемая мощность двигателя. Важно правильно подобрать емкость конденсаторных элементов, неправильно подобранные конденсаторные элементы могут негативно сказаться на качественных показателях вырабатываемой электроэнергии. В то время, когда текущий спрос на электроэнергию постоянно растет, производство качественной и доступной электроэнергии с разумным использованием возобновляемых источников энергии из-за истощающихся природных энергетических ресурсов является одним из актуальных вопросов, поэтому в данной статье рассматриваются меры по использованию асинхронного двигателя в режиме генератора, приводятся необходимые данные и выводы. Использование асинхронного генератора по сравнению с синхронным генератором в мини- и микро-ГЭС позволяет снизить затраты на электроэнергию, поэтому проведенная исследовательская работа является актуальной [1-3].

Ключевые слова: асинхронный двигатель, асинхронный генератор, статор, частота, магнитное поле, конденсатор, проскальзывание, реактивная мощность, вывод, ротор [1-3-7-8].

Pirmatov Nurali Berdiyarovich

Professor of Tashkent State Technical University

Пирматов Нурали Бердиярович

Профессор Ташкентского государственного технического университета

Matkosimov Muhammadsadiq Mahammadhoshim o‘g‘li

Doctoral student of Andijan Institute of Mechanical Engineering

Маткосимов Мухаммадсадик Махаммадхошим о’гли

Докторант Андижанского машиностроительного института

Mahamadzhanov Sadigjon Yudashboy o‘g‘li

Doctoral student of Andijan Institute of Mechanical Engineering

Махамаджанов Садыгжон Юдашбой о’г’ли

Докторант Андижанского машиностроительного института

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

1. Introduction

Taking into account the growing demand for energy now, measures have been taken to rationally use hydropower resources in this case, taking into account the fact that 14 % of hydropower has been mastered in the Republic of Uzbekistan. Asynchronous generators were used in mini-and micro-hydroelectric power plants to provide electricity to remote and remote areas of our country and to deliver quality electricity to the population [9].

1	HPP	micro-hydroelectric power plants

2. RESEARCH ON THE USE OF ASYNCHRONOUS MACHINE IN GENERATOR MODE IN MICROHYDROELECTRIC PLANTS OF A RENEWABLE ALTERNATIVE ENERGY SOURCE DEVICE

2.1 brief overview of asynchronous motor

Asynchronous machine, like other electric machines, According to the reversion property of electric machines discovered by the E. Lens, it can work in motor mode as well as in generator mode. In terms of constructive execution, the asynchronous generator is no different from the asynchronous motor. To switch from motor mode to generator mode, the stator coil is connected to the grid using a primary motor to rotate the rotor of the asynchronous machine to the rotating side of the stator field, making the rotation frequency greater than the field rotation frequency $(n > n_1)$ in this case, the slip of the machine will have a negative signal [1-5].

$$\left(-s = \frac{n_1 - n}{n_1}\right) \quad (1)$$

2.2 Use of asynchronous motor at generator mode

To operate an asynchronous motor in generator mode, mechanical energy is supplied to the motor shaft at a speed (5÷10) % higher than the nominal speed of rotation of the motor. I_n Practice, the asynchronous generator has a normal operating mode $(-s) \leq (6 \div 8)\ \%$. I_n Asynchronous machine generator mode, the conductors of the stator and rotor windings intersect in the opposite direction, as if with a circular field I_n motor mode, these conductors intersect in a suitable direction. I_n order for us to operate an asynchronous motor I_n generator mode, a capacitor connection to the stator circuit of the motor is required, since the asynchronous motor must consume reactive power to generate a magnetic field in the stator windings in this case, we definitely need a capacitor [3-7].

2.3 Selection and connection scheme of capacitor elements

Depending on the power of the asynchronous motor, the selected capacitor is connected in accordance with the stator windings of the motor (Figure 1), and if the asynchronous motor shaft is given mechanical energy at a speed greater than the nominal speed, the slip becomes negative and the asynchronous motor begins to operate in the generator mode and produces electrical energy. Choosing a capacitor to match the power of the motor is considered critical, with an incorrectly selected capacitor showing a negative effect (reduction or increase in voltage and frequency from the nominal value) on the parameters of the electricity the generator is producing. Currently, the use of an asynchronous generator in mini and micro HPP is considered very useful because no additional fixed current source is required to excite an asynchronous generator this leads to a decrease in the cost of electrical energy being produced [5-7].

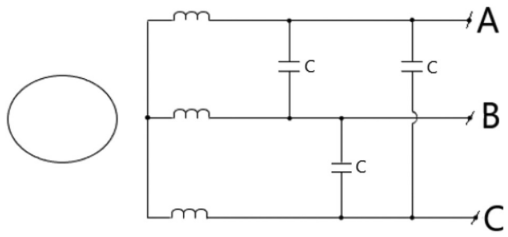


Fig. 1. Scheme of operation of an asynchronous motor in generator mode
Рис. 1. Схема работы асинхронного двигателя в режиме генератора

3. Excitation asynchronous generator equation via capacitor

The equations of alternating current machines, which represent connections between currents and voltages, belong to one phase. The incoming resistances to it are divided by the nature of the formation into active tempering and conducting material sizes, inductively variable power-conducting power types. The magnetic field of the generator mode asynchronous machine is stator relatively straight and rotates inversely with respect to the rotor. Therefore, E_1 and the rotating magnetic fields induced in the E_2 stator and rotor windings are located in opposite phases. Altered magnetic currents cause power-conducting power in the car's windings, which prevents the change in current, that is, it is resisted by the so called inductive. I_n Accordance with the established classification of magnetic field components, machines are distinguished: X_m mutual inductive resistance, with conditional primary magnetic current; X_1 inductive scattering resistance caused by the scattering current of primary particles; X_1 inductive scattering resistance caused by the scattering current of secondary particles.

Listed inductive resistances. Depending on the inductions of the corresponding contours, is represented by equality:

The text must include a citation of each figure and table.

Letters in the figure should be large enough to be readily legible when the drawing is reduced. Do not forget to include the label, unit for each axis and the legend when they are required.

$$\left.\begin{aligned} x_m &= \omega_1 M \\ x_1 &= \omega_1 L_{\sigma 1} \\ x_2 &= \omega_1 L_{\sigma 2} \end{aligned}\right\} ; \qquad (2)$$

$\omega_1 = 2\pi f_1$ angular voltage frequency; m mutual induction coefficient.

The net or synchronous inductive resistance of the Stator and quoted rotor windings is equal to

$$\left.\begin{aligned} X_1 &= x_m + x_1 \\ X_2 &= x_m + x_2 \end{aligned}\right\} ; \qquad (3)$$

$$\left.\begin{aligned} X_1 &= \omega_1 L_1 \\ X_2 &= \omega_1 L_2 \end{aligned}\right\} ; \qquad (4)$$

Where L_1 is the full or private inductance of the stator windings, L_2 is the same, the quoted rotor is the full or private inductance [2-4].

The magnetic field of the generator mode asynchronous machine is stator relatively straight and rotates inversely with respect to the rotor. Therefore, E_1 and the rotating magnetic fields induced in the E_2 stator and rotor windings are located in opposite phases [6].

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

4. Experimental Verification

4.1 Vector diagram and work characteristics of an asynchronous generator

In the asynchronous machine generator mode, the conductors of the stator and rotor worm intersect in the opposite direction, as if with a circular field.

Therefore, in the vector E_{2S} diagram of the generator, the directions of the vectors (hence also E_{2S}) and E_1 must be conditionally put in the inverse phase.

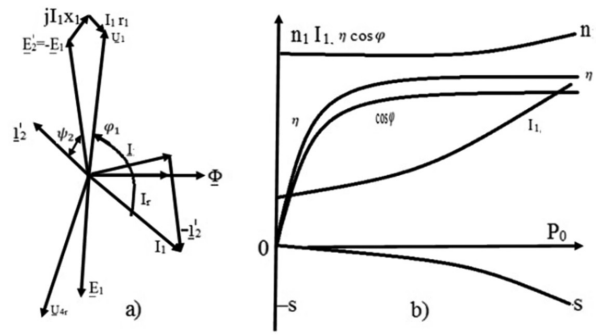


Fig. 2. Vector diagram of an asynchronous Generator a) and b)work characteristics

Рис. 2. Векторная диаграмма асинхронного генератора а) и б) рабочие характеристики

The rotor current changes the signal of the active organizer I_2 itself, changes the signal of the electromagnetic moment, which means that it is the brakin g moment, the reactive organizer retains its signal of the $I_2 A$, as in the motor mode, the machine receives a magnetic current from the network to generate a magnetic field [7-9].

The vector diagram of the asynchronous generator is shown in Figure 2, a. From this it follows that in the generator mode the angle $\frac{\varphi_1 > \pi}{2}$ and so that

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 cos\varphi_1 < 0$$

This indicates that the active power is fed into the network rather than consumed. U_n a vector diagram, the stator current is found from the equilibrium equation of asynchronous machine currents in the I_1 system of equations, i.e.:

$$I_1 = I_0 + (-I_1') ; \quad (5)$$

Voltage U_1 is also determined from the equilibrium equation of voltage and electrically conducting forces, i.e.:

$$U_1 = -E_1 + jI_1 x_1 + I_1 r_1 . \quad (6)$$

The vector U_1 represents the network voltage. The vector of the generator voltage balancing the network voltage will have the opposite direction U_{1G}, i.e.

$$U_{1G} = U_1$$

Adjusting the active power that the generator gives to the network is achieved by changing the angular velocity of the rotor. The work characteristics of an asynchronous generator (Figure 2, b) can be constructed by identifying them from a circular diagram or switching circuit. With an increase in load, the rotation frequency of the rotor N is increased to make the voltage

$$U_{1G} = const.$$

4.2 Tables

Table 1
Таблица 1

Rotation frequency; %	Rotation frequenc Ayl / daq	Line voltage; V			Frequency; Hz
ng.r – 5 %	988	AB 329	BC 329	CA 329	F = 44
ng.r	1040	AB 380	BC 380	CA 380	F = 50
ng.r + 5 %	1092	AB 424	BC 424	CA 424	F = 54

When we used an asynchronous motor with a power of 7500 W, a rotation speed of 1000 rpm in generator mode, the following results were obtained (Table 1).

As we can see above, the asynchronous motor began to generate electrical energy by generating in motor generator mode when we gave mechanical energy to the motor shaft at a speed 4 % higher than the frequency of nominal revolutions n = 1000 rpm, and since the quality indicators of electrical energy (voltage and frequency) were in the nominal values range, the generator worked [8].

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

5. Conclusion

Summing up, it can be said that in mini and micro HPP, synchronous generators were initially used, which caused several inconveniences, including the consumption of constantly constant current sources and the cost of the cost of using asynchronous generators in micro HPP, taking into account these disadvantages, we can say that the use of asynchronous generators in micro HPP is one. Electricity using asynchronous generators has advantages over a synchronous generator in the production and operation of energy [1-10].

References

[1]. М. Абдуллаев, С Маҳамаджонов, М. Маткосимов. Моделирование работы микро-ГЭС. Научно-технический журнал «Узбекгидроэнергетика». – 2020, № 4.

[2]. Abdullayev M. Matkasymov M. M. Application Of Electric Drives With Two-Zone Regulation The American Journal of Engineering and Technology. – The USA Journals. – Volume 03. – Issue 01-2021, (52-57) b.

[3]. Pirmatov N. B., Matqosimov M. M., Mahamadjonov S. Y. Efficient use of the asynchronous generator of micro htpp // scientific and technical journal machine building. – 2022 y., № 3(4)-son.

[4]. M. Matqosimov and S. Muhamadjonov. Using the asynchronous motor in generator mode in small-capacity hydroelectric power plants to scientific article on the topic ICEE-CCA. 2023 conference Fri. – August, 18, 2023.

[5]. Matqosimov, M. (2024). Elektr davlaklarda quvvat va energiya yo'qotilishini kashaytirish. Xalqaro ilmiy tadqiqotchilar jurnali (IJSR) INDEXING, 4 (2), 125-131.

[6]. Pirmatov, Nurali, et al. «Characteristics of the static and dynamic operating modes of the asynchronous generator in renewable energy sources and the production of electric energy control through a frequency converter». – E3S Web of Conferences. –Vol. 480. – 2024.

[7]. М. Абдуллаев, М. Маткасимов, Д. Каримжонов. Применение линейных двигателей в электроприводах.

[8]. Абдуллаев, М., Маткасимов, М., & Каримжонов, Д. (2020). Применение линейных двигателей в электроприводах. Universum: технические науки, (11-5 (80)), 12-14.

[9]. Абдуллаев, М., Ахмадалиев, У. & Маткасимов, М. (2020). Применение энергоэффективных и энергоэкономных электроприводов. Современные научные исследования и инновации. – (6), 13-13.

[10]. Pirmatov, N., Mahamadjonov, S., Matqosimov, M. & Haydarov, H. (2024, December). Characteristics of the static and dynamic operating modes of the asynchronous generator in renewable energy sources and the production of electric energy control through a frequency converter. In E3S Web of Conferences. – Vol. 480, p. 01007).

[11]. Matqosimov, M. (2024). Elektr davlaklarda quvvat va energiya yo'qotilishini kashaytirish. Xalqaro ilmiy tadqiqotchilar jurnali (IJSR) indexing, 4 (2), 125-131.

[12]. Маткасимов, М. «Снижение потерь мощности и энергии в электроприводах». International journal of scientific researchers (IJSR) INDEXING 4.2 (2024): 125-131.

[13]. Абдуллаев, Мухаммадсайфулло, Мухаммадсодик Маткасимов и Дилёрбек Каримжонов. «Применение линейных двигателей в электроприводах». Universum: технические науки, 11-5 (2020): 12-14.

[14]. Зокирова, И. З. «Электричекие и химические анализы трансформаторных маслах». International journal of scientific researchers (IJSR) INDEXING 5.1 (2024): 210-213.

[15]. Абдуллаев, Мухаммадсайфулло, et al. «Повышение производительности промышленных установок применением энергосберегающих технологий». Universum: технические науки, 11-5 (80) (2020): 8-11.

[16]. Pirmatov, Nurali, et al. «Analysis of various operating modes of the microhpp asynchronous generator using the matlab simulink program». E3S Web of Conferences. – Vol. 508. EDP Sciences, 2024.

[17]. Pirmatov, N., Matqosimov, M., Mahamadjonov, S., & Sayitov, S. (2024 yil, noyabr). Matlab simulink dasturi yordamida microhpp asinxron generatorining turli ish rejimlarini tahlil qilish. E3S Web of Conferences da (508-jild, 02012-bet). EDP fanlari.

[18]. Pirmatov, Nurali, et al. «Investigation of transients in asynchronous generators used in microhydroelectric power plants». E3S Web of Conferences. – Vol. 508. EDP Sciences, 2024.

[19]. Pirmatov, N., Matqosimov, M., Mahamadjonov, S., & Xolmatov, E. (2024 yil, noyabr). Mikrogidroelektrostantsiyalarda qo'llaniladigan asinxron generatorlarda o'tish jarayonlarini tekshirish. E3S Web of Conferences da (508-jild, 02007-bet). EDP fanlari.

[20]. Маткасимов, М. «Снижение потерь мощности и энергии в электроприводах». International journal of scientific researchers (IJSR) INDEXING 4.2 (2024): 125-131.

[21]. Абдуллаев, Мухаммадсайфулло, Уткирбек Акрамжонович Ахмададалиев. «Снижение потерь мощности и энергии в электроприводах». Современ-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ные научные исследования и инновации 11 (2019): 7-7.

[22]. Абдуллаев, Мухаммадсайфулло, Уткирбек Акрамжонович Ахмадалиев. «Повышение коэффициента мощности электроприводов переменного тока». Universum: технические науки, 11-3 (68), (2019): 86-89.

[23]. Мамадалиев, Махаммаджон Ахмадалиевич. «Электроэнергия в системах электроэнергетики». International journal of scientific researchers (IJSR) INDEXING 4.2 (2024): 75-78.

[24]. Shodiyev, B., Mannoboyev, S., Shukuraliyev, A., Matqosimov, M., Madaminov, A., Saporboyev, M., & Suropov, B. (2024). Electrical energy saving analysis based on solar power collector's thermal system. In E3S Web of Conferences (Vol. 497, p. 01004). EDP Sciences.

[25]. Shodiyev, Bobur, et al. «Electrical energy saving analysis based on solar power collector's thermal system». E3S Web of Conferences. – Vol. 497. EDP Sciences, 2024.

[26]. Абдуллаев, Мухаммадсайфулло, et al. «Повышение производительности промышленных установок применением энергосберегающих технологий». Universum: технические науки, 11-5 (80) (2020): 8-11.

[27]. Абдуллаев, М., Ахмадалиев, У. А., Маткасимов, М. М. Х. У., & Хайдаров, Х. М. У. (2020). «Повышение производительности промышленных установок применением энергосберегающих технологий». Universum: технические науки, (11-5 (80)), 8-11.

[28]. Абдуллаев, М., У. Ахмадалиев, and М. Маткасимов. «Применение энергоэффективных и энергоэкономных электроприводов». Современные научные исследования и инновации, 6 (2020): 13-13.

[29]. Абдуллаев, М., Ахмадалиев, У., & Маткасимов, М. (2020). «Применение энергоэффективных и энергоэкономных электроприводов». Современные научные исследования и инновации, (6), 13-13.

[30]. Абдурахмонов, Султонбек Уктамович, Мухаммадсайфулло Абдуллаев. «Теоретические основы электротехники» – фундаментальная основа при изучении профилирующих дисциплин высших учебных заведениях». – Точная наука, 26 (2018): 118-121.

[31]. Абдурахманов, Султонбек Уктамович, Мухаммадсайфулло Абдуллаев, Аборбек Шукурали Шукуралиев. «Повышение эффективности пусковых и статических режимов работы компрессорных установок». Бюллетень науки и практики 4.2 (2018): 243-246.

[32]. Абдуллаев, Мухаммадсайфулло, Дилёрбек Каримжонов. «Энергосбережение в электроприводе». Universum: технические науки. – 3-4 (84) (2021): 5-7.

[33]. Абдуллаев, Мухаммадсайфулло, Уткирбек Акрамжонович Ахмададалиев. «Снижение потерь мощности и энергии в электроприводах». Современные научные исследования и инновации. 11 (2019): 7-7.

[34]. Маткасимов, М. «Снижение потерь мощности и энергии в электроприводах». International journal of scientific researchers (IJSR) INDEXING 4.2 (2024): 125-131.

[35]. Berdiyorovich, Pirmatov Nurali, Muhammadsodiq Matqosimov Mahamadhoshim o'g'li, and Mahamadjonov Sodiqjon Yo'ldashboy o'g. «Research on the use of asynchronous machine in generator mode in microhydroelectric plants of a renewable alternative energy source device». (2023).

[36]. Абдуллаев, Хумоюн Фуркатович, Мухаммадсайфулло Абдуллаев. «Повышение коэффициента мощности асинхронного двигателя». Современные научные исследования и инновации. 7 (2021).

[37]. Ахмадалиев, Уткирбек Акрамжонович. «Вихревые горелки с низким выбросом Nox». Точная наука. 26 (2018): 74-78.

[38]. Zokirova, I. Z., & Matqoshimov, M. (2019). Dielektriklarning elektr o'tkazishi. Iqtisodiyot va jamiyat, (10 (65)), 178-182. APA.

[39]. Abdullaev M. va boshqalar Energiya tejqiyot texnologiyalardan foydalanish orqali sanoat ishlab chiqarish ishlab chiqishini oshtirish //Universum: texnika fanlari. – 2020. – Yo'q. 11-5 (80). – 8-11-betlar. GOST.

[40]. Abdullaev, M., Axmadaliyev, U. A., Matqosimov, M. M. H. U., & Xaydarov, X. M. U. (2020). Energiya tejqiyot texnologiyalardan foydalanish araka sanoat quvvatli ishlab chiqarishni oshirish. Universum: Muhandislik fanlari, (11-5 (80)), 8-11. APA.

Транслитерация по BSI

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Статья поступила в редакцию 07.02.24 Ред. Рег. № 307-002-24 The article has entered in publishing office 07.02.24 Ed. Reg. No. 307-002-24

УДК 621.311.213

СРЕДНЕСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ПРИТОКА К СТВОРУ ГЭС И КОРРЕКТИРОВКА НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

С. В. Митрофанов[1, 2], А. В. Сидорова[1], А. Г. Русина[1]

[1]Новосибирский Государственный Технический Университет,
пр-т К. Маркса, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073, тел: 8 (383) 346-08-43, факс: (383) 346-02-09, e-mail: rector@nstu.ru
[2]Томский политехнический университет, ИШИнЭС ОИС,
пр-т Ленина, 30, г. Томск, Россия, 634050, тел: +7 (3822) 60-63-3, факс: +7 (3822) 60-64-44, e-mail: tpu@tpu.ru
Автор-корреспондент (e-mail: mitrofan_serg@mail.ru, тел: 8-913-481-55-15, факс: 8-913-481-55-15)

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.086-099

Заключение совета рецензентов: 21.02.24 Заключение совета экспертов: 26.02.24 Принято к публикации:28.02.24

В статье содержится обоснование важности и необходимости прогнозирования естественного притока к створу ГЭС, а также изложение основных принципов, затрудняющих управление режимами ГЭС без моделей прогнозирования. Отдельное внимание уделяется описанию используемых методов прогнозирования, оценки их точности, достоинств и недостатков. Создание модели и опробование алгоритмов прогнозирования естественного притока к створу ГЭС реализовано методами машинного обучения в Python с использованием библиотеки scikit-learn. В качестве объекта исследования выбрана Новосибирская ГЭС.

В ходе сбора и анализа данных была создана выборка из метеорологических сведений за 3287 дней со значениями температуры воздуха, давления, осадков, влажности и естественного притока к створу ГЭС. Прогнозирование притока к створу ГЭС реализовано на моделях линейной регрессии, полиноминальной регрессии второй степени, ближайших соседей, деревьев решений и случайного леса решений.

Полученные результаты оценки критериев точности MAPE, RMSE, R2 и MSE для каждой из рассматриваемых моделей прогнозов естественного притока к створу ГЭС показали, что реализация наиболее точного среднесрочного прогноза притока к створу ГЭС была достигнута моделью на основе случайного леса деревьев решений.

Ключевые слова: среднесрочное прогнозирование, приток к створу, ГЭС, матрица Пирсона, машинное обучение, Python.

А. В. Сидорова, С. В. Митрофанов, А. Г. Русина. Среднесрочное прогнозирование естественного притока к створу ГЭС и корректировка номинальной мощности с помощью применения технологий водородной энергетики // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 02 (419) 2024, с. 86-99

A. V. Sidorova, S. V. Mitrofanov, A. G. Rusina. Medium-term forecasting of natural inflow HPP // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 02(419) 2024, pp. 86-99

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

MEDIUM-TERM FORECASTING OF NATURAL INFLOW HPP

S. V. Mitrofanov[1,2], A. V. Sidorova[1], A. G. Rusina[1]

[1]Novosibirsk State Technical University,
K. Marx Avenue, 20, Novosibirsk, Russia, 630073, phone: 8 (383) 346-08-43, fax: (383) 346-02-09, e-mail: rector@nstu.ru
[2]Tomsk Polytechnic University, ES IES ISD,
Lenin Avenue, 30, Tomsk, Russia, 634050, phone: +7 (3822) 60-63-3, fax: +7 (3822) 60-64-44, e-mail: tpu@tpu.ru
Corresponding author (e-mail: mitrofan_serg@mail.ru, phone: 8-913-481-55-15, fax: 8-913-481-55-15)

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.086-099

Referred: 21.02.24 Received in revised form: 26.02.24 Accepted: 28.02.24

The article contains a rationale for the importance and necessity of forecasting the natural inflow HPP, as well as a statement of the basic principles that complicate the management of HPP modes without forecasting models. Special attention is paid to the description of the forecasting methods used, assessment of their accuracy, advantages and disadvantages. The creation of a model and testing of algorithms for predicting natural inflow HPP was implemented using machine learning methods in Python and scikit-learn library. The Novosibirsk HPP was chosen as the object of the study.

During the collection and analysis of data, a sample was created from meteorological information for 3287 days with values of air temperature, pressure, precipitation, humidity and natural inflow HPP. Forecasting of inflow HPP is implemented using linear regression, second-degree polynomial regression, nearest neighbors, decision trees and random decision forest models.

The obtained results of assessing the accuracy criteria MAPE, RMSE, R2 and MSE for each of the considered models for forecasting natural inflow HPP showed that a model based on a random forest of decision trees achieved the implementation of the most accurate medium-term forecast of inflow HPP.

Keywords: medium-term forecasting, inflow, HPP, Pearson matrix, machine learning, Python.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Митрофанов
Сергей Владимирович

Mitrofanov Sergey V.

Сведения об авторе: к.т.н., доцент, научный сотрудник отделения интеллектуальных систем инженерной школы «Интеллектуальные энергетические системы» (ИШИнЭС), Томского политехнического университета. Доцент кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).

Образование: инженер по специальности «Гидроэлектростанции», СФУ, г. Красноярск, 2010 г., кандидат технических наук (профиль: электрические станции и электроэнергетические системы), НГТУ, г. Новосибирск, 2014 г.

Область научных интересов: гидроэнергетика, возобновляемые источники энергии, методы прогнозирования, методы оптимизации электроэнергетических режимов.

Публикации: 75.

Индекс Хирша: 7.

Information about the author: Ph.d. researcher at department of intelligent systems of the engineering school «Intelligent Energy Systems» (ES IES ISD), Tomsk Polytechnic University. Associate Professor, Department of Power Supply Systems, Novosibirsk State Technical University (NSTU).

Education: engineer specializing in «Hydroelectric power plants», Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 2010, Ph.d . (profile: power plants and electric power systems), NSTU, Novosibirsk, 2014.

Research interests: hydropower, renewable energy sources, forecasting methods, methods for optimizing electric power modes.

Publications: 75.

H-index: 7.

Сидорова
Алена Владимировна

Sidorova Alena V.

Сведения об авторе: научный сотрудник Межкафедральной научно-исследовательской лаборатории обработки, анализа и представления данных в электроэнергетических системах (ЛДвЭЭС) НГТУ.

Образование: Исследователь. Преподаватель-исследователь по направлению «Электро- и теплотехника» (профиль: Электрические станции и электроэнергетические системы), НГТУ, г. Новосибирск, 2023.

Область научных интересов: гидроэнергетика, водно-энергетические расчеты, алгоритмизация системных и внутристанционных ограничений.

Публикации: 40.

Индекс Хирша: 3.

Information about the author: researcher at the Interdepartmental Research Laboratory for Processing, Analysis and Presentation of Data in Electric Power Systems (LDvEES) NSTU.

Education: Researcher. Teacher-researcher in the field of «Electrical and thermal engineering» (profile: Electric plants and electric power systems), NSTU, Novosibirsk, 2023.

Research interests: hydropower engineering, water-energy calculations, algorithmization of system and intra-station restrictions.

Publications: 40.

H-index: 3.

Русина
Анастасия Георгиевна

Rusina Anastasia G.

Сведения об авторе: д.т.н., декан факультета энергетики, заведующий кафедрой Электрических станций НГТУ НЭТИ, эксперт РАН, член IEEE.

Образование: НГТУ, специальность: «Электроэнергетика», 2004, к.т.н., 2006, д.т.н., 2013.

Область научных интересов: прогнозирование суточных графиков нагрузки, моделирование режимов работы каскада ГЭС, адресное распределение мощности, оптимизация режимов работы станций.

Публикации: 188 научных работ, 3 монографии, 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Индекс Хирша: 11.

Information about the author: Doc. of Sc., Dean of the Faculty of Energy, Head of the Power Plants Department at Novosibirsk State Technical University (NSTU NETI), expert at the RAS, member of IEEE.

Education: NSTU, specialty: «Electric Power Networks», 2004, PhD, 2006, Doc. of Sc., 2013.

Research interests: load forecasting, hydropower plant operation modes modeling, targeted power distribution, optimization of plant operation modes.

Publications: 188 scientific works, 3 monographs, 6 state registration certificates for software.

H-index: 11.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Предисловие

Прогнозирование естественного притока к створу гидроэлектростанции (ГЭС) является одним из основных элементов планирования режима работы ГЭС, цель которого состоит в определении наиболее вероятной величины планируемого к использованию гидроресурса. От качества прогноза притока к створу ГЭС зависит надежность, экономичность, качество управления режимами ГЭС с учетом предъявляемых к ним технологическим ограничениям.

Прогнозирование включает в себя создание хорошо обоснованного прогноза о будущих состояниях объекта, наряду с предложением альтернативных путей и потенциальных сроков их реализации. Методы прогнозирования включают в себя ряд шагов, которые необходимо предпринимать при разработке моделей прогнозирования. Несмотря на разнообразие доступных методов прогнозирования, их конечной целью является определение будущего состояния объекта на основе текущих или предшествующих значений.

Типология методов прогнозирования притока к створу ГЭС достаточно обширна, и для того, чтобы получить прогноз с высокой точностью, достоверно-

стью и интерпретируемостью, необходимо выбрать оптимальную методику, согласно которой будет осуществляться расчет. Выбор методики обусловлен, в первую очередь, постановкой задачи, видом результата прогноза, периодом упреждения и факторами, влияющими на прогноз (величина глубины упреждения, длина эволюционного цикла, наличие инертности, корреляции и т.д.).

В силу стремительного и непрерывного развития электроэнергетических систем, а также внедрения более высоких требований, предъявляемых к качеству результатов прогнозирования (точности, надежности, достоверности, адаптивности и т.д.), вектор научных разработок повернулся в сторону использования нетрадиционных методов прогнозирования, основанных в большей степени на машинном обучении [1-7] и многочисленных комбинациях его подвидов. К основным методам машинного обучения, используемых в прогнозировании, относят: метод машин опорных векторов (с англ. Support Vector Machine (SVM)) [8-11] и его регрессию (с англ. Support Vector Regression (SVR)) [12], ансамблевые методы [13-15], модели регрессий случайного леса (с англ. Random Forest (RF)), градиентный бустинг над деревьями решений (с англ. Adaptive Boosting (AdaBoost)) [16-19], метод роя частиц, метод k-ближайших соседей (с англ. k-nearest neighbors algorithm (kNN)) [20-22], искусственные нейронные сети (прямого распространения, сверточные, рекуррентные) [23-26]. Помимо перечисленных методов, широко исследуются и их сочетания: нейросетевые модели с предобработкой данных вейвлет-преобразованием (с англ. Wavelet Neural Network (WNN)), нейросети с вейвлет-предобработкой данных и оптимизацией методом роя частиц, комбинирование алгоритма случайного леса и многослойного перцептрона, нейро-нечеткая нейросеть с пост-обработкой данных методом ARIMA и адаптивного бустинга и т.д.

Все перечисленные методы имеют свои особенности, в т.ч. разный горизонт расчета, точность полученных результатов, а также скорость вычисления, которая очень важна для оперативного прогнозирования притока к створу ГЭС. Прямое сравнение существующих методов по точности и скорости расчета произвести практически невозможно, т.к. в каждом из них осуществлены многочисленные исследования разными авторами, которые используют свои уникальные наборы тестовых данных и свое программное обеспечение для их воспроизведения. Однако все-таки укрупненно стоит отметить, что модели, построенные на нетрадиционных методах, позволяют обширно работать с нелинейными зависимостями (чего в большинстве случаев не могли позволить традиционные подходы), позволяют строить более сложные модели и связи (за счет наслаивания друг на друга необходимых слоев), позволяют учитывать большое количество дополнительных факторов и ограничений, демонстрируют в целом более высокую точность.

В рамках данной статьи рассматривается задача среднесрочного прогнозирования естественного притока к створу ГЭС методами машинного обучения, позволяющих рассматривать процесс прогноза с точки зрения адаптивного планирования, способного подстроиться к изменениям структуры и режима работы ГЭС, как следствие – повысить качество оперативного управления гидроэнергетическими узлами.

Таблица сокращений

ГЭС	Гидроэлектростанция
SVM	Support Vector Machine
SVR	Support Vector Regression
RF	Random Forest
AdaBoost	Adaptive Boosting
kNN	k-nearest neighbors algorithm
WNN	Wavelet Neural Network
МВт	Мегаватт
ОРУ	Открытое распределительное устройство

м	Метр
NASA	National Aeronautics and Space Administration
%	Процент
RMSE	Root Mean Squared Error
R^2	Коэффициент детерминации
MSE	Mean Squared Error
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
$м^3/с$	Метр кубический в секунду
$(м^3/с)^2$	Метр кубический в секунду в квадрате

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

1. Сопоставительный анализ аналогов и прототипов

Существуют две основные категории методов прогнозирования речного притока: основанные на физико-математическом моделировании и опирающиеся на статистические данные [27].

Физико-математические модели бассейнов рек должны имитировать все стадии гидрологического цикла на суше, включая инфильтрацию, испарение, термику и водный режим почв, образование снежного покрова, его таяние, формирование поверхностных, внутрипочвенных и грунтовых вод, а также речной сток.

Физико-математические модели дают подробное описание характерных особенностей исследуемого бассейна реки, однако основным их недостатком является наличие большого количества зависящих от региона параметров, требующих регулярной калибровки, что затрудняет их оптимизацию [28]. С другой стороны, прогнозирование стока методами, основанными на данных, построено на статистической взаимосвязи между гидрологическими переменными [29-32]. Эти методы способны фиксировать закономерности в обширных наборах данных на основе числовых отношений ввода-вывода. Несмотря на значительные прогностические возможности методов, основанных на данных, их «черный ящик» не обладает гидрологической значимостью и надежностью [33]. Например, невозможность определить движущие факторы процессов дождевого стока сильно ограничивает прогнозы стока в не измеряемых водоразделах, где модели, основанные на наблюдаемых физических параметрах, могут предоставить полезную информацию.

Влияние метеорологических факторов на сток реки становится более очевидным при уменьшении размеров речного бассейна и сокращении периода, в течение которого рассматривается это влияние.

Развитие методов машинного обучения значительно расширили возможности и точность многофакторных статистических моделей в задачах прогнозирования притока различного уровня временной иерархии. Их применение даёт значительное преимущество в виде способности обнаруживать взаимосвязи между прогнозируемыми параметрами и влияющими факторами. Однако, многофакторный анализ также может представлять проблему, увеличивая погрешность прогноза в случае, если на самом деле факторы не влияют на прогнозируемый параметр или данные были собраны некорректно. В контексте прогнозирования притока воды к створу гидроэлектростанции (ГЭС) и определения рабочих параметров основного оборудования, методы машинного обучения также могут обеспечить повышение точности прогнозирования и эффективности планирования работы станции. Например, в статье [34] детально обсуждаются взаимосвязи между уровнем притока и различными метеорологическими условиями, а также подтверждается необходимость поиска более точных математических моделей прогнозирования. Статья [34] представляет собой систематический обзор 90 научных публикаций, посвященных применению машинного обучения для прогнозирования и планирования работы гидроэлектростанций. Материалы, рассмотренные в публикации [35], посвящены как краткосрочным, так и долгосрочным прогнозам, а также задачам управления работой ГЭС на основе прогнозной информации. Изучена динамика роста числа публикаций на эту тему в период с 2010 по 2021 годы. В публикациях [36-40] рассматриваются методики прогнозирования стока на следующие сутки с использованием глубокого машинного обучения. Проводится анализ сравнения регрессионных моделей и нейросетевых моделей различных архитектур.

В этом контексте оптимальной может считаться модель, которая сочетает в себе физико-математические принципы изменения характеристик стока и статистические модели, описывающие частоту колебаний стока и воздействующих на него факторов.

2. Постановка задачи

Существуют две основные постановки задачи прогнозирования на основе набора ретроспективных данных. Теория статистического прогнозирования предполагает, что наблюдаемая последовательность является конкретной реализацией случайного процесса при множестве независимых степеней свободы, которые линейно взаимодействуют. В теории динамических систем существует другая точка зрения [41], согласно которой внешне случайное поведение может быть порождено детерминированными хаотическими системами с небольшим числом степеней свободы, взаимодействующих нелинейно.

В случае использования регрессионных подходов к прогнозированию, исходный временной ряд разделяется на конечные отрезки с помощью скользящего окна [42] и затем собирается в таблицу X, строки которой фактически являются векторами вложения, описывающими часть траектории системы в пространстве состояний. Такой формат представления данных называется динамическими панельными данными и позволяет применить к задаче прогнозирования любой алгоритм регрессии:

$$X = \begin{bmatrix} x_t \\ \dots \\ x_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t-1) & x(t-2) & \dots & x(t-d+1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(d-1) & x(d-2) & \dots & x(1) \end{bmatrix}; \quad (1)$$

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

На следующем шаге необходимо определить функцию зависимости будущего состояния от текущего:

$$x_{t+1} = F(x_t). \quad (2)$$

где: x_t – текущее состояние системы в пространстве состояний, x_{t+1} – будущее состояние системы в пространстве состояний, F – аппроксимация функции отображения.

Поскольку нелинейные системы сильно зависят от начальных условий, использование глобальной функции аппроксимации F приведет к накоплению ошибки из-за ее основного использования в разрезе только гладких функций. В связи с этим имеет смысл использование метода локального обучения [42]. Другими словами, переобучать на поступающих данных временного ряда на каждом временном шаге *Ft* и производить прогноз на один шаг вперед – это позволит снизить влияние начальных условий на точность аппроксимации.

В статье рассматривается применение алгоритмов машинного обучения в рамках метода локального обучения для создания модели оперативного прогнозирования естественного притока к створу ГЭС. Для решения данной задачи были рассмотрены алгоритмы линейной регрессии, полиноминальной регрессии второй степени, ближайших соседей, деревьев решений и случайного леса решений. Рассматриваемые алгоритмы отличны.

Линейная регрессия. Статистический метод моделирования взаимосвязи между одним или несколькими переменными (независимые переменные, факторы, регрессоры) и другой переменной (зависимой, объясняемой), цель которого состоит в поиске наилучшей линейной зависимости между переменными-предикторами и переменной-ответом [43, 44]. Алгоритм линейной регрессии определяет значение искомой переменной как линейную комбинацию независимых переменных (факторов, регрессоров). В упрощенном виде принцип работы алгоритма можно отнести к задаче определения линии наилучшего соответствия через определенный набор точек с данными.

Полиноминальная регрессия второй степени. Тип регрессионного анализа, который моделирует взаимосвязь между зависимой переменной y и одной или несколькими независимыми переменными x в виде полинома *n*-й степени (полиномиального уравнения степени *n*) [43].

Ближайшие соседи. Непараметрический метод, используемый для задач распознавания образов и прогнозирования, включая прогнозирование временных рядов. Основан на предположении, что сходные точки данных в прошлом, вероятно, будут демонстрировать сходное поведение в будущем. В случае прогнозирования временных рядов алгоритм осуществляет рассмотрение исторических точек данных как опорных точек для прогнозирования будущих значений. Функционирование алгоритма начинается с разбиения данных временных рядов на окна фиксированной длины или подпоследовательности, где каждое окно – это набор прошлых наблюдений, а его будущее значение – это цель расчета (цель прогнозирования). Чтобы сделать прогноз для заданной целевой точки данных, модель ближайших соседей на основе показателя расстояния (евклидово расстояние, корреляция Пирсона) идентифицирует *k* наиболее похожих исторических окон, которые известны также, как ближайшие соседи, содержат общие закономерности или тренды, близкие к целевой точке данных. Как только определены *k*-ближайшие соседи, их соответствующие будущие значения агрегируют для целевой точки данных с целью получения прогноза. Процесс агрегирования обычно включает в себя получение среднего, средневзвешенного значения или медианы значений соседей. Это агрегированное значение и служит прогнозируемым значением для целевой точки данных во временном ряде. Выбор *k*-количества рассматриваемых соседей – решающий параметр в модели ближайших соседей, т.к. меньшее значение *k* может привести к более локальным и изменчивым прогнозам, а большее значение *k* может сгладить прогнозы и потенциально не учесть локализованные закономерности.

Дерево решений. Модель машинного обучения в виде древовидной структуры решений и их потенциальных последствий характеризуется контролируемым типом обучения, при котором алгоритм учится сопоставлять входные данные с выходными путем рекурсивного разбиения данных на подмножества, причем каждое разделение представляет собой ветвь дерева [44]. Структура дерева решений содержит узлы (точки принятия решений в дереве), ветви (возможные результаты принятия решения) и листья (конечный результат). В зависимости от характера целевой переменной, деревья решений могут быть использованы как в задачах классификации, так и в задачах регрессии. В задачах классификации целью использования деревьев решений является прогнозирование категориальной или дискретной метки, в задачах регрессии – прогнозирование непрерывного или числового значения. Данный алгоритм универсален как для краткосрочного, так и для долгосрочного прогнозирования. В данной статье дерево решений будет использоваться для решения задач регрессии.

Случайный лес решений. Алгоритм машинного обучения, используемый для классификации, регрессии и других задач, является ансамблем решающих деревьев, где каждое дерево обучается независимо друг от друга на случайной выборке. Построение деревьев осуществляется бинарным методом, где на основе обучающей выборки выбирается случайное подмножество объектов и случайных подмножеств признаков. Для каждого признака вычисляется «важность», которая определяет степень влияния на целевую переменную [44]. Суть алгоритма случайного

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

леса заключается в том, что при получении обучающего набора данных, алгоритм генерирует набор случайных подвыборок (и набор случайных признаков), тем самым производя построение каждого дерева на уникальном наборе данных. Построенная модель проверяется на тестовых данных.

3. Модель прогноза естественного притока к створу ГЭС

На данном временном интервале наиболее часто рассматриваются недельный или декадный прогноз естественного притока к створу ГЭС. Результаты, полученные на этих интервалах, имеют наибольшую ценность в периоды предполоводья и половодья, т.к. точность прогноза (определение даты начала половодья) оказывает значительное влияние на эффективность использования гидроресурсов на этапе предполоводной сработки. Точность прогноза естественного притока также определяет планируемую стратегию наполнения водохранилища и объем холостых сбросов ГЭС, что вследствие влияет на объем вырабатываемой электроэнергии и мощности на ГЭС.

В качестве примера оценки степени влияния метеорологических факторов на точность прогнозирования притока на декаду рассмотрена Новосибирская ГЭС установленной мощностью 460 мегаватт (МВт). ГЭС расположена на реке Обь и является единственным гидрогенерирующим узлом на этой реке. Новосибирская ГЭС является низконапорной русловой ГЭС, где здание ГЭС входит в состав напорного фронта. Состав гидроузла включает в себя земляные плотины и дамбу, бетонную водосбросную плотину, здание ГЭС, открытое распределительное устройство (ОРУ) 110 и 220 кВ, а также судоходный шлюз. Общая протяженность подпорных сооружений гидроузла составляет 4846 метров (м). Новосибирская ГЭС играет важную роль в функционировании энергосистемы Новосибирска, обеспечивает надежное водоснабжение и работу речного транспорта в нижнем бьефе.

В качестве исходных данных для прогнозирования естественного притока к створу Новосибирской ГЭС использованы метеорологические данные с сайта National Aeronautics and Space Administration (NASA) [45]. В выборку были включены такие показатели, как: влажность, среднедневная температура воздуха, давление, осадки и данные притока [46]. Данные изменения погоды были получены за период с 25.04.2013 по 14.04.2022 (3287 дней), усреднены относительно каждой декады (323 декады) и приведены в виде графиков на Рис. 1-4.

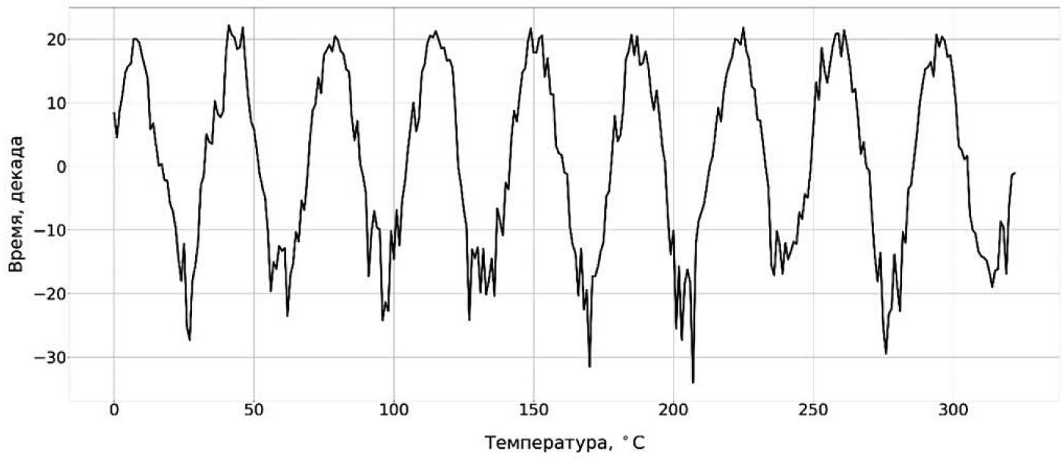


Рис. 1. График изменения температуры за период ретроспективы
Fig. 1. A graph of temperature changes over the retrospective period

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

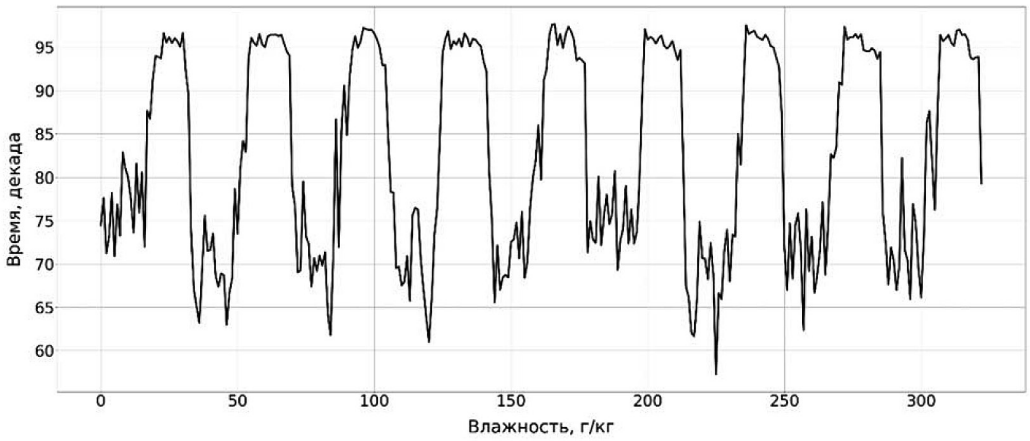


Рис. 2. График изменения влажности за период ретроспективы
Fig. 2. A graph of humidity changes over the retrospective period

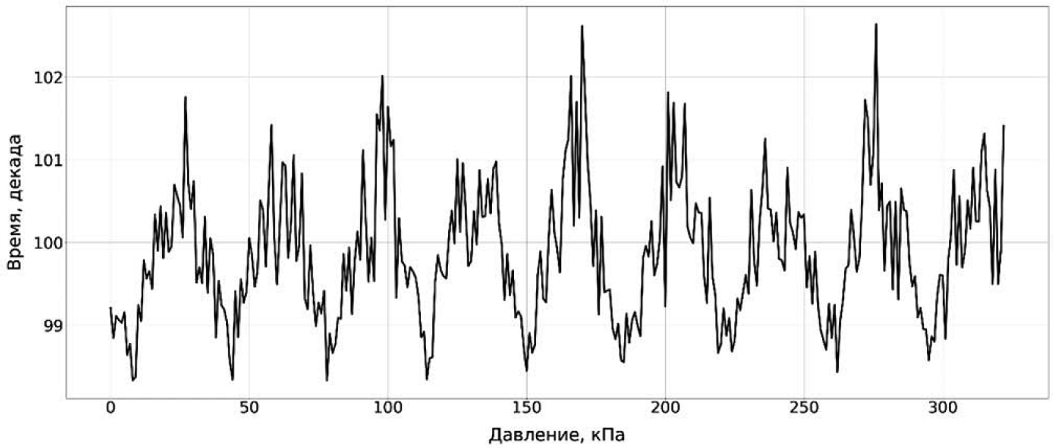


Рис. 3. График изменения давления за период ретроспективы
Fig. 3. The graph of pressure changes over the retrospective period

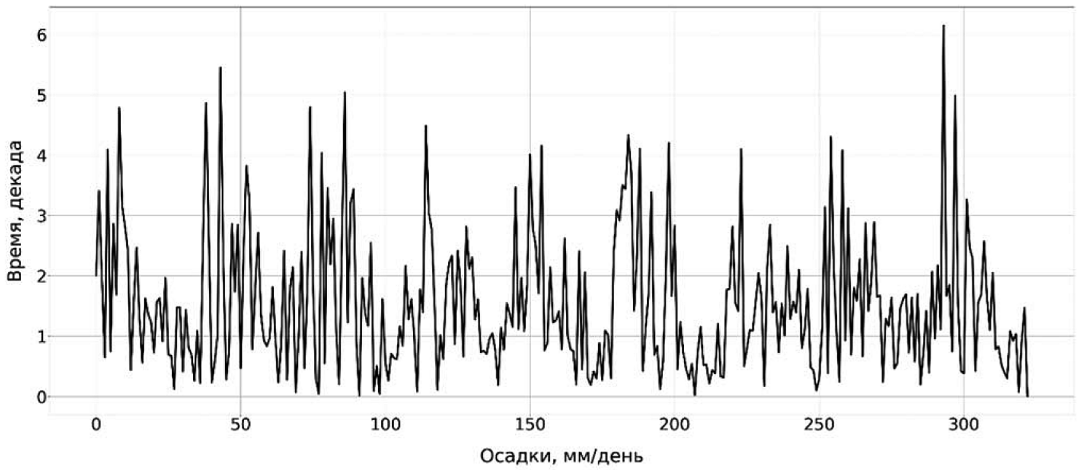


Рис. 4. График изменения осадков за период ретроспективы
Fig. 4. A graph of precipitation changes over the retrospective period

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

4. Тестирование модели прогноза естественного притока к створу ГЭС

Для выявления зависимостей между параметрами были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона, представленные в виде матрицы парных сравнений на Рис. 5. Построение данной матрицы позволяет исключить данные, которые имеют слабую зависимость с прогнозируемым притоком к створу ГЭС. При значениях от 0 до 1 коэффициент демонстрирует прямую зависимость данных, при значениях от -1 до 0 – обратную.

Как видно из полученной матрицы, осадки имеют самую низкую прямую зависимость с притоком к створу ГЭС на данном интервале прогнозирования. Вследствие слабой корреляции осадков и прогнозируемым значением притока, данные об осадках были исключены из основной выборки. Слабая корреляция осадков и притока объясняется тем, что осадки, выпадающие зимой в виде снежного покрова, попадают в речной сток только весной.

При этом, как и на краткосрочном интервале, прослеживается наиболее высокая зависимость величины стока со значениями притока за 2 предыдущие декады (decade-1, decade-2).

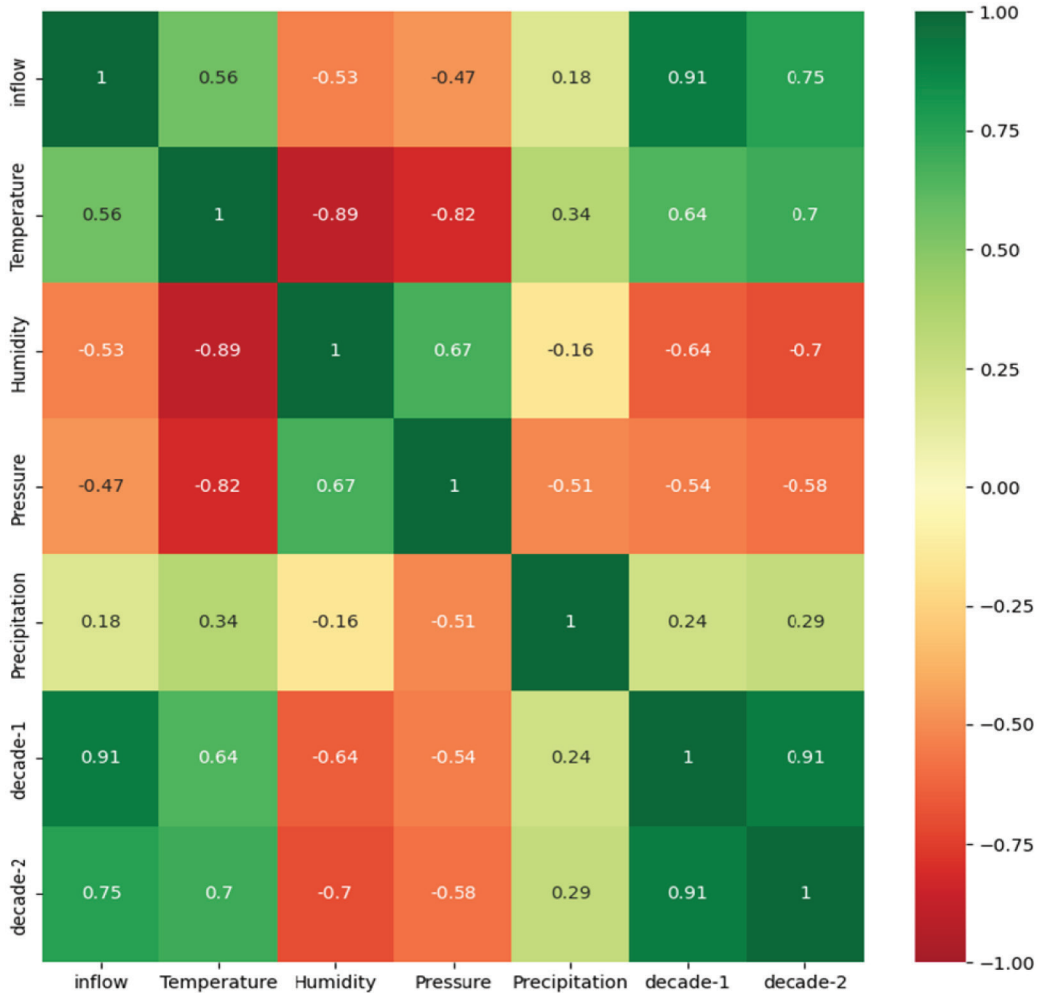


Рис. 5. Матрица коэффициентов корреляции Пирсона между исследуемыми параметрами
Fig. 5. A matrix of Pearson correlation coefficients between the studied parameters

Общий массив данных был разбит на две части: учебную выборку (75 % от общего количества данных) и тестовую выборку (25 % от общего количества данных). Учебная выборка позволяет произвести обучение модели, тестовая выборка – оценить способность модели осуществлять прогноз естественного притока к створу ГЭС на неизвестных данных путем валидации. Обе выборки были также разделены на зависимые переменные (прогноз естественного притока к створу ГЭС) и независимые переменные (давление, температура воздуха и т.д.). Полученный гидрограф притока к створу ГЭС тренировочной и тестовой выборок приведен на Рис. 6.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

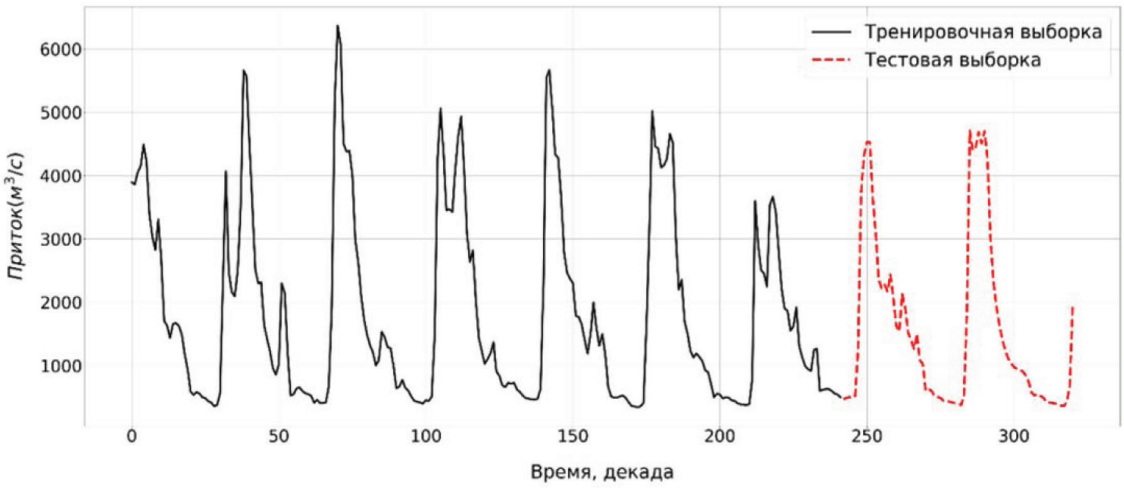


Рис. 6. Гидрограф притока к створу Новосибирской ГЭС в период с 25.04.2013 по 14.04.2022 (шаг дискретизации – декада)

Fig. 6. Hydrograph of the inflow to the Novosibirsk hydroelectric power station in the period from 04/25/2013 to 04/14/2022 (sampling step – decade)

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

5. Результаты тестирования моделей

Обучение и оценка моделей произведена с помощью высокоуровневого языка программирования Python с использованием библиотеки scikit-learn. Для прогнозирования притока к створу ГЭС были выбраны следующие модели: линейная регрессия, полиноминальная регрессия второй степени, ближайшие соседи, деревья решений и случайный лес решений. Результаты оценки точности моделирования проводились на основании следующих критериев:

Среднеквадратичная ошибка (с англ. Root Mean Squared Error (RMSE)) – ошибка измеряет в наборе данных среднее отклонение между прогнозируемыми и фактическими значениями (метрика обладает тем же масштабом, что и прогнозируемая величина):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - f(x_i))^2}\ ; \qquad (3)$$

где: n – общее количество точек данных; y_i – фактическое значение для i-й точки данных; $f(x_i)$ – прогнозируемое значение для i-й точки данных.

Коэффициент детерминации или R-квадрат (R^2) – доля дисперсии зависимой переменной, универсальная мера зависимости одной случайной величины от множества других (для модели парной линейной регрессии коэффициент детерминации равен квадрату обычного коэффициента корреляции между x и y):

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2}\ ; \qquad (4)$$

где: σ_y^2 – дисперсия случайной величины y, σ^2 – условная дисперсия зависимой переменной.

Среднеквадратичная ошибка (с англ. Mean Squared Error (MSE)) – количественная оценка средней ошибки прогнозирования:

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - f(x_i))^2\ ; \qquad (5)$$

где: n – общее количество точек данных в наборе данных; y_i – фактическое значение для i-й точки данных; $f(x_i)$ – прогнозируемое значение для i-й точки данных.

Средняя абсолютная процентная ошибка (с англ. Mean Absolute Percentage Error (MAPE)) – показатель средней величины относительной ошибки прогнозирования:

$$MAPE = \frac{100\%}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{A_t - F_t}{A_t}\right|\ . \qquad (6)$$

где: n – общее количество точек данных в наборе данных; A_t – фактическое значение для i-й точки данных; F_t – прогнозируемое значение для i-й точки данных.

Полученные результаты оценки точности MAPE, RMSE, R^2 и MSE для каждой из рассматриваемых моделей приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Результаты оценки точности моделирования

Table 1

The results of the simulation accuracy assessment

Модель/ошибка	MAPE, %	RMSE, м³/с	R^2	MSE, (м³/с)2
Вариант компоновки массива данных без метеорологических факторов				
Линейная регрессия	21,80	480,67	0,87	231042,59
Полиноминальная регрессия (2я степень)	17,33	469,78	0,88	220697,48
Модель *k*-ближайших соседей	14,49	372,97	0,92	139105,62
Дерево решений	39,92	595,5	0,81	354618,74
Случайный лес решений	19,07	393,5	0,92	154842,96
Вариант компоновки массива данных с метеорологическими факторами				
Линейная регрессия	21,15	467,10	0,88	218183,47
Полиноминальная регрессия (2я степень)	21,66	388,04	0,92	150574,61
Модель *k*-ближайших соседей	14,79	354,07	0,93	125367,99
Дерево решений	25,06	752,49	0,79	566234,11
Случайный лес решений	13,48	347,74	0,94	120925,74

Результаты расчета демонстрируют, что самой точной моделью прогнозирования естественного притока к створу ГЭС является модель случайного леса решений. Средняя абсолютная ошибка между прогнозируемым и фактическим значениями притока по MAPE составила 13,48 %, по RMSE – 347,74 м³/с. Показатель R2, равный 0,94 говорит о том, что приблизительно 94 % различий в притоке объясняются прогнозами и свидетельствуют о весомой корреляции между прогнозируемыми и фактическими значениями.

На Рис. 7 приведен график прогнозных и фактических значений притока к створу ГЭС, из которого видно, что наибольшее расхождение результатов наблюдается во время весеннего половодья, во время же зимней межени точность прогноза наоборот возрастает.

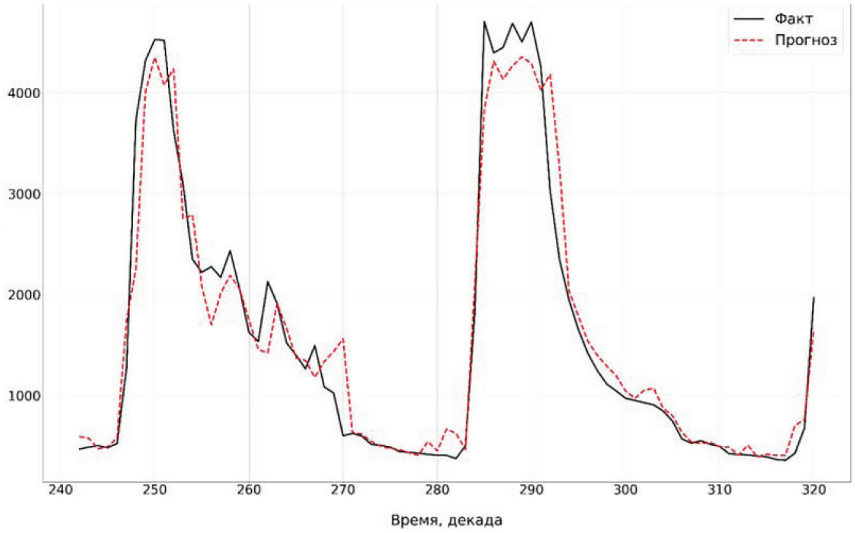


Рис. 7. График прогнозного и фактического значений притока к створу ГЭС на основе модели случайного леса решений

Fig. 7. A graph of the forecast and actual values of the inflow to the HPP site based on the model of a random forest of solutions

Второй по точности моделью прогнозирования притока к створу ГЭС является модель *k*-ближайших соседей, в которой ошибки незначительно отличны от модели случайного леса решений (отличие по MAPE на 1,31 %, по RMSE на 6,33 м³/с, по R2 на 0,01, по MSE на 4 442,25 (м³/с)²). На Рис. 8. приведен график прогнозных и фактических значений притока к створу ГЭС, из которого видно, что в отличие от модели

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

случайного леса решений в модели *k*-ближайших соседей наблюдаются эпизодические расхождения с 253 по 265 декаду, а также существенные расхождения во время весеннего половодья.

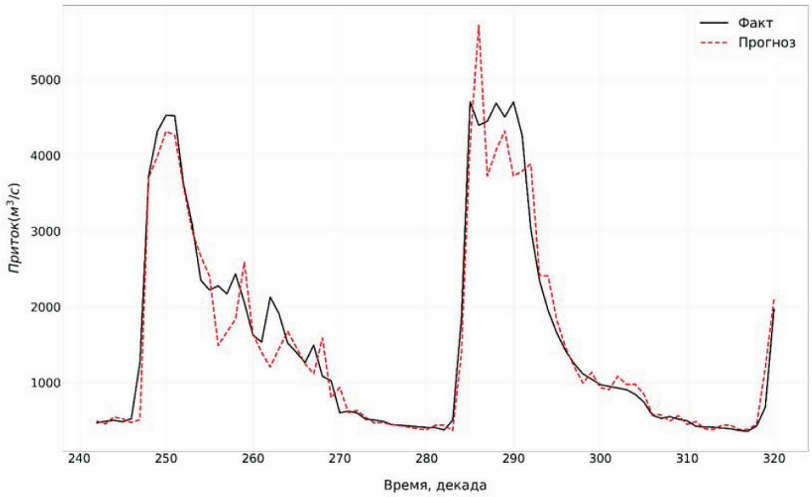


Рис. 8. График прогнозного и фактического значения притока к створу ГЭС на основе модели ближайших соседей
Fig. 8. A graph of the forecast and actual value of the inflow to the hydroelectric power station based on the nearest neighbor model

В статье была дополнительно проанализирована разная компоновка массива данных (с учетом и без учета метеорологических факторов). Как и в случае краткосрочного прогнозирования притока на сутки вперед, декадное прогнозирование притока с учетом наиболее значимых метеорологических факторов (температуры и относительной влажности) показали более высокую точность в сравнении с базовым массивом данных, содержащим только ретроспективный ряд гидрологических наблюдений за 9 лет.

Заключение

Подходы, основанные на принципах машинного обучения, позволяют достаточно точно спрогнозировать величину естественного притока к створу ГЭС с периодом ретроспективы и ошибкой, приемлемой для оперативно-диспетчерского управления. Тестирование выборки на моделях линейной регрессии, полиноминальной регрессии второй степени, *k*-ближайших соседей, деревьев решений и случайного леса, показало, что модель, основанная на методе случайного леса, имеет наименьшую ошибку.

После обучения выборки на разной компоновке массива данных (с учетом и без учета метеорологических факторов) модель показала более высокую точность в сравнении с базовым массивом данных, содержащим только ретроспективный ряд гидрологических наблюдений. Средняя абсолютная ошибка прогноза естественного притока к створу ГЭС при прогнозировании на декадной ретроспективе составила 13,48 % (MAPE) и 347,74 м^3/с (RMSE) и приходится на период весеннего половодья.

Результаты прогнозирования притока для интервалов на сутки и декаду вперед показал, что учет гидрологических факторов позволяет повысить точность прогноза при избирательном подходе к выбору значимых гидрологических факторов. Учет большого количества факторов, имеющих малые значения корреляции с величиной притока, приводят к росту ошибки во время прогнозирования.

Прогноз на сутки вперед в меньшей степени зависит от метеофакторов и в большей степени определяется ретроспективными значениями расхода в контрольных створах в предыдущих сутках, однако при прогнозировании на более длительные интервалы важность учета метеорологических факторов возрастает, что наглядно демонстрируют результаты прогнозирования расхода на декаду и позволяют говорить об удовлетворительном качестве полученных результатов предложенной модели прогнозирования.

Благодарности

Исследование выполнено в Межкафедральной научно-исследовательской лаборатории обработки, анализа и представления данных в электроэнергетических системах.

Список литературы

[1]. Electricity load forecasting: A systematic review / I.K. Nti, M. Teimeh, Nyarko-Boateng, A.F. Adekoya // Journal of Electrical Systems and Information Technology. – 2020. – Vol. 7, iss. 1. – P. 1-19.

[2]. M. Zarghami, J. Aghaei, M. Alipour and M. R. Salehizadeh, «Flexibility Forecasting of Cellular Electric Energy Systems Using Machine Learning Techniques», 2022 18th International Conference on the Euro-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

pean Energy Market (EEM), Ljubljana, Slovenia, 2022, pp. 1-5.

[3]. R. A. Iringan Iii, A. M. S. Janer and L. A. R. Tria. «A Machine-learning Based Energy Management System for Microgrids with Distributed Energy Resources and Storage», 2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiang Mai, Thailand, 2022, pp. 1-6.

[4]. N. Shabbir, R. AhmadiAhangar, L. Kütt, M. N. Iqbal and A. Rosin. «Forecasting Short Term Wind Energy Generation using Machine Learning», 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 2019, pp. 1-4.

[5]. Pavel Matrenin, Murodbek Safaraliev, Stepan Dmitriev, Sergey Kokin, Anvari Ghulomzoda, Sergey Mitrofanov, Medium-term load forecasting in isolated power systems based on ensemble machine learning models, Energy Reports, Volume 8, Supplement 1, 2022, Pages 612-618.

[6]. P. Matrenin, A. Khalyasmaa, S. Eroshenko and A. Rusina. «Application of Swarm Intelligence Algorithms to Optimize the Power Consumption Model», 2021 IEEE Second International Conference on Control, Measurement and Instrumentation (CMI), Kolkata, India, 2021, pp. 72-75.

[7]. A. Bramm and A. Khalyasmaa. «Forecasting Accuracy Improvement of Solar Power Plant's Generation». Proc. of 2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED), Ekaterinburg, Russia, 2021, doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462283

[8]. Chen, B. -J. Load forecasting using support vector machines: a study on EUNITE competition 2001 / B. -J. Chen, M.-W. Chang, Ch.-J. Lin // IEEE Transactions on Power Systems. – 2004. – Vol. 19, iss. 4. – P. 1821-1830.

[9]. G. Mitchell, S. Bahadoorsingh, N. Ramsamooj and C. Sharma. «A comparison of artificial neural networks and support vector machines for short-term load forecasting using various load types». 2017 IEEE Manchester PowerTech, Manchester, UK, 2017, pp. 1-4.

[10]. Y. Cai, Q. Xie, C. Wang and F. Lü. «Short-term load forecasting for city holidays based on genetic support vector machines». 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, Yichang, China, 2011, pp. 3144-3147.

[11]. S. Li, K. Ma, Z. Jin and Y. Zhu. «A new flood forecasting model based on SVM and boosting learning algorithms». 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Vancouver, BC, Canada, 2016, pp. 1343-1348.

[12]. M. Sarhani, A. E. Afia Electric load forecasting using hybrid machine learning approach incorporating feature selection. Proceedings of the International Conference on Big Data Cloud and Applications Tetuan, Morocco, May 25-26, 2015.

[13]. Sergeev, N. N. Enhancing Efficiency of Ensemble Machine Learning Models for Short-Term Load Forecasting through Feature Selection / N. N. Sergeev, P. V. Matrenin // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM): proc., Altai, 30 June 2022 – 04 July 2022. – Altai: IEEE, 2022. – P. 368-371.

[14]. Zhu, J. Using markov chains for link prediction in adaptive web sites / J. Zhu, J. Hong, J. G. Hughes // Int. Conference on Soft Issues in the Design, Development, and Operation of Computing Systems: proc., Berlin, Heidelberg, 10 April 2002. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2002. – P. 60-73.

[15]. D. Apostolopoulou, Z. De Grève and M. McCulloch. «Robust Optimization for Hydroelectric System Operation Under Uncertainty», in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no. 3, pp. 3337-3348.

[16]. Papadopoulos, Sokratis & Karakatsanis, Ioannis. (2015). Short-term electricity load forecasting using time series and ensemble learning methods. 2015 IEEE Power and Energy Conference at Illinois, PECI 2015. 10.1109/PECI.2015.7064913.

[17]. M. Matos, J. Almeida, P. Gonçalves, F. Baldo, F. J. Braz and P. Bartolomeu. «A Machine Learning Based Energy Management System for Renewable Energy Communities». 2023 IEEE 3rd International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES), Shanghai, China, 2023, pp. 1-6.

[18]. Y. Fan and W. Lei. «Wind Speed Prediction Based on Gradient Boosting Decision Tree». 2022 International Conference on Big Data, Information and Computer Network (BDICN), Sanya, China, 2022, pp. 93-97.

[19]. N. F. Cheganova, P. V. Matrenin and S. V. Mitrofanov. «Medium-Term Forecast of Water Inflow to the Sayano-Shushenskaya Hydroelectric Power Plant Reservoir by Autoregressive Machine Learning Models». 2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russian Federation, 2023, pp. 470-473.

[20]. Cover, T. Nearest neighbor pattern classification / T. Cover, P. Hart // IEEE Trans. Inf. Theory. – 1967. – Vol. 13. – P. 21-27.

[21]. S. S. Pattanaik, A. K. Sahoo and R. Panda. «A Comparative Analysis of KNN and Light GBM Algorithms for Wind Energy Forecasting». 2023 1st International Conference on Circuits, Power and Intelligent Systems (CCPIS), Bhubaneswar, India, 2023, pp. 1-4.

[22]. I. Jahan, F. Mohamed, V. Blazek, L. Prokop, S. Misak and V. Snasel. «Power Quality Parameters Forecasting Based on SOM Maps with KNN Algorithm and Decision Tree». 2023 23rd International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Brno, Czech Republic, 2023, pp. 1-6.

[23]. Potential of Artificial Neural Network to Power System Operation / M. J. Damborg, M. A El-Sharkawi, M. E. Aggoune, R. J. Marks II // IEEE International Sym-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

posium on Circuits and Systems: proc., New Orleans, LA, 01-03 May 1990. – New Orleans, LA: IEEE, 1990. – P. 2933-2937.

[24]. Xifeng Guo, Qiannan Zhao, Di Zheng, Yi Ning, Ye Gao, A short-term load forecasting model of multi-scale CNN-LSTM hybrid neural network considering the real-time electricity price, Energy Reports, Volume 6, Supplement 9, 2020, Pages 1046-1053, ISSN 2352-4847, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.078.

[25]. O. Y. Maryasin and A. Plohotnyuk. «Day-Ahead Power Forecasting of Renewable Energy Sources Using Neural Networks and Machine Learning». 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 130-135.

[26]. K. Okoli and Y. A. Bekeneva. «Accurate Neural Prophecy for Short-Term Load Forecasting of Optimal Renewable Energy». 2023 V International Conference on Control in Technical Systems (CTS), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 196-198.

[27]. Weimin B., Wei S., Simin Q. Flow updating in real-time flood forecasting based on runoff correction by a dynamic system response curve J. Hydrol. Eng., 19 (4) (2013), pp. 747-756.

[28]. Simin Q., Weimin B., Peng S., Zhongbo Y., Peng J. Water-stage forecasting in a multitributary tidal river using a bidirectional Muskingum method J. Hydrol. Eng., 14 (12) (2009), pp. 1299-1308.

[29]. Vrugt J. A., H. V. Gupta, W. Bouten, S. Sorooshian. A shuffled complex evolution metropolis algorithm for estimating posterior distribution of watershed model parameters Calibration Watershed Models (2003), pp. 105-112.

[30]. Jialan Sun, Xiaohui Lei, Weihong Liao, Yunzhong Jiang and Hao Wang. «Development of a flood forecasting system and its application to upper reaches of Zhangweihe River Basin». 2012 International Symposium on Geomatics for Integrated Water Resource Management, Lanzhou, 2012, pp. 1-4.

[31]. K. Allaev, T. Makhmudov, and D. Losev, «Short-term forecasting of electricity generation by HPP's of power system of Uzbekistan». E3S Web of Conf., vol.36501015,2023,doi:10.1051/e3sconf/202336501015.

[32]. D. Losev. «The long-term forecasting of specific fuel consumption by the power system of Uzbekistan». E3S Web of Conf., vol. 216, 01101, 2020, doi:10.1051/e3sconf/202021601101.

[33]. J. Wang, P. Shi, P. Jiang, J. Hu, S. Qu, X. Chen, Y. Chen, Y. Dai, Z. Xiao. Application of BP neural network algorithm in traditional hydrological model for flood forecasting Water, 9 (1) (2017), p. 48.

[34]. Ekanayake, P., Wickramasinghe, L., Jayasinghe, J. M. J. W., & Rathnayake, U. (2021). Regression-Based Prediction of Power Generation at Samanalawewa Hydropower Plant in Sri Lanka Using Machine Learning. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 1-12. https://doi.org/10.1155/2021/4913824.

[35]. Bernardes, J., Jr.; Santos, M.; Abreu, T.; Prado, L., Jr.; Miranda, D.; Julio, R.; Viana, P.; Fonseca, M.; Bortoni, E.; Bastos, G.S. Hydropower Operation Optimization Using Machine Learning: A Systematic Review. AI 2022, 3, 78-99. https:// doi.org/10.3390/ai3010006.

[36]. Bilgili, M., Keiyinci, S., Ekinci, F. One-day ahead forecasting of energy production from run-of-river hydroelectric power plants with a deep learning approach. Scientia Iranica, 2022; 29(4): 1838-1852. doi: 10.24200/sci.2022.58636.5825.

[37]. Pavel Matrenin, Murodbek Safaraliev, Stepan Dmitriev, Sergey Kokin, Bahtiyor Eshchanov, Anastasia Rusina. Adaptive ensemble models for medium-term forecasting of water inflow when planning electricity generation under climate change, Energy Reports, Volume 8, Supplement 1, 2022, Pages 439-447, ISSN 2352-4847, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.112.

[38]. S. V. Mitrofanov, P. V. Matrenin and U. A. Sekretarev. «Analysis of the Natural Inflow Short-term Forecasting Models Efficiency to the HPP Site for the Day-ahead Based on Regression Methods and Machine Learning Methods» 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Novosibirsk, Russian Federation, 2023, pp. 1130-1134.

[39]. A. Sauhats, R. Petrichenko, K. Baltputnis, Z. Broka and R. Varfolomejeva. «A multi-objective stochastic approach to hydroelectric power generation scheduling». 2016 Power Systems Computation Conference (PSCC), Genoa, Italy, 2016, pp. 1-7.

[40]. Bilgili, M., Keiyinci, S., Ekinci, F. One-day ahead forecasting of energy production from run-of-river hydroelectric power plants with a deep learning approach. Scientia Iranica, 2022; 29(4): 1838-1852. doi: 10.24200/sci.2022.58636.5825.

[41]. Farmer, J. D., Sidorowich, J. J.: Predicting chaotic time series. Physical Review Letters 8(59), 845-848 (1987).

[42]. Bontempi, Gianluca & Ben Taieb, Souhaib & Le Borgne, Yann-Aël. (2013). Machine Learning Strategies for Time Series Forecasting. 10.1007/978-3-642-36318-4_3.

[43]. Soren Bisgaard, Murat Kulahci Time Series Analysis and Forecasting by Example / Series: Wiley Series in Probability and Statistics Publisher: Wiley, Year: 2011, ISBN: 0470540648,9780470540640,9781118056943,9781118056950.

[44]. Kalita, J. (2022). Machine Learning: Theory and Practice (1st ed.). Chapman and Hall/CRC. https://doi.org/10.1201/9781003002611.

[45]. NASA POWER [electronic source]. – Available: https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/.

[46]. Уровни водохранилищ ГЭС [electronic source]. – Available: https://rushydro.ru/informer/?date=2017-01-04.

Транслитерация по BSI

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА
HYDROGEN ECONOMY

ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА И ПРИВОДЫ НА ВОДОРОДНОМ ТОПЛИВЕ
HYDROGEN FUEL VEHICLES AND ENGINES

Статья поступила в редакцию 05.02.24. Ред. Рег. № 306-002-24 The article has entered in publishing office 05.02.24. Ed. Reg. No 306-002-24

УДК 62-523

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

УВЕЛИЧЕНИЕ ЗАПАСА ХОДА АВТОНОМНОГО БЕЗРЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Вильбергер М. Е., Попов Н. С., Домахин Е. А., Аниброев В. И., Мосин М. Е.

[1] Новосибирский государственный технический университет,
ул. Карла Маркса, 1 20,
Новосибирск, 630073, Россия
E-mail: nikitaa_popov@mail.ru; тел: +7 913 000 78 31.

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.100-115

Заключение совета рецензентов: 19.02.24 Заключение совета экспертов: 21.02.24 Принято к публикации: 27.02.24

В данной статье исследуется возможность повышения энергетической эффективности безрельсового транспортного средства путем использования современных методов управления для контроля остаточного заряда аккумуляторной батареи. Для этого предлагается применение системы управления на основе алгоритма нечеткой логики. Тяговая система данного транспортного средства основана на использовании бесколлекторных двигателей постоянного тока и литионных аккумуляторов, а также включает в себя систему электронного дифференциала. Для проверки эффективности предложенного алгоритма управления было проведено имитационное моделирование в пакете программ MATLAB/Simulink. В ходе моделирования сравнивались результаты работы классической системы стабилизации линейной скорости транспортного средства на базе ПИД-регулятора и системы с использованием алгоритмов нечеткой логики. Для проверки работоспособности разработанного алгоритма управления был создан экспериментальный стенд, на котором были проведены испытания. Результаты имитационного моделирования были сравнены с результатами физических испытаний, что подтверждает эффективность предложенного алгоритма управления.

Ключевые слова: нечеткая логика, электрический транспорт, энергоэффективность, электропривод, запас хода.

Вильбергер М. Е., Попов Н. С., Домахин Е. А., Аниброев В. И., Мосин М. Е. Увеличение запаса хода автономного безрельсового транспортного средства с применением алгоритмов нечеткой логики // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 02 (419) 2024, с. 100-115

Vilberger M. E., Popov N. S., Domakhin E. A., Anibroev V. I., Mosin M. E. Increasing the driving range of an autonomous vehicle using fuzzy logic algorithms // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 02 (419) 2024, pp. 100-115

INCREASING THE DRIVING RANGE OF AN AUTONOMOUS VEHICLE USING FUZZY LOGIC ALGORITHMS

Vilberger M. E., Popov N. S., Domakhin E. A., Anibroev V. I., Mosin M. E.

[1] Novosibirsk State Technical University, Karl Marks st. 20,
Novosibirsk, 630073, Russia
E-mail: nikitaa_popov@mail.ru; tel: +7-913-000-78-31.

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.100-115

Referred: 19.02.24 Received in revised form: 21.02.24 Accepted: 27.02.24

This paper deals with the possibility of improving the energy efficiency of a trackless vehicle by using modern control techniques to control the remaining battery charge. For this purpose, it is proposed to use a control system based on a fuzzy logic algorithm. The traction system of this vehicle is based on the use of brushless DC motors and lithium batteries, and also includes an electronic differential system. To test the effectiveness of the proposed control algorithm, simulation modeling was carried out in the MATLAB/Simulink software package. During the simulation, the results of the operation of a classical vehicle linear speed stabilization system based on a PID controller and a system using fuzzy logic algorithms were compared. To test the performance of the developed control algorithm, an experimental stand was created on which tests were carried out. The simulation results were compared with the physical test results, confirming the effectiveness of the proposed control algorithm.

Keywords: fuzzy logic, electric transport, energy efficiency, electric drive, driving range.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Мосин
Михаил Евгеньевич

Mosin
Mikhail Evgenievich

Сведения об авторе:
аспирант кафедры Электропривода и автоматизации промышленных установок Новосибирского Государственного Технического Университета.

Образование:
магистр по специальности «Электроэнергетика и электротехника», Новосибирский Государственный Технический Университет, г. Новосибирск, Россия, 2021.

Область научных интересов:
электроэнергетика, электротехника, электрические машины, системы управления.

Публикации: 11.
Индекс Хирша: 1.
ORCID: 0000-0003-0245-2652

Information about the author:
PhD student at the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Units of Novosibirsk State Technical University.

Education:
Master of «Electric engineering and electrical technology», Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, 2021.

Research area:
electric engineering, electrical technology, electric machines, control systems.

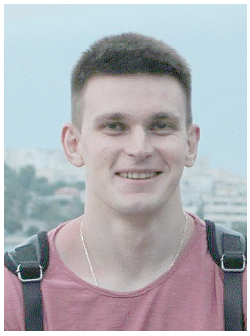
Publications: 11.
H-index: 1.
ORCID: 0000-0003-0245-2652

Попов
Никита Сергеевич

Popov
Nikita Sergeevich

Сведения об авторе:
к.т.н., доцент кафедры Электропривода и автоматизации промышленных установок Новосибирского Государственного Технического Университета.
Образование:
магистр по специальности «Электроэнергетика и электротехника», Новосибирский Государственный Технический Университет, г. Новосибирск, Россия, 2018.
Область научных интересов:
электроэнергетика, электротехника, электрические машины, электрический транспорт.
Публикации: 43.
Индекс Хирша: 1.
Elibrary Author ID: 1084406
Scopus Author ID: 57215016363
ORCID: 0000-0001-8282-6145

Information about the author:
PhD, Associate Professor at the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Units of Novosibirsk State Technical University.
Education:
Master of «Electric engineering and electrical technology», Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, 2018.
Research area:
electric engineering, electrical technology, electric machines, electric transport.
Publications: 43.
H-index: 1.
Elibrary Author ID: 1084406
Scopus Author ID: 57215016363
ORCID: 0000-0001-8282-6145



Домахин
Евгений Александрович

Domakhin
Evgeniy Alexandrovich

Сведения об авторе:
к.т.н., доцент кафедры Электропривода и автоматизации промышленных установок Новосибирского Государственного Технического Университета.
Образование:
магистр по специальности «Электроэнергетика и электротехника», Новосибирский Государственный Технический Университет, г. Новосибирск, Россия, 2018.
Область научных интересов:
электроэнергетика, электротехника, электрические машины, теория автоматического управления.
Публикации: 42.
Индекс Хирша: 2.
Elibrary Author ID: 1125405
Scopus Author ID: 57203246779
ORCID: 0000-0002-7741-9446

Information about the author:
PhD, Associate Professor at the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Units of Novosibirsk State Technical University.
Education:
Master of «Electric engineering and electrical technology», Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, 2018.
Research area:
electric engineering, electrical technology, electric machines, electric transport, theory of automatic control.
Publications: 42.
H-index: 2.
Elibrary Author ID: 1125405
Scopus Author ID: 57203246779
ORCID: 0000-0002-7741-9446

Вильбергер
Михаил Евгеньевич

Vilberger
Mikhail Evgenievich

Сведения об авторе:
к.т.н., доцент кафедры Электромеханики Новосибирского Государственного Технического Университета.
Образование:
магистр по специальности «Электроэнергетика и электротехника», Новосибирский Государственный Технический Университет, г. Новосибирск, Россия, 2001.
Область научных интересов:
электроэнергетика, электротехника, электрические машины, теория автоматического управления.
Публикации: 124.
Индекс Хирша: 2.
Elibrary Author ID: 177083
Scopus Author ID:57196261861
ORCID: 0000-0001-8762-9917

Information about the author:
PhD, Associate Professor at the department of Electromechanics of Novosibirsk State Technical University.
Education:
Master of «Electric engineering and electrical technology», Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, 2001.
Research area:
electric engineering, electrical technology, electric machines, electric transport, theory of automatic control.
Publications: 124.
H-index: 2.
Elibrary Author ID: 177083
Scopus Author ID: 57196261861
ORCID: 0000-0001-8762-9917

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Аниброев Владислав Иванович

Anibroev Vladislav Ivanovich

Сведения об авторе:
аспирант кафедры Электропривода и автоматизации промышленных установок Новосибирского Государственного Технического Университета.

Образование:
магистр по специальности «Электроэнергетика и электротехника», Новосибирский Государственный Технический Университет, г. Новосибирск, Россия, 2021.

Область научных интересов:
электроэнергетика, электротехника, электрические машины, системы управления.

Публикации: 24.
Индекс Хирша: 1.
Scopus Author ID: 57220025233
Researcher ID: AEC-5500-2022
РИНЦ Autor Id: 1126611
ORCID: 0000-0002-6938-5637

Information about the author:
PhD student at the Department ofElectric Drive and Automation of Industrial Units of Novosibirsk State Technical University.

Education:
Master of «Electric engineering and electrical technology», Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, 2021.

Research area:
electric engineering, electrical technology, electric machines, control systems.

Publications: 24.
H-index: 1.
Scopus Author ID: 57220025233
Researcher ID: AEC-5500-2022
РИНЦ AutorId: 1126611
ORCID: 0000-0002-6938-5637

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Список обозначений	
Таблица сокращений	
BLDC	Brushless dc motor
SOC	State of charge
WLTC	Worldwide harmonized light vehicle test cycle
АИН	Автономный инвертор напряжения
АКБ	Аккумуляторная батарея
БНЛ	Блок нечеткой логики
ДН	Датчик напряжения
ЗПТ	Звено постоянного тока
НАМИ	Научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт
ПИ РН	Пропорционально-интегральный регулятор напряжения
ПИД	Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор
ПЭД	Подсистема электронного дифференциала

Буквы латинского алфавита	
e	Величина ошибки регулирования
N	Частота вращения, об/мин
S	Коммутационная функция
T	Температура
Ψ	Величина потокосцепления
I	Величина тока
L	Величина индуктивности
M	Величина крутящего момента
U	Величина напряжения
Z	Число пар полюсов
Буквы греческого алфавита	
t	Временная координата
J	Показатель целевой функции
γ	Скважность
ω Ω,	Частота вращения

Введение

На сегодняшний день основной проблемой электрических транспортных средств является небольшой запас автономного хода по сравнению с традиционными автомобилями, работающими на двигателях внутреннего сгорания. Эта проблема также актуальна для городского общественного транспорта, включая троллейбусы, трамваи и электробусы. Исследования прошлых лет показывают, что интерес к повышению энергоэффективности электрического транспорта растет из года в год. Для решения этой проблемы существуют различные подходы, такие как использование накопителей энергии, гибридных установок, объединяющих несколько источников энергии, и современных систем управления электрическим приводом.

Повышение энергоэффективности транспортных средств – это сложная задача, так как они являются технически сложными системами. При рассмотрении этого вопроса необходимо учитывать взаимосвязь всех подсистем и их функционирование вместе. Большинство экспертов считают, что основной проблемой безрельсового электротранспорта является малый запас хода. Для решения этой проблемы можно использовать современные типы накопителей энергии, гибридные системы или системы управления. Емкость аккумуляторной батареи определяется количеством потребляемой электроэнергии от двигателя постоянного тока. В данном случае нагрузкой является бесщеточный бесколлекторный электродвигатель постоянного тока.

Для проведения оценки параметров аккумуляторной батареи необходимо изучить модели электрических транспортных средств, которые производятся серийно. В таблице 1 приведено сравнение различных

типов таких транспортных средств по характеристикам аккумуляторной батареи. Величина запаса хода была определена в ходе цикла городских испытаний WLTC (Worldwide harmonized light vehicles test cycle).

Таблица 1

Сравнение различных типов электромобилей по параметрам батареи

Table 1

Comparison of different types of electric vehicles by battery parameters

Марка	Модель	Емкость батареи, кВтч	Масса батареи, кг	Тип батареи	Запас хода для цикла WLTC, км
Kia	Soul Electric	27	277	Li-ion	149,64
Kia	Soul EV	32,5	203	Li-ion	155
Chevrolet	Spark EV	18,4	215	Li-ion	131,94
Mercedes	B250e	35	290	Li-ion	139,98
Volkswagen	E-Golf	24,2	313	Li-ion	133,55
Nissan	Leaf	24	295	Li-ion	135,16
BMW	i3	18,8	235	Li-ion	130,33
Tesla	Model S	85	545	Li-ion	426,38
Ford	Focus Electric	23	303	Li-ion	122,28
Nissan	Leaf	24	290	Li-ion	120,67
Mitsubishi	I-MIEV	16	227	Li-ion	99,76

На рисунке 1 была выполнена линейная аппроксимация зависимости запаса хода транспортного средства от емкости батареи методом наименьших квадратов. Результатом этой аппроксимации является значение коэффициента детерминации R^2 равное 0,9859, что говорит о высокой степени точности полученной модели. Согласно проведенной аппроксимации, удельный показатель запаса хода составляет 5,1211 километров на 1 киловатт-час емкости батареи. Это позволяет оценить примерную емкость батареи при заданном запасе хода. Для достижения требуемого запаса хода в 150 километров необходимо учесть среднее значение запаса хода для проанализированных в работе электрических транспортных средств, представленное в таблице 1. Средний пробег автомобиля в день составляет от 50,8 до 65,2 километров.

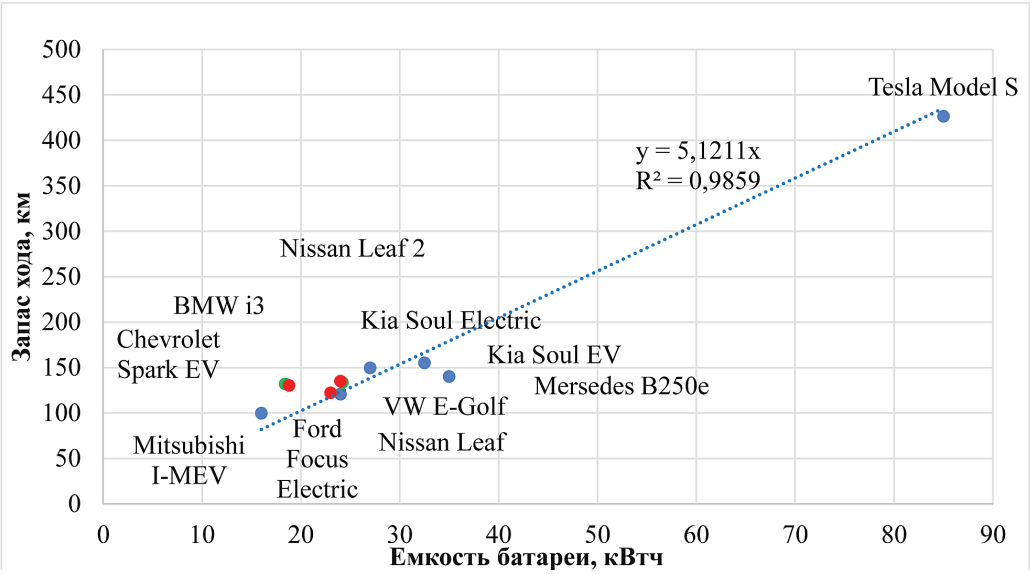


Рис. 1. Зависимость запаса хода транспортного средства от емкости батареи
Fig. 1. Dependence of the power reserve of the vehicle on the battery capacity

Ученые предлагают способ снижения пиковых токов на аккумуляторной батарее во время зарядки и разрядки путем использования суперконденсаторов в составе композитного источника питания. Различные стратегии управления энергопотреблением в гибридных и электрических автомобилях обычно основа-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ны на строгих правилах и оптимизации параметров. Различные системы управления преобразователями имеют свои преимущества и недостатки, которые обсуждаются в соответствующих источниках. Одна из таких систем – это управление потоками энергии, которое используется для поддержания постоянных значений напряжения и тока, используя фильтр нижних частот на основе нечеткого логического контроллера и адаптивный пропорциональный интегральный контроллер заряда. Это помогает предотвратить перезарядку суперконденсаторов и в целом увеличивает срок службы и производительность батареи. Также была предложена адаптивная система диспетчерского управления энергопотреблением на основе нечеткой логики, использующая параллельную активную топологию.

Различные методы накопления энергии применяются для классических и подключаемых к сети гибридов, а также для улучшения зарядки аккумуляторов. Исследования были проведены по нескольким стратегиям управления для гибридов и детальному изучению системы управления потоками энергии для преобразования традиционных транспортных средств в гибридные с возможностью подключения в сеть. Использование нечеткой логики позволяет эффективно управлять двигателем и снижать энергопотребление встраиваемых батарей. Работа Гао Чжао и Цзянь и др. была направлена на улучшение состояния батареи и контроль тока разряда батареи. Оптимизация функции принадлежности алгоритма нечеткой логики для гибридных и электрических транспортных средств была выполнена методом отсечения по «золотому» соотношению. Несколько нечетких теорий, включая нечеткую классификацию, нечеткую диагностику и их приложения, представлены в [10].

Ученые Хайер Марзуги и другие использовали нечеткий регулятор для создания алгоритма, основанного на правилах, которые применяли для распределения требований к мощности между различными источниками и нагрузками в гибридных и электрических транспортных средствах. Они игнорировали потери преобразователя. Это позволяло контролировать равномерность использования топливных элементов и суперконденсаторов. Такая система контроля гибкая и не требует заранее определенной траектории движения транспортного средства, однако ее стоимость высока. В другом исследовании ученые стремились уменьшить колебания тока батареи, используя условия Каруша-Куна-Таккера для управления потоком мощности от суперконденсаторов. Было проведено исследование нескольких алгоритмов управления, включая алгоритмы на основе правил и алгоритмы на основе оптимизации. Алгоритмы на основе правил и на основе оптимизации являются наиболее важными для систем распределения энергии на гибридных транспортных средствах.

2. Основная часть

2.1 Система стабилизации линейной скорости движения

Исследования литературы [13, 14, 15] показали, что для стабилизации линейной скорости транспортного средства используется система стабилизации скорости с ПИД-регулятором, который основан на эмпирическом подходе и имеет строгое математическое описание. Этот метод широко применяется в различных областях. Каждая составляющая регулятора (пропорциональная, интегральная и дифференциальная) выполняет свою функцию, влияя на работу системы. Пропорциональная составляющая отвечает за текущее время и реагирует на текущую ошибку регулирования. Дифференциальная составляющая определяет будущее и реагирует на тенденцию изменения ошибки. Интегральная составляющая отвечает за прошлое и накапливает предыдущие ошибки, сглаживая высокочастотные шумы.

Эти элементы объединяются вместе и создают управляющий сигнал на входе системы. Регуляторы ПИД очень эффективны в управлении разными объектами и процессами, включая системы стабилизации скорости транспорта. На рисунке 2 показана схема работы алгоритма стабилизации линейной скорости движения безрельсового транспортного средства с использованием регулятора ПИД.

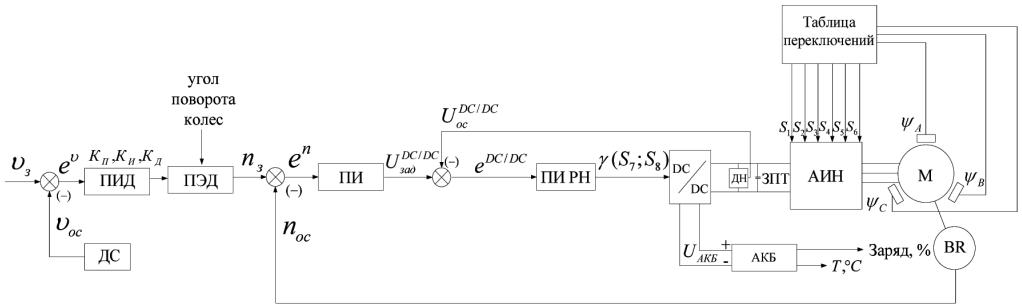


Рис. 2. Функциональная схема алгоритма стабилизации линейной скорости движения безрельсового транспортного средства с применением ПИД-регулятора

Fig. 2. Functional diagram of the algorithm for stabilizing the linear speed of a trackless vehicle using a PID controller

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Вся система питания функционирует через блок аккумуляторной батареи (АКБ). Для согласования уровней напряжения между звеном постоянного тока (ЗПТ) и АКБ используется DC-DC преобразователь. Блок АКБ состоит из аккумуляторов и системы управления. Система стабилизации скорости включает в себя три контура регулирования. Внешний контур регулирования – это контур стабилизации линейной скорости транспортного средства на основе ПИД-регулятора. Сигнал задания передается с акселератора, а сигнал обратной связи – с датчика линейной скорости транспортного средства. Следующим подчиненным ему контуром является контур стабилизации угловой частоты вращения мотор-колеса (или контур регулирования оборотов). Сигнал задания передается с выхода подсистемы электронного дифференциала ПЭД, а сигнал обратной связи – с датчика угловой частоты вращения-BR. Подсистема электронного дифференциала корректирует сигнал задания, поступающий с ПИД-регулятора, в зависимости от угла поворота колес. Блок преобразования скорости транспортного средства представляет собой систему математических уравнений, описывающих преобразование скорости движения контрольной точки в угловую скорость движения каждого колеса. В этом блоке может быть заложено преобразование для любой конфигурации колёсной базы: одноколёсной, дифференциальной, автомобильной, с расчётом электрического дифференциала и так далее. Полученные сигналы с данными о желаемой скорости вращения колёс подаются на систему управления электроприводами этих колёс, где осуществляется управление электрическими машинами, установленными в транспортном средстве. Внутренний контур регулирования – это контур стабилизации напряжения ЗПТ на базе ПИ-регулятора напряжения ПИ РН. В качестве сигнала задания выступает сигнал с выхода ПИ-регулятора угловой частоты вращения мотор – колеса, а в качестве сигнала обратной связи – сигнал с датчика напряжения ДН звена постоянного тока. Выходным сигналом регулятора ПИ РН является скважность γ, необходимая для формирования коммутационных функций S_7 и S_8 алгоритма переключения ключей DC-DC преобразователя. Переключение ключей АИН выполняется за счет таблицы переключений в функции углового положения ротора BLDC, при этом формируются коммутационные функции S_1 – S_6 на соответствующие ключи АИН. Угловое положение ротора BLDC оценивается при помощи трех датчиков Холла H_1 – H_3, установленных в каждой фазе двигателя и выполняющих измерение потокосцеплений Ψ_A, Ψ_B, Ψ_C.

Система управления безрельсовым транспортным средством имеет сложную структуру, включающую множество компонентов с различными характеристиками, которые могут меняться в широком диапазоне. Это создает проблемы при попытке создать обратную модель процесса, которая бы обеспечивала приемлемое качество работы системы в любых режимах работы объекта управления. Однако преимущества такой системы заключаются в возможности учета характеристик компонентов безрельсового транспортного средства в различных режимах его работы, а также в возможности формализации законов управления для каждого отдельного режима работы в виде набора правил. Кроме того, система обладает способностью к автонастройке, что позволяет применять законы нечеткой логики в разработке системы управления безрельсовым транспортным средством.

Функциональная схема алгоритма стабилизации линейной скорости движения безрельсового транспортного средства с применением нечеткой логики представлена на рисунке 3.

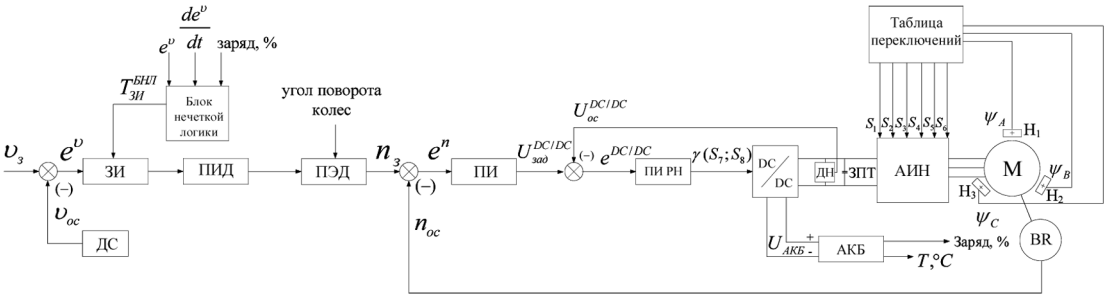


Рис. 3. Функциональная схема алгоритма стабилизации линейной скорости движения безрельсового транспортного средства с применением нечеткой логики

Fig. 3. Functional diagram of the algorithm for stabilizing the linear speed of a trackless vehicle using fuzzy logic

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Система управления с ПИД-регулятором, представленная на рисунке 2, дополнена задатчиком интенсивности ЗИ с настраиваемой постоянной времени $T_{ЗИ}^{БНЛ}$, управляемым блоком нечеткой логики БНЛ. В системе возможны три режима работы: экономичный (ECO), нормальный (NORMAL) и динамичный (FAST).

Блок нечеткой логики БНЛ выполняет функцию контроля за режимами работы системы стабилизации линейной скорости безрельсового транспортного средства. Он воздействует на время задатчика интенсивности и автоматически переводит всю систему стабилизации линейной скорости в экономичный режим для увеличения запаса хода безрельсового транспортного средства. Кроме того, блок нечеткой логики БНЛ сохраняет динамические характеристики автомобиля и при необходимости может перевести систему управления безрельсового транспортного средства в нормальный или динамичный режим работы. Входными сигналами для БНЛ являются сигнал e^{υ}, $\frac{de^{\upsilon}}{dt}$ и заряд АКБ, значение которого поступает с системы управления АКБ. Выходной сигнал БНЛ – это постоянная времени задатчика интенсивности $T_{ЗИ}^{БНЛ}$, вычисление которой производится алгоритмами БНЛ, оптимизированными на увеличение запаса хода безрельсового транспортного средства.

Система функционирует в режиме, обеспечивающем сохранение заданной скорости движения безрельсового транспортного средства. Если возникает сигнал о нарушении задания скорости или линейной скорости электромобиля, включается алгоритм стабилизации скорости. Этот алгоритм использует блок нечеткой логики БНЛ для управления скоростью движения безрельсового транспортного средства. Режим работы системы стабилизации скорости зависит от текущих параметров движения и уровня заряда аккумулятора.

Регулятор выполнен на базе модели Мамдани (метод активации – min) с тремя входами (Сигнал ошибки регулирования e^{υ}, первая производная по ошибке регулирования $\frac{\Delta e^{\upsilon}}{\Delta t}$ и заряд АКБ SOC, %) и одним выходом (output). Метод агрегирования осуществляется операцией min-конъюнкции. Аккумуляция заключений правил реализована с помощью метода max-дизъюнкции. Каждая из входных переменных описывается тремя лингвистическими правилами. В структуре регулятора при этом присутствуют следующие термы, например для переменной e^{υ}: PH – positivehigh, «ошибка положительная высокая»; M – minor, «незначительная»; NH – negativehigh, «ошибка отрицательная высокая».

Если правило гласит, что если входная переменная принадлежит к одному из множества классов, то выходная переменная также должна принадлежать к этому множеству. Форма функции принадлежности может быть разной. В данном случае были использованы треугольные функции принадлежности при моделировании в MATLAB/Simulink. Методом дефаззификации был выбран метод центра тяжести. База лингвистических правил регулятора представлена в таблице 2. Настройка выполнялась путем итерационного моделирования, сначала была выполнена грубая настройка с помощью редактирования правил, затем тонкая настройка с помощью изменения параметров функций принадлежности. Целью настройки является минимизация расхода энергии при движении транспортного средства по испытательному циклу. Целевая функция расхода энергии имеет следующий вид:

$$J = \int_0^{t_{пол}} I^2 dt \rightarrow min, \quad (1)$$

где $t_{пол}$ – время прохождения цикла; I – ток двигателя.

Оптимизация выполнялась в программном пакете MATLAB/Simulink.

Таблица 2

База лингвистических правил нечеткого регулятора

Table 2

The base of linguistic rules of the fuzzy controller

№	Сигнал ошибки регулирования e^{υ}	Первая производная по ошибке регулирования $\frac{\Delta e^{\upsilon}}{\Delta t}$	Заряд АКБ SOC, %	Выход регулятора
1	PH	M	–	FAST
2	NH	M	–	FAST
3	PH	$\overline{NH}$	HIGH	NORMAL

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

4	PH	NH	LOW	ECO
5	M	NH	–	ECO
6	M	NM	HIGH	FAST
7	M	M	AVERAGE	NORMAL
8	M	M	LOW	ECO
9	M	PH	HIGH	NORMAL
10	M	PH	AVERAGE	NORMAL
11	M	PH	LOW	ECO

Функции принадлежности ошибки регулирования, первой производной ошибки регулирования, остаточного заряда аккумуляторной батареи и выхода нечеткого регулятора представлены на рисунках 4 соответственно.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

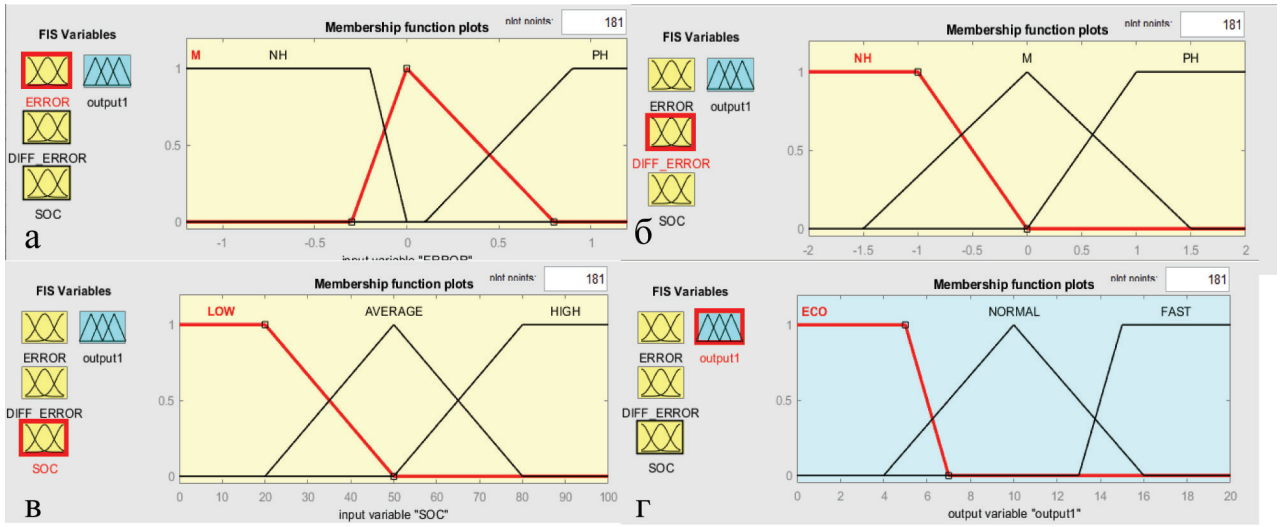
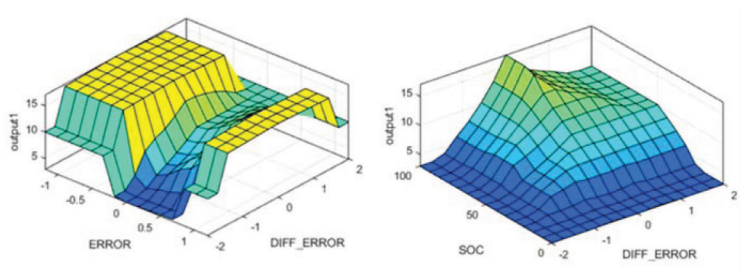


Рис. 4. Функция принадлежности: а) ошибки регулирования; б) производной ошибки регулирования; в) остаточного заряда аккумуляторной батареи; г) выхода нечеткого регулятора
Fig. 4. Accessory function: a) control error; b) derivative control error; c) residual battery charge; d) fuzzy controller output

В тексте описывается построение трехмерных поверхностей отклика для различных форм функций принадлежности. На этих поверхностях отображаются значения входных переменных, таких как сигнал ошибки регулирования и его первая производная, а также первая производная по ошибке регулирования и остаточный заряд аккумуляторной батареи. Значения выходной переменной отображаются по вертикальным осям в обоих случаях. Всего было создано шесть вариантов поверхностей отклика, так как на вход подаются три различные переменные.



а б

Рис. 5. Поверхность отклика: а) сигнала ошибки регулирования и ее первой производной; б) первой производной по ошибке регулирования и остаточный заряд аккумуляторной батареи
Fig. 5. The response surface: a) the control error signal and its first derivative; b) the first derivative of the control error and the remaining charge of the battery

2.2 Сравнительный анализ алгоритмов

Испытательный цикл с изменением продольного профиля дорожного полотна представлен на рисунке 6. Были проведены испытания для трех значений линейной скорости: 40, 60 и 100 км/ч. Для каждой скорости было выполнено имитационное моделирование при четырех различных значениях заряда аккумуляторной батареи: 100, 75, 50 и 25 %. Далее приведены переходные процессы по скорости, пройденной дистанции и остаточному заряду батарей для скорости 100 км/ч и заряде батареи 75 % и при скорости 40 км/ч и заряду батареи 25 % для системы с ПИД-регулятором и нечетким регулятором.

Рис. 6. Продольный профиль дорожного полотна испытательного цикла
Fig. 6. Longitudinal profile of the roadway of the test cycle

Таблица 3

Результаты имитационного моделирования прохождения цикла при разных скоростях и зарядах аккумуляторной батареи на старте

Table 3

The results of simulation simulation of the cycle at different speeds and battery charges at the start

Испытания на скорости 100 км/ч							
Заряд АКБ, %	Время ПИД, с	Время fuzzy, с	Остаточный заряд АКБ ПИД, %	Расход, %	Остаточный заряд АКБ fuzzy, %	Расход, %	Экономия, %
25	146,93	155,28	18,82	6,18	19,02	5,98	3,31
50	146,93	153,11	44,09	5,91	44,24	5,76	2,55
75	146,93	149,55	69,30	5,70	69,39	5,61	1,58

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

100	146,93	148,24	94,30	5,70	94,22	5,62	1,41
Испытания на скорости 60 км/ч							
Заряд АКБ, %	Время ПИД, с	Время fuzzy, с	Остаточный заряд АКБ ПИД, %	Расход, %	Остаточный заряд АКБ fuzzy, %	Расход, %	Экономия, %
25	243,14	251,24	21,22	3,78	21,42	3,58	5,29
50	243,14	247,11	46,16	3,84	46,35	3,65	4,94
75	243,14	246,58	71,06	3,94	71,21	3,79	3,88
100	243,14	246,11	96,06	3,94	96,14	3,86	2,14
Испытания на скорости 40 км/ч							
Заряд АКБ, %	Время ПИД, с	Время fuzzy, с	Остаточный заряд АКБ ПИД, %	Расход, %	Остаточный заряд АКБ fuzzy, %	Расход, %	Экономия, %
25	363,38	371,40	21,91	3,09	22,13	2,87	7,12
50	363,38	370,35	46,83	3,17	47,02	2,98	6,05
75	363,38	369,58	71,77	3,22	71,94	3,06	4,89
100	363,38	368,94	96,77	3,22	96,88	3,12	3,17

Анализ таблицы 3 позволяет сделать вывод, что для каждого из рассмотренных значений скорости максимальная экономия достигается при минимальном заряде аккумуляторной батареи. Значение экономии, рассчитанное по формуле:

Расчет экономии заряда аккумуляторной батареи ΔS осуществляется по следующей формуле:

$$\Delta S = \frac{S_{fuzzy} - S_{PID}}{S_{PID}} \cdot 100\%,$$

где S_{fuzzy} – расход заряда аккумуляторной батареи для системы с нечетким регулятором; S_{PID} – расход заряда аккумуляторной батареи для системы с ПИД – регулятором и находится в диапазоне от 1,41 до 7,12%

Также, имитационное моделирование осуществлялось для испытательного цикла WLTC, результаты которого приведены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты имитационного моделирования прохождения цикла WLTC при разных зарядах аккумуляторной батареи на старте

Table 4

The results of simulation simulation of the WLTC cycle at different battery charges at the start

Заряд АКБ, %	Остаточный заряд АКБ ПИД, %	Затраченный заряд АКБ ПИД, %	Остаточный заряд АКБ fuzzy, %	Затраченный заряд АКБ fuzzy, %	Экономия, %
25	20,62	4,38	21,76	3,24	4,11
50	45,92	4,02	46,14	3,86	4,02
75	71,05	3,95	71,21	3,79	3,92
100	96,04	3,96	96,19	3,81	3,90

3. Экспериментальный стенд

Испытательный стенд состоит из следующих компонентов: цифровой педали, процессора Arduino Mega (AM), бесколлекторного двигателя постоянного тока компании Golden Motor HPM10-20KW (M), контроллера HPC500H, который включает в себя автономный инвертор напряжения. Преобразователь имеет внутренние датчики для мониторинга и изучения режимов работы привода, а также нагрузочную машину Magtrol (Hysteresis Dynamometer) HM, которая является гистерезисным тормозом. Для питания используется программируемый источник постоянного тока Sorensen DLM 16-185E, персональный ком-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

пьютер (ПК), система управления батареей (BMS), аккумуляторная батарея (АКБ), тормозной резистор ТР и датчики Холла Н1-Н3. Внешний вид данной установки изображен на рисунке 7.

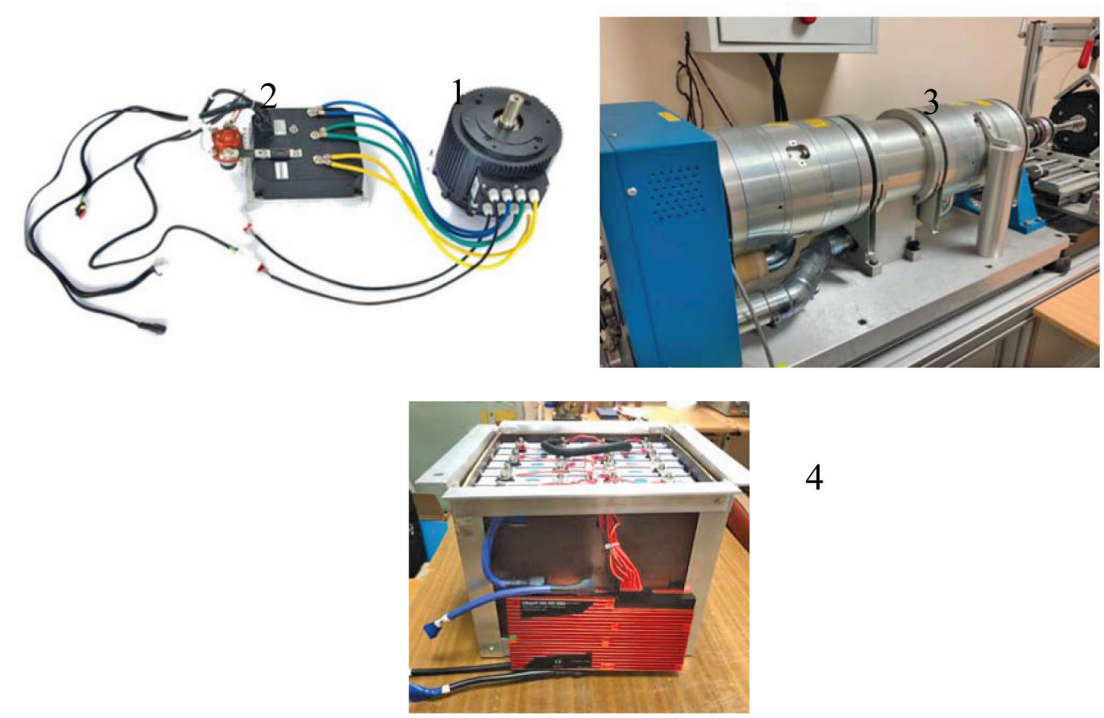
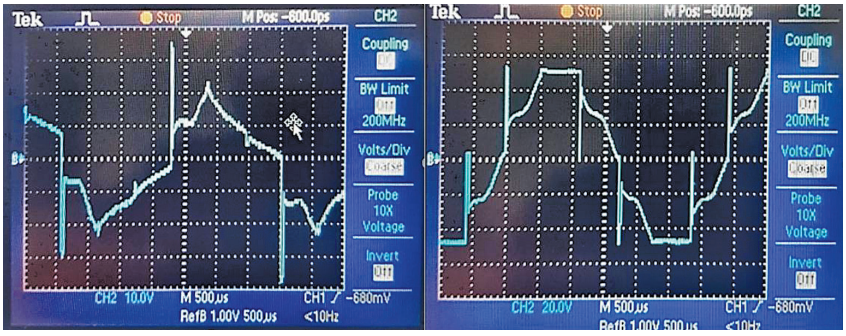


Рис. 7. Часть испытательного стенда:
1 – электродвигатель Golden Motor HPM10-20KW; 2 – контроллер HPC500H; 3 – нагрузочная машина;
4 – реализованный бокс для хранения тяговой аккумуляторной сборки
Fig. 7. Part of the test bench:
1 – Golden Motor HPM10-20KW electric motor; 2 – HPC500H controller;
3 – loading machine; 4 – implemented storage box for traction battery assembly

В ходе проведения испытаний силовой установки транспортного средства, были получены осциллограммы напряжения на выходе контроллера HPC500H, представленные на рисунке 8.



а б

Рис. 8. Осциллограммы напряжения на выходе контроллера:
а – фазное напряжение; б – линейное напряжение
Fig. 8. Voltage waveforms at the controller output:
a – phase voltage; b – line voltage

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

На программируемом источнике постоянного тока создается нагрузка, аналогичная испытательному циклу, представленному на рисунке 3. Программное обеспечение Motor Control System формирует множество архивов данных, включающих значение угловой частоты вращения, пересчитанной в линейную скорость, и значение заряда в определенные моменты времени. Эти данные используются для построения зависимостей остаточного заряда аккумуляторной батареи и линейной скорости от времени. На рисунках 9 и 10 приведены характеристики, полученные из этих архивов данных, которые отображают зависимости линейной скорости и заряда аккумуляторной батареи от времени при прохождении испытательного цикла для значений скорости 100 и 40 км/ч и заряда 75 и 25 % соответственно, для системы с ПИД-регулятором и нечетким регулятором.

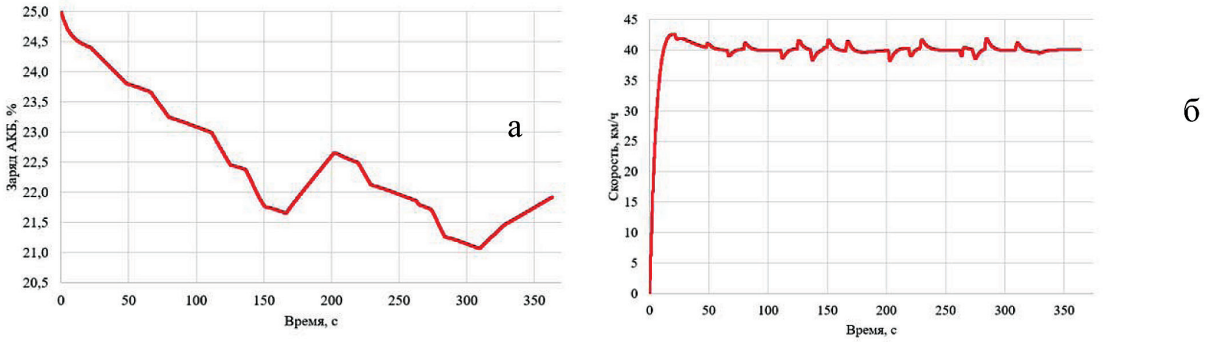


Рис. 9. а) Остаточный заряд батареи б) Линейная скорость транспортного средства при прохождении испытательного цикла при начальном заряде 25 % и скорости движения 40 км/ч для системы с ПИД-регулятором

Fig. 9. a) The remaining battery charge b) The linear speed of the vehicle during the test cycle at an initial charge of 25 % and a driving speed of 40 km/h for a system with a PID controller

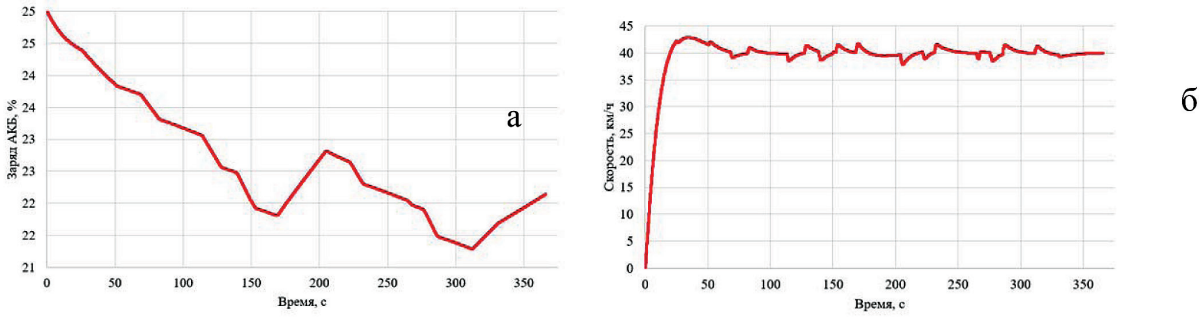


Рис. 10. а) Остаточный заряд батареи б) Линейная скорость транспортного средства при прохождении испытательного цикла при начальном заряде 25 % и скорости движения 40 км/ч для системы с нечетким регулятором

Fig. 10. a) Residual battery charge b) Linear speed of the vehicle during the test cycle with an initial charge of 25% and a driving speed of 40 km/h for a system with a fuzzy controller

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

В таблице 5 представлен полный цикл результатов моделирования (М) и результатов эксперимента (Э).

Таблица 5

Количественное сравнение результатов моделирования и эксперимента

Table 5

Quantitative comparison of simulation and experimental results

Испытания на скорости 100 км/ч					
Заряд АКБ, %	Время ПИД, с М/Э	Время fuzzy, с М/Э	Расход ПИД, % М/Э	Расход fuzzy, % М/Э	Экономия, % М/Э
25	146,93/148,5	155,28/157	6,18/6,21	5,98/6,02	3,31/2,90
50	146,93/148	153,11/154	5,91/6,33	5,76/6,20	2,55/2,22
75	146,93/147,5	149,55/150,5	5,70/5,84	5,61/5,77	1,58/1,38
100	146,93/147,5	148,24/149,5	5,70/5,88	5,62/5,78	1,41/1,25
Испытания на скорости 60 км/ч					
Заряд АКБ, %	Время ПИД, с М/Э	Время fuzzy, с М/Э	РасходПИД, % М/Э	Расход fuzzy, % М/Э	Экономия, % М/Э
25	243,14/246,5	251,24/254	3,78/4,01	3,58/3,88	5,29/4,98
50	243,14/246	247,11/250,5	3,84/4,14	3,65/3,94	4,94/4,67
75	243,14/246	246,58/248	3,94/4,22	3,79/4,08	3,88/3,62
100	243,14/245,5	246,11/247,5	3,94/4,27	3,86/4,15	2,14/2,01
Испытания на скорости 40 км/ч					
Заряд АКБ, %	Время ПИД, с М/Э	Время fuzzy, с М/Э	РасходПИД, % М/Э	Расход fuzzy, % М/Э	Экономия, % М/Э
25	363,38/368,5	371,40/378,5	3,09/3,21	2,87/3,08	7,12/6,89
50	363,38/367	370,35/376,5	3,17/3,32	2,98/3,21	6,05/5,91
75	363,38/366,5	369,58/375,5	3,22/3,42	3,06/3,31	4,89/4,70
100	363,38/366	368,94/375	3,22/3,45	3,12/3,32	3,17/3,06

4. Выводы

В результате проведённых исследований были получены научно обоснованные решения по увеличению энергетической эффективности системы тягового электропривода безрельсового транспортного средства. Синтезированы система стабилизации линейной скорости безрельсового транспортного средства для бесколлекторных двигателей постоянного тока с применением алгоритма нечёткой логики с оптимизацией энергопотребления при движении по испытательному циклу и циклу движения WLTC. Создана экспериментальная модель, которая представляет собой физическое подобие безрельсового транспортного средства. Выполнена интеграция разработанных алгоритмов в физическую модель и проведены экспериментальные исследования по предложенной методике при движении по испытательному циклу.

Моделирование процесса испытания транспортного средства НАМИ с использованием алгоритма нечеткой логики и оптимизации энергопотребления показало, что процентное отклонение составляет от 1,41 % до 7,12 %, в то время как при использовании ПИД-регулятора в контуре стабилизации скорости движения этот показатель составляет от 3,9 % до 4,11 %. Это говорит о том, что применение нечеткого алгоритма с оптимизацией энергопотребления позволяет достичь более высокой энергетической эффективности транспортного средства. Результаты экспериментальных исследований подтверждают, что использование данного подхода может быть полезно при проектировании различных типов электрических транспортных средств, которые будут использоваться в городских, загородных и смешанных циклах движения.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Список литературы:

[1]. Джон Г. С. Вождение электромобиля с увеличенным запасом хода и поведение при зарядке, наблюдаемое на ранних этапах проекта EV / Джон Г. Смарт, Уоррен Б. Пауэлл // Конференция: Всемирный конгресс SAE 2013, Проект EV, DOI: 10.4271/2013-01-1441

[2]. Льв, Ю.-М.; Юань, Х.-В.; Лю, Ю.-Ю.; Ван, К.-С. Система управления энергопотреблением композитного источника питания аккумулятор-ультраконденсатор для гибридных электромобилей на основе нечеткой логики. В материалах Первой международной конференции 2010 г. по всеобъемлющим вычислениям, обработке сигналов и приложениям, Харбин, Китай, 17–19 сентября 2010 г.; стр. 1209-1214.

[3]. Сатишкумар П.; Пяо С.; Хан М.А.; Ким Д.Х.; Ким М.С.; Чон Д.К.; Ли С.; Ким Х. Дж. Преобразователь DAB-IBDC со смешанным управлением SPS-ESPS для автономной солнечной энергосистемы. Энергии 2017, 10, 1431.

[4]. Хусейн С.; Али М.У.; Парк Г.-С.; Ненгру С.Х.; Хан М.А.; Ким Х.-Дж. Биадаптивная система управления энергопотреблением в реальном времени на базе контроллера для гибридных электромобилей с аккумулятором и суперконденсатором. Энергии. – 2019, 12, 4662.

[5]. Инь Х.; Чжоу В.; Ли М.; Ма С.; Чжао С. Адаптивная система управления энергопотреблением на основе нечеткой логики в гибридных электромобилях с аккумулятором и ультраконденсатором. IEEE Транс. Трансп. Электриф. 2016, 2, 300–311.

[6]. Хан М.А.; Кришна Т. Н. В.; Сатишкумар П.; Сарат Г.; Ким Х.-Дж. Гибридный источник питания с нечеткой стратегией быстрой зарядки для мобильных роботов. В материалах Международной конференции по робототехнике информационных и коммуникационных технологий (ICT-ROBOT 2016), Пусан, Корея, 7-9 сентября 2016 г.

[7]. Али М.У.; Камран М.А.; Кумар П.С.; Химаншу; Ненгру С.Х.; Хан М.А.; Хусейн А.; Ким Х.-Дж.Онлайн-идентификация модели на основе данных и адаптивный подход к оценке состояния заряда литий-ионных аккумуляторов с использованием метода множителей Лагранжа. Энергии 2018, 11, 2940.

[8]. Салмаси Ф. Р. Стратегии управления гибридными электромобилями: эволюция, классификация, сравнение и будущие тенденции. IEEE Транс. Вех. Технол. 2007, 56, 2393-2404.

[9]. Гао С.; Чжао Дж.; Ву Дж.; Хао Х. Оптимальная система управления энергией на основе нечеткой логики гибридной системы хранения энергии аккумулятор/суперконденсатор для электромобилей. В материалах 12-го Всемирного конгресса по интеллектуальному управлению и автоматизации (WCICA) 2016 г., Гуйлинь, Китай, 12–15 июня 2016 г.; стр. 98-102.

[10]. Хеллендорн Х.; Палм Р. Нечеткие системные технологии в отделе исследований и разработок Siemens. Fuzzy Sets Syst. 1994, 63, 245–269.

[11]. Марзуги Х.; Кадри А.; Мартин Ж.-П.; Амари М.; Пьерфедеричи С.; Бача Ф. Внедрение системы энергоменеджмента гибридного источника питания для электромобилей. Конверторы энергии. Менеджер. 2019, 195, 830-843.

[12]. Инь Х.; Чжао С.; Ли М.; Ма К. Оптимизация управления энергией для гибридных систем хранения энергии аккумулятор/SC. В материалах IECON 2013–39-й ежегодной конференции Общества промышленной электроники IEEE, Вена, Австрия, 10–13 ноября 2013 г.; стр. 6764-6769.

[13]. Мд Махмуд Управление скоростью двигателя BLDC с помощью ПИД-регулятора / Мд Махмуд, С.М.А. Мотакаббер, А. Х. М. Захирул Алам, Анис Нурашикин Нордин // (IJACSA) Международный журнал передовых компьютерных наук и приложений, Vol. 11, № 3, – 2020.

[14]. Аманда Даниэль О. да С. Дантас, Андре Фелипе О. де А. Дантас, Жоао Тьяго Л. С. Кампос, Домингуш Л. де Алмейда Нето и Карлос Эдуардо Т.ПИД-регулирование Dórea для электромобилей, на которые распространяются ограничения по сигналу управления и скорости, получено 1 июня 2018 г.; Принял 19 июля 2018 г.; Опубликовано 1 августа 2018 г.

[15]. Муньянеза О. Проектирование управления скоростью для системы транспортного средства с использованием нечеткой логики и ПИД-регулятора / Оливье Муньянеза, Бернард Б. Муньязиквие, Хамид Реза Карими // Материалы Международной конференции по нечеткой теории и ее приложениям 2015 г. (iFUZZY), The Evergreen Resort Hotel (Jiaosi)), Илань, Тайвань, 18-20 ноября – 2015 г.

[16]. Макаров И. М. Искусственный интеллект. и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров, В. М. Лохин, С. В. Манько, М. П. Романов; Отделение информ. технологии и числа. система РАН. – М.: Наука, 2006 – 334 с.

[17]. Круг Е. К. Цифровые нормативы: научное издание / Е. К. Круг, Т. М. Александриди, С. Н. Дилигенский. – Москва; Ленинград: Энергия, 1966 – 504 с.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Referenses:

[1]. Smart J. G. Extended Range Electric Vehicle Driving and Charging Behavior Observed Early in the EV Project / John G. Smart, Warren B. Powell // Conference: SAE World Congress 2013, The EV Project, DOI:10.4271/2013-01-1441

[2]. Lv, Y. -M.; Yuan, H. -W.; Liu, Y. -Y.; Wang, Q. -S. Fuzzy logic-based Energy management system of battery-ultracapacitor composite power supply for HEV. In Proceedings of the 2010 First International Conference on Pervasive Computing, Signal Processing and Applications, Harbin, China, 17-19 September 2010; pp. 1209-1214.

[3]. Sathishkumar P.; Piao S.; Khan M. A.; Kim D. H.; Kim M. S.; Jeong D. K.; Lee C.; Kim H. J. A Blended SPS-ESPS Control DAB-IBDC Converter for a Standalone Solar Power System. Energies 2017, 10, 1431.

[4]. Hussain S.; Ali M.U.; Park G. -S.; Nengroo S. H.; Khan M. A.; Kim H. -J. A Real-Time Bi-Adaptive Controller-Based Energy Management System for Battery–Supercapacitor Hybrid Electric Vehicles. Energies. – 2019, 12, 4662.

[5]. Yin H.; Zhou W.; Li M.; Ma C.; Zhao C. An adaptive fuzzy logic-based Energy management system on battery / ultracapacitor hybrid electric vehicles. IEEE Trans. Transp. Electrif. 2016, 2, 300-311.

[6]. Khan M. A.; Krishna T. N. V.; Sathishkumar P.; Sarat G.; Kim H. -J. A hybrid power supply with fuzzy controlled fast charging strategy for mobile robots. In Proceedings of the International Conference on Information and Communication Technology Robotics (ICT-ROBOT 2016), Busan, Korea, 7-9 September, 2016.

[7]. Ali M. U.; Kamran M. A.; Kumar P. S.; Himanshu; Nengroo S. H.; Khan M. A.; Hussain A.; Kim H. -J. An Online Data-Driven Model Identification and Adaptive State of Charge Estimation Approach for Lithium-ion-Batteries Using the Lagrange Multiplier Method. Energies 2018, 11, 2940.

[8]. Salmasi F. R. Control strategies for hybrid electric vehicles: Evolution, classification, comparison, and future trends. IEEE Trans. Veh. Technol. 2007, 56, 2393-2404.

[9]. Gao C.; Zhao J.; Wu J.; Hao X. Optimal fuzzy logic-based Energy management system of battery/supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles. In Proceedings of the 2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), Guilin, China, 12–15 June 2016; pp. 98-102.

[10]. Hellendoorn H.; Palm R. Fuzzy system technologies at Siemens R & D. Fuzzy Sets Syst. 1994, 63, 245-269.

[11]. Marzougui H.; Kadri A.; Martin J. -P.; Amari M.; Pierfederici S.; Bacha F. Implementation of Energy management system of hybrid power source for electrical vehicle. Energy Convers. Manag. 2019, 195, 830-843.

[12]. Yin H.; Zhao C.; Li M.; Ma C. Optimization based energy control for battery/SC hybrid energy storage systems. In Proceedings of the IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, Austria, 10–13 November 2013; pp. 6764-6769.

[13]. Md Mahmud Control BLDC Motor Speed using PID Controller / Md Mahmud, S. M. A. Motakabber, A. H. M. Zahirul Alam, Anis Nurashikin Nordin // (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 11, № 3, – 2020.

[14]. Amanda Danielle O. da S. Dantas, André Felipe O. de A. Dantas, João Tiago L. S. Campos, Domingos L. de Almeida Neto , and Carlos Eduardo T. Dórea PID Control for Electric Vehicles Subject to Control and Speed Signal Constraints Received 1 June 2018; Accepted 19 July 2018; Published 1 August 2018.

[15]. Munyaneza O. Speed control design for a vehicle system using fuzzy logic and PID controller / Olivier Munyaneza, Bernard B. Munyazikwiye, Hamid Reza Karimi // Proceedings of 2015 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY) The Evergreen Resort Hotel (Jiaosi), Yilan, Taiwan, Nov. 18-20, – 2015.

[16]. Makarov I. M. Iskusstvennyy intellekt i intellektual'nyye sistemy upravleniya / I. M. Maka- rov, V. M. Lokhin, S. V. Man'ko, M. P. Romanov; Otdeleniye inform. tekhnologiy i vychisl. sistem RAN. – M.: Nauka, 2006 – 334 s.

[17]. Krug Ye. K. Tsifrovyye regulyatory: nauchnoye izdaniye / Ye. K. Krug, T. M. Aleksandridi, S. N. Dili- genskiy. – Moskva; Leningrad: Energiya, 1966, 504 s.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭНЕРГЕТИКИ
ENVIRONMENTAL ASPECTS OF ENERGY

ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ

ENERGY AND ECOLOGY

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕГАПОЛИСОВ

ECOLOGICAL PROBLEMS OF INDUSTRIAL MEGAPOLISES

Статья поступила в редакцию 15.02.24 Ред. Рег. № 299-002-24 The article has entered in publishing office 15.02.24 Ed. Reg. No. 299-002-24

УДК 620.91:621.22 (075.8)

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ ИНВЕРТОРОВ С МОДУЛЯЦИЕЙ МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПИТАНИЯ ОТ ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Мятеж С. В., Лисицын П. С.

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, 630073, Россия, ул. Карла Маркса 20,
Тел. +7-923-118-75-33, serg_y_7578@mail.ru, +7-923-150-14-46, nik-nokia@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.116-133

Заключение совета рецензентов: 21.02.24 Заключение совета экспертов: 26.02.24 Принято к публикации: 28.02.24

В рамках решения задачи по созданию автономного источника электрической энергии переменного тока на базе водородных топливных элементов исследуются возможности предварительной коррекции форм напряжений и токов статических инверторов за счет применения силовых многообмоточных трансформаторов. Ценность такой коррекции в дальнейшем определяется существенным упрощением подбора элементов устройств фильтрации и алгоритмов широтно-импульсной модуляции, необходимых для достижения требуемых параметров качества электрической энергии и выравнивания токовой нагрузки на стеки водородных топливных элементов, использующихся в роли первичного источника электрической энергии постоянного тока. Показано преимущество многоуровневых инверторов, основанных на силовых многообмоточных трансформаторах с разветвленными магнитными цепями и целесообразность объединения трех однофазных инверторов в один трехфазный инвертор на основе трехстержневых трансформаторов с амплитудной модуляцией магнитных потоков и соединением вторичных обмоток в треугольник. Сформулирована и решена оптимизационная задача минимизации коэффициентов гармоник напряжений и предложено схемное решение многоуровневого инвертора промышленной частоты для создания источника питания в трехфазном исполнении, в котором реализовано предварительное выравнивание токовой нагрузки для сохранения расчетного срока службы водородных топливных элементов.

Ключевые слова: многоуровневый инвертор, коррекция форм кривых, гармоники, модуляция, выравнивание нагрузки, коммутация, оптимизация, ШИМ, фильтрация.

Мятеж С. В., Лисицын П. С. Совершенствование многоуровневых инверторов с модуляцией магнитных потоков для возможности их питания от водородных топливных элементов // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 02 (419) 2024, с. 116-133

Myatezh S. V., Lisitsyn P. S. Improvement of multilevel inverters with magnetic flux modulation for the possibility of their power from hydrogen fuel cells // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 02 (419) 2024, pp. 116-133

IMPROVEMENT OF MULTILEVEL INVERTERS WITH MAGNETIC FLUX MODULATION FOR THE POSSIBILITY OF THEIR POWER FROM HYDROGEN FUEL CELLS

Myatezh S. V., Lisitsyn P. S.

Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, 630073, Russia, st. Karl Marx 20,
Tel. +7-923-118-75-33, serg_y_7578@mail.ru, +7-923-150-14-46, nik-nokia@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.116-133

Referred: 21.02.24 Received in revised form: 26.02.24 Accepted: 28.02.24

As part of solving the problem of creating an autonomous source of alternating current electrical energy based on hydrogen fuel cells, the possibilities of preliminary correction of voltage and current shapes of static inverters through the use of power multi-winding transformers are being explored. The value of such correction is further determined by the significant simplification of the selection of elements of filtering devices and pulse-width modulation algorithms necessary to achieve the required parameters of the quality of electrical energy and equalize the current load on stacks of hydrogen fuel cells used as the primary source of DC electrical energy. The advantage of multi-level inverters based on power multi-winding transformers with branched magnetic circuits and the feasibility of combining three single-phase inverters into one three-phase inverter based on three-rod transformers with amplitude modulation of magnetic fluxes and connection of secondary windings in a triangle are shown. An optimization problem of minimizing voltage harmonic coefficients has been formulated and solved, and a circuit solution for a multi-level power frequency inverter has been proposed to create a three-phase power source, which implements preliminary equalization of the current load to preserve the design service life of hydrogen fuel cells.

Key words: multi-level inverter, curve shape correction, harmonics, modulation, load balancing, switching, optimization, PWM, filtering.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Мятеж Сергей Владимирович

Myatezh Sergey Vladimirovich

Сведения об авторе: Мятеж Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехнических комплексов» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ-НЭТИ).

Образование: Окончил факультет энергетики Новосибирского государственного технического университета в 1998 г. Защитил диссертацию по теме «Трансформаторные преобразователи числа фаз с улучшенными энергетическими показателями» в 2003 г.

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, оптимизация сетевых и автономных систем энергоснабжения на основе ВИЭ, трансформаторные преобразователи, многоуровневые инверторы.

Публикации: более 147.

Information about the author: Myatezh Sergey Vladimirovich – Ph.D. tech. Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering Complexes, Novosibirsk State Technical University (NSTU-NETI).

Education: Graduated from the Faculty of Energy, Novosibirsk State Technical University in 1998. Defended his dissertation on the topic «Transformer converters of the number of phases with improved energy performance» in 2003.

Research interests: renewable energy sources, optimization of network and autonomous energy supply systems based on renewable energy sources, transformer converters, multi-level inverters.

Publications: more 147.

Лисицын Павел Сергеевич

Lisitsyn Pavel Sergeevich

Сведения об авторе: Лисицын Павел Сергеевич, аспирант, ассистент НГТУ, кафедры Электротехнических комплексов» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ-НЭТИ).

Образование: Окончил электромеханический факультет Новосибирского государственного технического университета в 2019 г. Защитил магистерскую диссертацию по теме «Аккумулирование энергии и применение накопителей энергии на транспорте» в 2021 г.

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, оптимизация сетевых и автономных систем энергоснабжения на основе ВИЭ, трансформаторные преобразователи, многоуровневые инверторы.

Публикации: 7.

Information about the author: Lisitsyn Pavel Sergeevich, graduate student, assistant at NSTU, Department of Electrical Engineering Complexes, Novosibirsk State Technical University (NSTU-NETI).

Education: Graduated from the Electromechanical Faculty of Novosibirsk State Technical University in 2019. Defended his master's thesis on the topic «Energy storage and the use of energy storage devices in transport» in 2021.

Research interests: renewable energy sources, optimization of networked and autonomous energy supply systems based on renewable energy sources, transformer converters, multi-level inverters.

Publications: 7.

Введение

Стек водородных топливных элементов традиционно воспринимается как удобный источник непосредственного получения электрической энергии из водорода, чем и обуславливается практический интерес его применения для множества отраслей – от транспорта до автономной электроэнергетики [1-5].

Для большого числа конечных потребителей электрической энергии, вырабатываемой водородными топливными элементами, требуется переменный ток определенной частоты. В этих случаях логичным решением выглядит применение статических автономных инверторов, которые выступают как посредник, преобразуя постоянный ток водородных топливных элементов в переменный ток для питания соответствующих потребителей электрической энергии [6-7].

Концептуально принцип работы любого статического инвертора заключается в создании такой периодической коммутации электрических цепей, дающих питание, которая приводит, в свою очередь, к периодическому изменению направления протекания тока через нагрузку. Для достижения высоких энергетических показателей и, прежде всего, коэффициента полезного действия, элементы инвертора, осуществляющие такую коммутацию (представляют собой силовые полупроводниковые приборы – СПП), должны работать в ключевом режиме [8].

Сам по себе ключевой режим по определению создает во времени неравномерную электрическую нагрузку в электрической цепи, что для водородных топливных элементов является одним из факторов их деградации [9-12]. Снизить влияние такого негативного фактора способен электрический фильтр, установленный во входных цепях статического автономного инвертора. Однако этот фильтр на практике полностью не сможет устранить негативное влияние, поскольку предъявляемые для этих целей требования к элементам электрического фильтра для инверторов большой мощности приводят к неоправданно высокой их стоимости. Если же принять во внимание, что ключевой режим работы СПП инверторов будет использовать широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) для приближения выходных токов к синусоидальной форме, то на первый план для входного электрического фильтра ставится задача по устранению высших гармоник, которые также являются одним из факторов деградации водородных топливных элементов [13-17].

Выбирая схемы и параметры элементов электрических фильтров высших гармоник на входе автономного инвертора с ШИМ, необходимо учесть, что части из этих гармоник в электрических цепях постоянного тока сложнее поддаются фильтрации, поскольку в них оказываются синфазными по отношению к общей электрической емкости, например, массиву водородных топливных элементов. Это обстоятельство в конечном итоге также усложнит схему электрического фильтра для сохранения эффективной его работы и в целом увеличит относительную стоимость.

Кроме того, набор прямоугольных высокочастотных импульсов напряжений со значительной амплитудой и богатым спектром высших гармоник, образуемых в результате работы ШИМ мощных инверторов, неизбежно создаст значительные электромагнитные помехи, ухудшающие электромагнитную совместимость, и вызовет дополнительные потери, как в питающих сетях, так и у самих потребителей электрической энергии [18, 19].

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Вместе с тем известно, что приближение формы кривых напряжений автономных инверторов к синусоиде может быть реализовано не только за счет модуляции периода отдельных импульсов, как это использовано в ШИМ, но и за счет модуляции амплитуды самих импульсов. Для этого необходимо располагать разными уровнями напряжений постоянного тока, из которых создается ступенчатая кривая и формируется модифицированный синус. Так работают многоуровневые инверторы, разные уровни напряжений в которых получены за счет цепочек последовательно соединенных конденсаторов, работающих как ёмкостные делители напряжения. Однако такие инверторы имеют ряд недостатков: проблема балансировки напряжений на конденсаторах при работе с динамичной нагрузкой, сложные алгоритмы ШИМ, ограничения по режимным параметрам и массогабаритным показателям, особенно существенные для инверторов большой мощности [20, 21]. Кроме того, в коммутационных процессах, сопровождающих работу многоуровневых инверторов, проявляется ёмкостный характер конденсаторов, который выражается в скачкообразных изменениях тока, негативно влияющих на топливные элементы, предусмотренные в качестве источника питания постоянного тока.

Таблица сокращений	
Аббревиатуры	
НГТУ	Новосибирский государственный технический университет
СПП	Силовые полупроводниковые приборы
ЭДС	Электродвижущая сила
DC	Постоянный ток
AC	Переменный ток
E	Числовое значение ЭДС
ω	Круговая частота
T_i	Период работы i-го этапа
k	Номер гармоники
f	Частота
$U_=$	Выпрямленное напряжение
U_1	Действующее значение первой гармоники напряжения
U_k	Эффективные значения высших гармоник напряжения
$U_=$	Действующее значение постоянного тока
U_k^*	Значение гармоники напряжения с порядковым номером относительно первой гармоники
$C_0(t)$, C_1, $C_2(t)$, C_3, $C_4(t)$	Коэффициенты кривой первичного тока
D_1, $D_2(t)$, D_3, $D_4(t)$	Коэффициенты кривой вторичного тока
Z_n	Нагрузка
$t_1 \approx 0.371\pi$	Оптимальное время
$u_2(t)$	Вторичное напряжение
$u_1(t)$	Первичное напряжение
$u(t)$	Кривая напряжения
K_{GU}	Коэффициент гармонических искажений
K_G	Гармонический коэффициент
F_{1A}	Магнитный поток первичной полуобмотки А
F_{1B}	Магнитный поток первичной полуобмотки В
W_{1A}	Число витков первичной полуобмотки А
W_{1B}	Число витков первой полуобмотки В
S_i	i-й электронный ключ
$i_1(t)$	Мгновенный первичный ток
$i_2(t)$	Мгновенный вторичный ток
L_i	Индуктивность i-й обмотки
M	Взаимная индукция обмоток
R_1	Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора
R_2	Активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора
R_i	Активное сопротивление i-й обмотки
t	Время
F	Общий магнитный поток
ШИМ	Широтно-импульсный модулятор
F_i	Магнитный поток i-й обмотки
W_i	Число витков -й обмотки
$\varepsilon_i(t)$	Мгновенная ЭДС i-й обмотки
$L_1 - M$	Расчет индуктивностей рассеяния 1-го контура
$L_2 - M$	Расчет индуктивности рассеяния 2-го контура
SA	Электронный переключатель
Hz	Частота в герцах

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

1. Постановка задачи

Для создания автономного, достаточно мощного и сравнительно недорогого источника питания переменного тока, не оказывающего заметного негативного влияния, как на потребителей электрической энергии, так и на водородные топливные элементы, необходим усовершенствованный многоуровневый инвертор. Формы кривых выходных напряжений такого инвертора уже в первом приближении без применения ШИМ должны представлять модифицированный синус, а коммутационные процессы, сопровождающие его работу, представлять во входных электрических цепях максимально выровненную во времени электрическую нагрузку. В этом случае последующая задача фильтрации будет предельно упрощена, уменьшена стоимость самих электрических фильтров и устранен один из факторов сокращения рабочего ресурса водородных топливных элементов.

2. Концепция построения усовершенствованного многоуровневого инвертора

Многоуровневый инвертор с разными уровнями напряжений можно построить без набора заряженных конденсаторов [22-25], используя взамен этого набор обмоток, размещенных на силовом трансформаторе. Это фундаментально изменит характер коммутационного процесса, который за счет индуктивностей обмоток будет маскировать скачкообразные изменения тока, нагружающего топливные элементы во время работы такого инвертора.

Кроме того, силовые многообмоточные трансформаторы многоуровневого инвертора целесообразно использовать одновременно и как средство изменения величины напряжения и как необходимую гальваническую развязку при объединении силовых цепей постоянного и переменного тока. Проблемы, возникающие как следствие законов коммутации электрических цепей, которые затрудняют выравнивание нагрузки для водородных топливных элементов, можно устранить путем перехода к коммутации магнитных цепей многообмоточных трансформаторов.

3. Формы напряжений и токов силового трансформатора инвертора без коррекции

Пусть к первичной обмотке силового трансформатора поступает питание от источника постоянной электродвижущей силы (ЭДС). В этом случае первичную обмотку необходимо коммутировать с помощью СПП, меняя полярность подключения её выводов с периодичностью, заданной частотой f переменного тока инвертора. Первичная обмотка силового трансформатора в таком режиме вынужденно работает с напряжениями прямоугольной формы, в то время как с учетом требований потребителей переменного тока, ЭДС на выходной обмотке должна иметь форму, близкую к синусоидальной.

Простой анализ показывает, что, пренебрегая потерями в стали [26] и установив связь напряжений и токов первичной и вторичной обмотки двухобмоточного силового трансформатора (рис. 1, а) в соответствии с известной системой уравнений (1)

$$i_1(t)R_1 + L_1\frac{di_1(t)}{dt} - M\frac{di_2(t)}{dt} = u_1(t),$$
$$i_2(t)R_2 + L_2\frac{di_2(t)}{dt} - M\frac{di_1(t)}{dt} = -u_2(t), \qquad (1)$$

при питании знакопеременным напряжением $u_1(t) = \pm U_=$, полученным путем коммутации при помощи СПП-цепей источника постоянной ЭДС с напряжением $U_=$, токи в общем виде запишутся как:

$$i_1(t) = \pm\left(C_0(t) + C_1 e^{-C_2(t)} + C_3 e^{C_4(t)}\right),$$
$$i_2(t) = \pm\left(D_1 e^{D_2(t)} + D_3 e^{-D_4(t)}\right), \qquad (2)$$

и будут иметь характерную экспоненциальную форму (рис. 2).

Компоненты $C_i(t)$, $D_i(t)$ в системе (2) определяются параметрами схемы замещения рис. 1, *б* и относительными длительностями положительной и отрицательной полярности подключения первичной обмотки относительно полюсов источника постоянной ЭДС.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

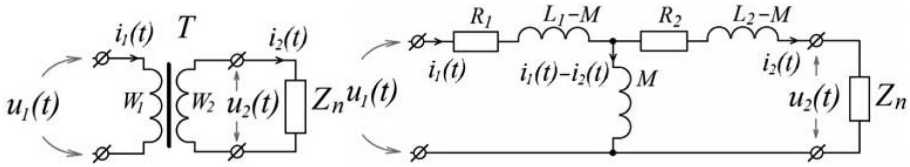


Рис. 1. Двухобмоточный трансформатор: а – схема подключения;
б – расчетная схема замещения без индуктивных связей обмоток
Fig. 1. Two-winding transformer: a – connection diagram;
b – design equivalent circuit without inductive connections of windings

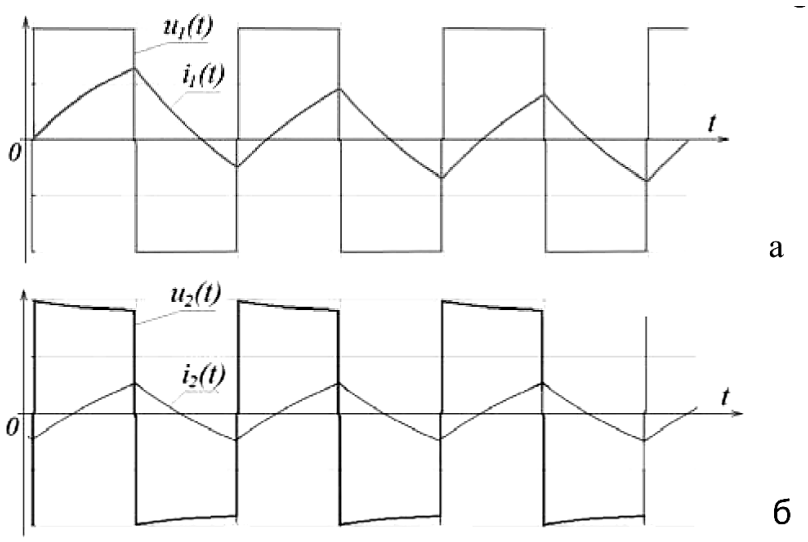


Рис. 2. Кривые напряжений и токов двухобмоточного трансформатора: а – на входе; б – на выходе
Fig. 2. Voltage and current curves of a two-winding transformer: a – at the input; b – at the exit

4. Улучшение формы выходного напряжения двухуровневого инвертора без ШИМ

В первом приближении формы кривых на рис. 2 можно улучшить, даже не прибегая к ШИМ, а варьируя только длительностью однократного подключения первичной обмотки силового трансформатора к источнику постоянной ЭДС за один рабочий период (рис. 3).

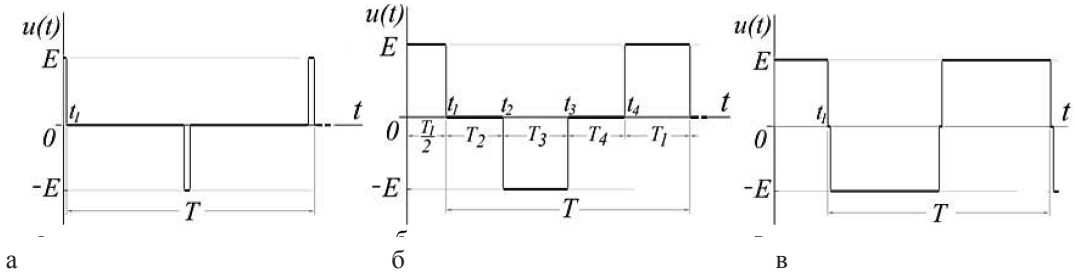


Рис. 3. Вариация длительности подключения первичной обмотки трансформатора к источнику постоянной ЭДС:
а – длительность подключения минимальна; б – длительность подключения 50 %;
в – длительность подключения приближена к 100 %
Fig. 3. Variation in the duration of connection of the primary winding of the transformer to a source of constant EMF:
a – the connection duration is minimal; b – connection duration 50 %; c – connection duration is close to 100 %\

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Для количественной оценки степени приближения формы кривой к синусоиде можно принять коэффициент гармоник $K_Г$, определив его как отношение среднеквадратичного значения суммы высших гармоник, кроме первой, к значению первой гармоники [27]. Так, для кривой напряжения *u(t)* это будет записано

$$K_{ГU} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1}, \tag{3}$$

где U_1 – действующее значение первой гармоники напряжения, U_k – действующие значения высших гармоник напряжения.

В соответствии с обозначениями на рис. 3, б и полупериодной симметрией, действующее значение первой гармоники U_1 напряжения *u(t)*

$$U_1 = \frac{2}{T}\int_0^T u(t)\cos(\omega t)dt = \frac{4}{T}\int_0^{T/2} u(t)\cos(\omega t)dt = \frac{4\sqrt{2}E\sin(\omega t_1)}{\omega T} \tag{4}$$

Действующее значение кривой напряжения $u(t)$

$$= \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (u(t))^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{t_1} E^2 dt + \frac{2}{T}\int_{t_2}^{T/2} (-E)^2 dt} = 2E\sqrt{\frac{t_1}{T}} \cdot \tag{5}$$

Отсюда действующее значение высших гармоник напряжений

$$U_{\Sigma k} = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2} = \sqrt{U^2 - U_1^2} = 2E\sqrt{\frac{t_1}{T} - \left(\frac{2\sqrt{2}}{\omega T}\sin(\omega t_1)\right)^2} \cdot\cdot \tag{6}$$

Таким образом, коэффициент гармоник кривой напряжения по выражению (3) при варьировании длительности подключения первичной обмотки к источнику постоянной ЭДС определяется следующим образом:

$$K_{ГU} = \frac{\sqrt{\frac{t_1}{T} - \left(\frac{2\sqrt{2}}{\omega T}\sin(\omega t_1)\right)^2}}{\frac{2\sqrt{2}}{\omega T}\sin(\omega t_1)} \tag{7}$$

Улучшение формы кривой решает оптимизационная задача, целевая функция которой выражается как $K_{ГU} \to \min$.

Поиск минимума выражения (7) показывает (рис. 4, а), что существует оптимальное время $t_1 \approx 0{,}371\pi$, определяющее такую длительность подключения первичной обмотки $t = 2 \cdot t_1 \approx 134°$ когда без применения ШИМ и фильтровых устройств минимально возможный коэффициент гармоник напряжения составит $K_{гu} \approx 29{,}5\%$.

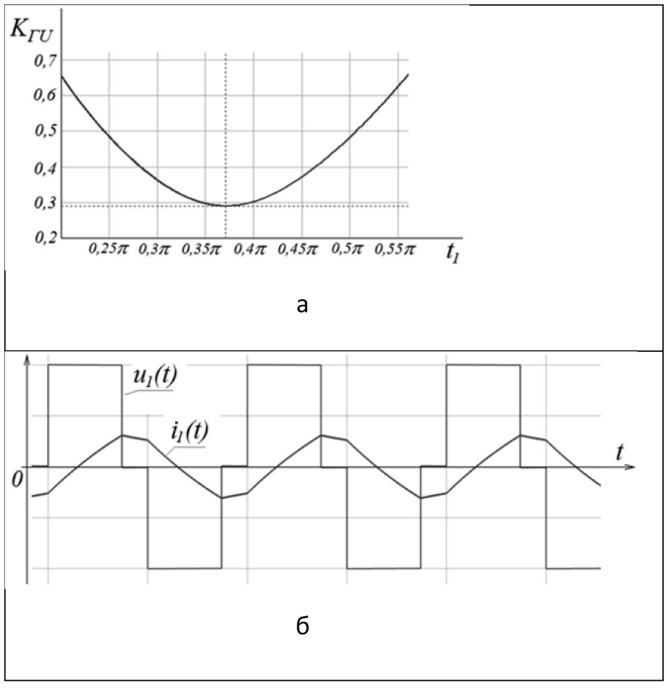


Рис. 4. Получение оптимального режима питания первичной обмотки трансформатора от источника постоянной ЭДС:
а – зависимость $K_{ГU}(t_1)$; б – формы кривых $u(t)$ и $i(t)$

Fig. 4. Obtaining the optimal power supply mode for the primary winding of the transformer from a source of constant EMF:
a – dependence $K_{ГU}(t_1)$; b – shapes of curves $u(t)$ and $i(t)$

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Кривая $u(t)$ при этом должна содержать нулевые ступени. Их целесообразно создать путем отключения первичной обмотки от источника постоянной ЭДС и замыкания её саму на себя при помощи СПП для сохранения путей протекания тока в индуктивных элементах. Ширина нулевых ступеней составит $T_2 = 1 - 2 \cdot t_1 \approx 0{,}258\pi \approx 46^0$..

Если для полученного результата задействовать возможности амплитудной модуляции, которая дает разные уровни напряжений в ступенчатой форме, то величину $K_{ГU} \approx 29{,}5\%$ можно в дальнейшем существенно снизить.

5. Амплитудная модуляция в электрических цепях многоуровневого инвертора

Применение амплитудной модуляции требует наличия разных уровней напряжений. В случае разумного с практической точки зрения запрета разделения всех водородных топливных элементов на отдельные секции, возможность получить разные уровни напряжений [28, 29] сохраняется за счет имеющегося в составе инвертора силового многообмоточного трансформатора.

Из системы (1) видно, что для создания разных уровней $u_2(t)$, рассматривая стек водородных топливных элементов как неразделяемый источник $u_1(t) = \pm U_=$, возможно изменять либо значения компонент R_i, L_i, M, либо значения производных $\frac{di_i(t)}{dt}$. С технической точки зрения управление режимными параметрами (ток, напряжение) осуществимо более простыми и экономичными средствами, чем управление схемными параметрами (сопротивление, индуктивность). Поэтому для получения необходимой величины $u_2(t)$ на вторичных обмотках силовых трансформаторов целесообразно изменять $\frac{di_i(t)}{dt}$ и связанные с этим значения магнитных потоков Φ_i. Принимая прямую пропорцию между токами в обмотках и магнитным потоком $i(t) \propto \Phi(t)$ и не создавая глубокого насыщения материала магнитопровода стержня [30], на котором расположены обмотки, а также пренебрегая малыми величинами R_1, R_2, считаем, что

$$u_i(t) \approx \varepsilon_i(t) = W_i \frac{d\Phi_i}{dt}, \qquad (8)$$

где W_i – число витков i-й секции.

На рис. 5, *а* приведен пример построения трехуровневого инвертора с пятью ступенями в кривой напряжения $u_2(t)$ на основе трансформатора, первичная обмотка которого секционирована и питается от источника E постоянной ЭДС. Секция W_{1A} создает магнитодвижущую силу F_{1A}, а секция W_{1B} – соответственно F_{1B}. С помощью ключей S_1-S_4, образующих на базе СПП обычный мостовой инвертор, к первичной обмотке подводится напряжение $u_1(t)$, в котором путем одновременного замыкания ключей S_1 и S_4, либо S_2 и S_3 формируются нулевые ступени необходимой ширины (рис. 4, *б*).

В интервалах времени, когда ключи S_1-S_4 инвертора образуют ненулевые уровни напряжения $u_1(t) = +U_=$ или $u_1(t) = -U_=$, оно уравновешено ЭДС первичной обмотки $\varepsilon_i(t)$. Следовательно, если в это время при помощи переключателя SA скачкообразно уменьшить суммарное количество витков обмотки с $W_{1A} + W_{1B}$ до W_{1A}, то скорость изменения потока Φ вырастет пропорционально отношению $(W_{1A} + W_{1B})/W_{1A}$ и вызовет увеличение ЭДС во вторичной обмотке W_2 (рис. 5, *б*). Так, в кривой выходного напряжения инвертора $u_2(t)$ создаются дополнительные ступени. Общее их количество при этом возрастет до пяти.

Следует отметить, что коммутация отпаек обмоток трансформаторов для изменения скорости изменения Φ и создания дополнительных ступеней в напряжении $u_2(t)$ как самое очевидное решение сопровождается нежелательными побочными коммутационными процессами [30, 31]. В силовом

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

многообмоточном трансформаторе не весь магнитный поток, созданный обмотками, сцеплен с основным магнитным потоком Φ и всегда имеются потоки рассеяния. На рис. 1, *б* они учтены расчетными индуктивностями рассеяния $L_1 - M$ и $L_2 - M$. Поэтому, в моменты переключения электрических цепей при помощи SA, к примеру, на таких индуктивностях, будет возникать ЭДС самоиндукции, вызывая перенапряжения, которые в ходе проведения численных экспериментов зафиксированы в самой кривой $u_2(t)$ на рис. 5, *б*. Кроме того, токовая нагрузка в секциях обмоток W_{1A} и W_{1B}, как это видно по кривым $i_{1A}(t)$ и $i_{1B}(t)$ в рабочем режиме распределена неравномерно [32].

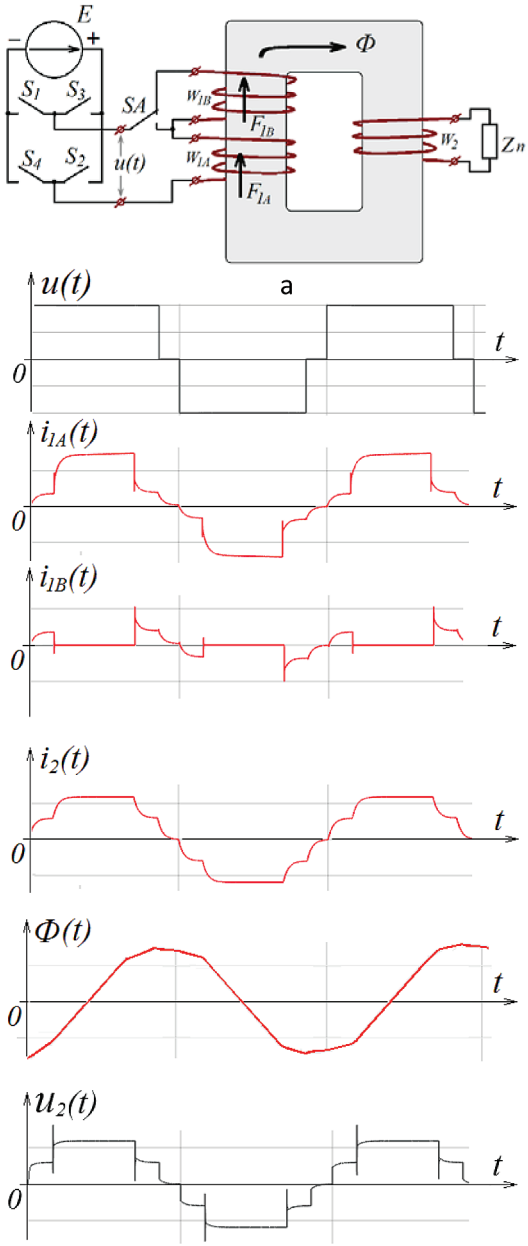


Рис. 5. Инвертор с пятью ступенями и коммутацией секций обмоток силового трансформатора:
а – принципиальная схема;
б – кривые напряжений, токов и потоков

Fig. 5. Inverter with five stages and switching sections of power transformer windings:
a – circuit diagram;
b – voltage, current and flow curves

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Поэтому в дальнейшем целесообразно исключить нежелательную коммутацию витков первичных или вторичных обмоток, а для сохранения амплитудной модуляции $u_2(t)$ необходим такой трансформатор, в котором изменение основного Φ происходит за счет сложения Φ_i, созданных своими секциями обмоток W_i. Для этого магнитопровод трансформатора должен иметь разветвленные магнитные цепи.

6. Улучшение формы выходного напряжения многоуровневого инвертора без ШИМ

Для минимизации $K_{ГU}$ пятиступенчатого инвертора необходимо оптимизировать ширину ступеней кривой $u(t)$.

В соответствии с обозначениями на рис. 6, *а*, действующее значение первой гармоники U_1 кривой напряжения $u(t)$ определится:

$$U_1 = \frac{2}{T}\int_0^T u(t)\cos(\omega t)dt = \frac{8}{\sqrt{2}T}\left(\int_0^{t_1} 2E\cos(\omega t)dt + \int_{t_1}^{t_2} E\cos(\omega t)dt\right) = \frac{4\sqrt{2}E\left(\sin(\omega t_1)+\sin(\omega t_2)\right)}{\omega T} \quad (9)$$

Действующее значение кривой напряжения $u(t)$

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left(u(t)\right)^2 dt} = \sqrt{\frac{4}{T}\left(\int_0^{t_1}(2E)^2 dt + \int_{t_1}^{t_2}(E)^2 dt\right)} = 2E\sqrt{\frac{3t_1+t_2}{T}} \quad (10)$$

Отсюда действующее значение высших гармоник напряжений:

$$U_{\Sigma k} = \sqrt{U^2 - U_1^2} = 2E\sqrt{\frac{3t_1+t_2}{T} - \left(\frac{2\sqrt{2}}{\omega T}\left(\sin(\omega t_1)+\sin(\omega t_2)\right)\right)^2}. \quad (11)$$

Таким образом, для пятиступенчатого однофазного инвертора напряжения величина K_{ru} в общем случае определяется как:

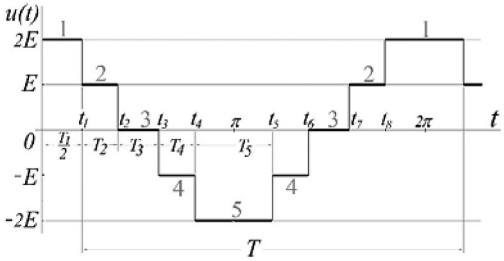
$$K_{ГU} = \frac{\sqrt{\frac{3t_1+t_2}{T} - \left(\frac{2\sqrt{2}}{\omega T}\left(\sin(\omega t_1)+\sin(\omega t_2)\right)\right)^2}}{\frac{2\sqrt{2}}{\omega T}\left(\sin(\omega t_1)+\sin(\omega t_2)\right)} \quad (12)$$

В выражении (12) присутствуют две независимые переменные t_2 и t_2, причем по временным интервалам в соответствии с рис. 6, *а* должны соблюдаться ограничения

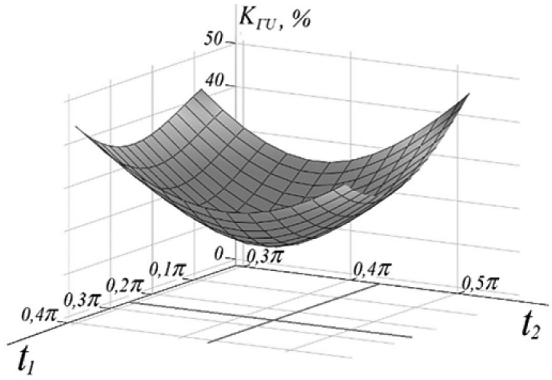
$$0 \le t_1 \le \pi/2,$$
$$t_1 \le t_2. \quad (13)$$

Оптимизационную задачу вида $K_{ГU} \to \min$ в данном случае следует решать, используя одновременно выражения (12) и (13) как общую систему [33, 34].

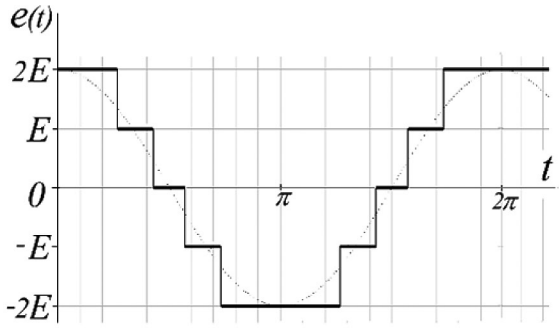
International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»



а



б



в

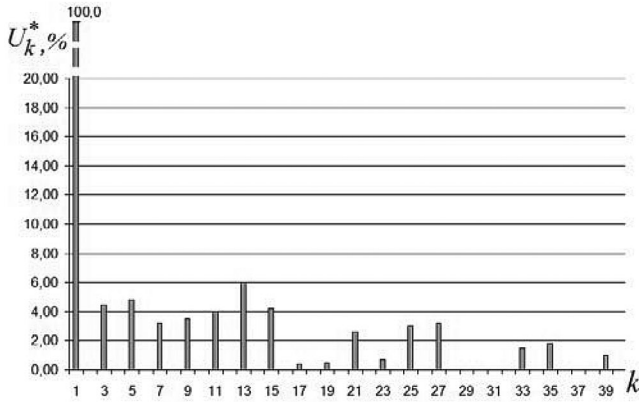


Рис. 6. Кривая выходного напряжения трехуровневого пятиступенчатого инвертора:

а – функция $K_{ГU}(t_1, t_2)$; б – пятиступенчатая кривая выходного напряжения, содержащая минимум высших гармоник; в – гармонический состав; г – $u(t)$

Fig. 6. Output voltage curve of a three-level five-stage inverter: a – function $K_{ГU}(t_1, t_2)$; b – five-step output voltage curve containing a minimum of higher harmonics; V – harmonic composition; g – $u(t)$

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Решение дает оптимальное значение (рис.6,*б*) для моментов времени

$$t_1 \approx 0{,}2676\pi \text{ и } t_2 \approx 0{,}4286\pi, \qquad (14)$$

и уточняет оптимальную форму кривой выходного напряжения с пятью ступенями (рис. 6, *в*), которая будет содержать минимум высших гармоник без применения фильтров и ШИМ. И для этих условий находит существующий минимум высших гармоник, количественно определенный как $K_{ГU} \approx 16{,}2\%$.

Таким образом, для создания однофазного пятиступенчатого инвертора, работающего с частотой промышленной сети $f = 50$ Гц и $T = 0{,}02$ с оптимальные длительности ступеней определятся как:

$$T_1 \approx 0{,}00535\,\text{с},\ T_2 \approx 0{,}00161\,\text{с},$$
$$T_3 \approx 0{,}00143\,\text{с}, \qquad (15)$$

которые в дальнейшем легче всего будут поддаваться фильтрации даже без применения ШИМ. В ходе экспериментальных исследований также получен уровень гармоник в кривой $u_2(t)$ (рис.6,*г*), где U_k^* – величина гармоники напряжения с порядковым номером k относительно первой гармоники.

7. Амплитудная модуляция в магнитных цепях многоуровневого инвертора

Модуляция магнитных потоков путем их сложения сравнительно легко реализуема в разветвленных магнитных цепях. Наиболее простой конструкцией разветвленных магнитных цепей обладает магнитопровод на основе распространенного трехстержневого трансформатора, который содержит две магнитные цепи (рис. 7, *а*) [35, 36].

Первичная обмотка представлена самостоятельными и полностью идентичными секциями W_{1A} и W_{1B}, каждая из которых питается от своего мостового инвертора, построенного на базе ключей S_1 - S_4 и S_5 - S_8. Ключи мостовых инверторов формируют напряжения $u_A(t)$ и $u_B(t)$, в которых также должны быть нулевые ступени.

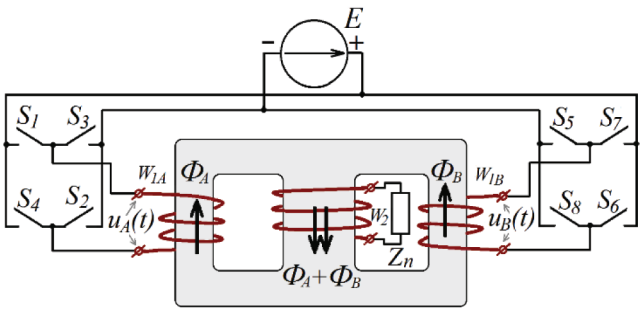
Для корректной работы инвертора с учетом условий (14) необходимо, чтобы ширина ненулевых ступеней составляла $T_A = T_B \approx 0{,}00695$ с, а сами кривые $u_A(t)$ и $u_B(t)$ были взаимно сдвинуты на $\Delta t \approx 0{,}00161$ с. В этом случае при сложении образуемых ими магнитных потоков $\Phi_A + \Phi_B$ по выражению (8) вторичная обмотка W_2 сформирует напряжение $u_2(t)$ с пятью ступенями (рис. 7, *б*), ширина которых определена по (15), а сама кривая $u_2(t)$ приблизится к синусоидальной форме с $K_{ГU} \approx 16{,}2\%$.

Преимущество применения в составе многоуровневого инвертора силового трансформатора с разветвленным магнитопроводом, заключается в возможности простой коммутации магнитных потоков, сложение которых не вызывает перенапряжений или сверхтоков при переходных процессах по сравнению с коммутацией разветвленных электрических цепей на примере двух секций обмоток силового трансформатора.

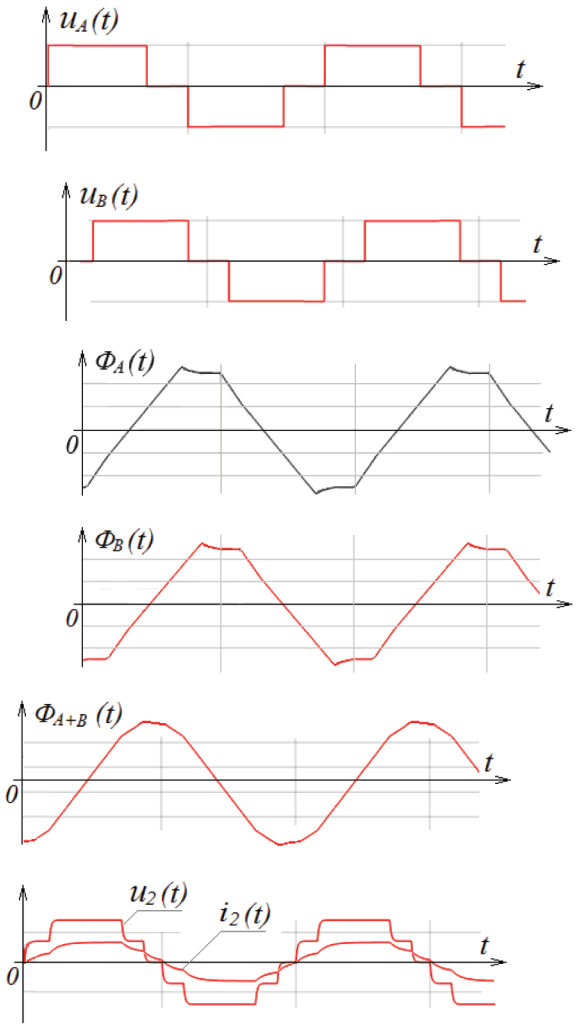
Кроме того, разделение основного магнитного потока Φ на части, позволяет равномерно и симметрично распределить токовую нагрузку (рис. 7, *б*), например, между секциями обмоток W_{1A} и W_{1B}, что важно как для выравнивания токовой нагрузки, так и снижения типовой мощности самого трансформатора и принятия идентичных сечений проводников его обмоток.

Дальнейшее направление путей совершенствования инвертора без применения возможностей ШИМ и введения дополнительных его уровней возможно за счет исключения из гармонического состава (рис. 6, г) гармоник, кратных трем. Это сравнительно просто реализуется в трехфазных системах, где элементы цепей разных фаз (нагрузка, катушки индуктивности или обмотки трансформатора) соединяются в треугольник [37, 38].

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»



а



б

б

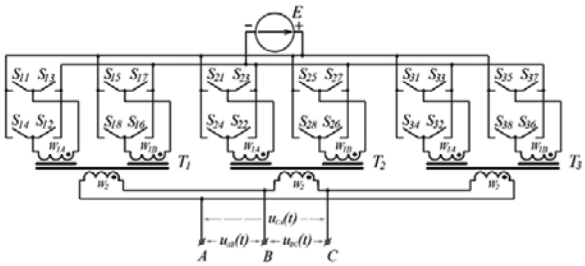
Рис. 7. Инвертор с пятью ступенями и коммутацией магнитных потоков в силовом трансформаторе:
а – принципиальная схема; *б* – кривые напряжений, токов и потоков
Fig. 7. Inverter with five stages and switching of magnetic fluxes in the power transformer:
a – circuit diagram; b – voltage, current and flow curves

С точки зрения стека водородных топливных элементов как первичного источника электрической энергии, объединение трех однофазных инверторов в один трехфазный будет предпочтительно, поскольку трехфазные системы, в отличие от однофазных, могут обладать уравновешенностью. Это означает, что в них суммарная активная мощность по всем фазам во времени будет постоянной, что гарантирует равномерную нагрузку для источника электрической энергии.

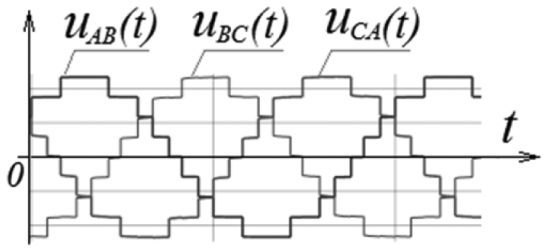
International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Для создания полноценного инвертора трехфазного переменного тока (рис. 8, *а*) необходимо предусмотреть фазовые задержки в $2\pi/3$ коммутации ключей S_{21} - S_{28} относительно S_{11} - S_{18} и аналогичной задержки для ключей S_{31} - S_{38} относительно S_{21} - S_{28} [39, 40].

Взаимодействие высших гармоник трехуровневого инвертора, собранного по схеме рис. 8, *а* и устранение гармоник, кратных трем, приводит к возрастанию числа ступеней в выходных напряжениях с 5 до 9, улучшение форм этих напряжений количественно характеризуется $K_{ГU} \approx 8{,}92\%$. Кривые $u_{AB}(t)$, $u_{BC}(t)$ и $u_{CA}(t)$ на выходе инвертора при этом образуют симметричную трехфазную систему напряжений (рис. 8, *б*), а токовая нагрузка на водородные топливные элементы в значительной степени выравнивается без дополнительных фильтраций (рис. 9) [41].

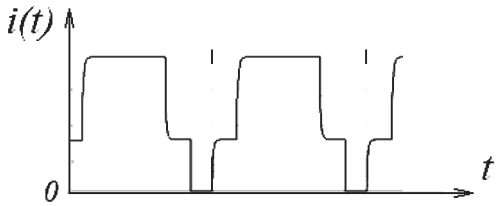


а

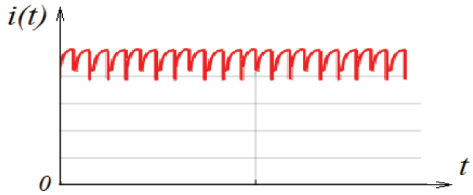


б

Рис. 8. Электрическая схема трехуровневого пятиступенчатого инвертора напряжения трехфазного переменного тока
Fig. 8. Electrical diagram of a three-level five-stage three-phase alternating current voltage inverter



а



б

Рис. 9. Потребление тока инверторами от первичного источника без установки фильтров:
а – однофазный инвертор;
б – трехфазный инвертор
Fig. 9. Current consumption by inverters from the primary source without installing filters:
a – single–phase inverter;
b – three-phase inverter

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

8. Выводы

1. Показано, что усовершенствованный многоуровневый инвертор, использующий силовые многообмоточные трансформаторы взамен цепочек заряженных конденсаторов, способен выравнивать во времени токовую нагрузку и не допускать бросков тока, что будет предпочтительно для сохранения ресурса водородных топливных элементов, играющих роль первичного источника энергии.

2. Исследована амплитудная модуляция магнитных потоков в разветвленных магнитопроводах силовых трансформаторов для получения на выходе инвертора напряжения переменного тока со ступенчатой формой кривой модифицированного синуса. Выведены аналитические выражения, определяющие коэффициенты гармоник напряжений на выходе многоуровневых инверторов, не использующих ШИМ и фильтровые устройства. Преимущество амплитудной модуляции магнитных потоков заключается в достижении более равномерной токовой загрузки секций питающих обмоток и отсутствии перенапряжений в них во время работы инвертора.

3. Сформулирована и решена оптимизационная задача минимизации коэффициентов гармоник напряжений для многоуровневых инверторов. Решение задачи определяет оптимальную ширину каждой ступени кривой выходного напряжения. Так, для инвертора с тремя ступенями, ширина нулевых ступеней должна составлять $\approx 0{,}258\pi$, ширина остальных ступеней должна быть $\approx 0{,}742\pi$. При этих условиях уровень высших гармоник в выходном напряжении минимален и характеризуется коэффициентом $K_{ГU} \approx 29{,}5$ % .

4. Предложено схемное решение многоуровневого инвертора промышленной частоты 50 Гц на основе трехстержневого трансформатора с амплитудной модуляцией магнитных потоков. Для достижения минимума высших гармоник в выходном напряжении на уровне $K_{ГU} \approx 16{,}2$ % определены режимы раздельной работы двух секций первичных обмоток, которые заключатся во взаимном смещении циклов их коммутации на величину временного интервала ≈0,00161 с причем питание каждой секции в одном полупериоде должно занимать время ≈0,00695 с.

5. Показана эффективность объединения трех однофазных инверторов на основе трехстержневого трансформатора с амплитудной модуляцией магнитных потоков в один трехфазный инвертор с соединением вторичных обмоток в треугольник. Перспективность создания источника питания в трехфазном исполнении, предусматривающего работу от стека водородных топливных элементов, заключается в получении сниженного уровня высших гармоник до значения $K_{ГU} \approx 8{,}92$ % и предварительного выравнивания токовой нагрузки со стороны источника питания постоянного тока даже без использования фильтровых устройств и возможностей ШИМ. Поэтому, когда в дальнейшем эти средства будут установлены, они смогут значительно эффективнее работать в подобных преобразователях для сохранения расчетного срока службы водородных топливных элементов.

Список литературы

1. Malyshenko S. P., Borzenko V. I., Dunikov D. O., Nazarova O. V. Metal hydride technologies of hydrogenenergy storage for independent power supply systems constructed on the basis of renewable sources of energy // Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika). – 2012. – Т. 59. – № 6. – С. 468-478.

2. Gahleitner G. Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications // International Journal of Hydrogen Energy. – 2013. – Т. 38. – № 5. – С. 2039-2061.

3. Aneke M., Wang M. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review // Applied Energy. – 2016. – Т. 179. – С. 350-377.

4. Zhang X., Chan S. H., Ho H. K., Tan S. -C., Li M., Li G., Li J., Feng Z. Towards a smart energy network: The roles of fuel/electrolysis cells and technological perspectives // International Journal of Hydrogen Energy. – 2015. – Т. 40. – № 21. – С. 6866-6919.

5. Emonts B., Schiebahn S., Görner K., Lindenberger D., Markewitz P., Merten F., Stolten D. Re-energizing energy supply: Electrolytically-produced hydrogen as a flexible energy storage medium and fuel for road transport // Journal of Power Sources. – 2017. – Т. 342. – С. 320-326.

6. Oliveira D. S. A Three-Phase High-Frequency Semicontrolled Rectifier for PM WECS / D. S. Oliveira, M. M. Reis, C. Silva, L. B. Colado, F. Antunes, B. L. Soares // IEEE Transactions on Power Electronics. – Vol. 25, no. 3. – P. 677-685.

7. Ершов М. И., Прокофьев В. Е., Янович К. В. Расчет основных параметров инвертора для электроустановок на твёрдооксидных топливных элементах // ВА МТО, Санкт-Петербург, 2019. – № 3(4). – С. 110-116.

8. Андриянов А. И., Булохов Н. М., Михальченко Г. Я. Управление динамикой импульсных преобразователей постоянного напряжения. – Электричество, 2013. – № 8. – С. 41-49.

9. Фаддеев Н. А., Беличенко М. А., Серик А. В., Соколова В. А., Смирнова Н. В. Исследование влияния изменения профиля нагрузки на производительность стека на основе топливных элементов с протонообменной мембраной. // [https://elektromekhanika.npi-tu.ru/index.php/electromeh/article/view/2277] doi.org/10.17213/0136-3360-2022-4-25-30.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

10. Wang Y., Diaz D. F. R., Chen K. S., Wang Z., & Adroher X. C. Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells–a review // Materials today. – 2020. – Т. 32. – С. 178-203.

11. Васюков И. В., Павленко А. В., Батищев Д. В. Обзор и анализ топологий преобразователей систем электропитания на водородных топливных элементах для беспилотных летательных аппаратов киловаттного класса мощности // Изв. вузов. Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – № 2. – С. 19.

12. Borup, R., Meyers, J., Pivovar, B., Kim, Y. S., Mukundan, R., Garland. Scientific aspects of polymer electrolyte fuel cell durability and degradation // Chemical reviews. – 2007. – Т. 107. – № 10. – С. 3904-3951.

13. Ferreira H. L., Garde R., Fulli G., Kling W., Lopes J. P. Characterisation of electrical energy storage technologies // Energy. – 2013. – Т. 53. – С. 288-298.

14. Aarhaug T. A., Svensson A. M. Degradation rates of PEM fuel cells running at open circuit voltage // ECS Transactions. – 2006. – Т. 3. – № 1. – С. 775.

15. Anastasiadis A. G., Konstantinopoulos S. A., Kondylis G. P., Vokas G. A., Papageorgas P. Effect of fuel cell units in economic and environmental dispatch of a Microgrid with penetration of photovoltaic and micro turbine units // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Т. 42. – № 5. – С. 3479-3486.

16. Abdelfatah Kolli, Arnaud Gaillard, Alexandre De Bernardinis, Olivier Bethoux, Daniel Hissel, Zoubir Khatir A review on DCDC converter architectures for power fuel cell applications // Energy Conversion and Management, November, 2015. – Vol. 105. – P. 716-730. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.07.060

17. Dawei Gao, Zhenhua Jin, Jiexun Liu, Minggao Ouyang. An interleaved step-up/step-down converter for fuel cell vehicle applications // International Journal of Hydrogen Energy, December, 2016. – Vol. 41. – Issue 47, 21. – P. 22422-22432. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.09.171

18. Колесников С. В., Леонов А. П. Надежность изоляции статорных обмоток частотно-управляемых электродвигателей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2022. – № 1. – Т. 18. – С. 33-62.

19. Дудкин А. Н., Леонов А. П., Супуева А. С. Влияние дефектов в межвитковой изоляции на ее стойкость к эксплуатационным нагрузкам, характерным для энергоэффективных способов управления электротехническим оборудованием. – Томск: Известия ТПУ, 2015. – Т. 326. – № 11. – С. 83-89.

20. Colak I. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes / I. Colak, E. Kabalci, R. Bayindir // Energy Conversion and Management. – 2011. – Vol. 52. – P. 1114-1128.

21. Panagis P. Comparison of State of the Art Multilevel Inverters / P. Panagis, F. Stergiopoulos, P. Marabeas // Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE Conference Publications. – P. 4296-4301.

22. Blaajberg F. PWM Z-source NPC inverter / P. C. Lox, F. Blaajberg, S. Y. Feng, R. N. Soon // Proc. APEC-2006. – 2006. – P. 40-46.

23. Li R. An active modulation technique for single-phase grid connected CSI / R. Li, H. S. Chung, T. K. M. Chan // IEEE Transitions on Power Electronic. – 2007. – Vol. 22. – P. 1373-1380.

24. Volkov A. G. Analysis of New Multizone Rectifier for Electric Locomotives of VI85 Type / А. П. Косарев, А. Г. Волков, Г. С. Зиновьев // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2010). – Erlagol, Altai. – June 30-July 4, 2010. – P. 475-479.

25. Z. Bai, Z. Zhang, Y. Zhang A Generalized Three-Phase Multilevel Current Source Inverter with Carrier Phase-Shifted SPWM / Z. Bai, Z. Zhang, Y. Zhang // IEEE Trans. Ind. Electron. – P. 220-227.

26. Ивакин В. Н., Ковалев В. Д., Магницкий А. А. Нормирование энергоэффективности распределительных трансформаторов // Энергия единой сети. – 2017. – № 5 (34). – С. 20-31.

27. Белецкий А. Ф. Теория линейных электрических цепей. – СПб.: Изд-во «Лань», 2008. –544 с.

28. The world's first commercial fuel cell powerpack for drone DP30 Powerpack – [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.doosanmobility.com/en/products /powerpack/

29. Tao Lei, Zhou Yang, Zicun Lin, Xiaobin Zhang State of art on energy management strategy for hybrid-powered unmanned aerial vehicle // Chinese Journal of Aeronautics, June 2019. – Vol. 32. – Issue 6. – P. 1488-1503. DOI: 10.1016/j.cja.2019.03.013.

30. Зирка С. Е., Мороз Ю. И., Мороз Е. Ю., Тарчуткин А. Л. Топологические модели трансформатора // Электричество, 2012. – № 10. – С. 33-42.

31. Виноградов А. Б, Коротков А. А. Алгоритмы управления высоковольтным многоуровневым преобразователем частоты: монография. – Иваново: Изд-во Ивановский государственный энергетический университет, 2018. –184 с.

32. Akagi H. Active harmonic filters // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Т. 93. – Vol. 12. – P. 2128-2141.

33. Lepanov M., Rozanov Y. Multifunctional regulator based on SMES and power electronic converter for increase of power quality and power supply reliability // Power Engineering, Energy and Electrical Drives POWERENG), 2013 Fourth International Conference on. – IEEE, 2013. – P. 1387-1391.

34. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие / под ред. В. В. Денисова. – Ростов н/Д: Феникс, 2015. – 382 с.

35. Безруких П. П., Стребков Д. С. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. – М.: РАСХН, 2005.

36. Габдерахманова Т. О., Директор Л. Б., Попель

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

О. С., Тарасенко А. Б. – №. 23. – Альтернативная энергетическая экология, 2015. – С. 195. / Габдерахманова Т. С. Сравнительный анализ электрических накопителей энергии.

37. Booth D. A., B. l. Alievsky, S. R. Mizjurin, P. V. Vasiukevich; Ed. Booth D. A. M.: Jeneroatomizdat, 1991. – S. 398. / Booth D. A. Nakopiteli jenergii.

38. Varypaev V. N. Himicheskie istochniki toka / V. N. Varypaev, Dasojan M. A., Nicholas A. M.: Vysshaja Shkola, 1990. – S. 240.

39. Червоненко А. П., Котин Д. А., Рожко А. В. Перевод нагрузки с основной сети на резервную с применением типового АВР // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 5. – С. 160-171.

40. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник / О. Г. Чебовский, Л. Г. Моисеев, Р. П. Недошивен. – 2-е изд. перераб. и доп. – М: Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.

41. Боярская Н. П. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения: монография / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров. – Красноярск: СФУ, 2014. – 192 с.

References

1. Malyshenko S. P., Borzenko V. I., Dunikov D. O., Nazarova O. V. Metal hydride technologies of hydrogen energy storage for independent power supply systems constructed on the basis of renewable sources of energy // Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika). – 2012. – T. 59. – № 6. – P. 468-478.

2. Gahleitner G. Hydrogen from renewable electric power: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications // International Journal of Hydrogen Energy. – 2013. – T. 38. – № 5. – P. 2039-2061.

3. Aneke M., Wang M. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review // Applied Energy. – 2016. – T. 179. – P. 350-377.

4. Zhang X., Chan S. H., Ho H. K., Tan S. -C., Li M., Li G., Li J., Feng Z. Towards a smart energy net-work: The roles of fuel/electrolysis cells and technological perspectives // International Journal of Hydrogen Energy. – 2015. – T. 40. – № 21. – P. 6866-6919.

5. Emonts B., Schiebahn S., Görner K., Lindenberger D., Markewitz P., Merten F., Stolten D. Re-energizing energy supply: Electrolytically-produced hydrogen as a flexible energy storage medium and fuel for road transport // Journal of Power Sources. – 2017. – T. 342.– P. 320-326.

6. Oliveira D. S. A Three-Phase High-Frequency Semicontrolled Rectifier for PM WECS / D. S. Oliveira, M. M. Reis, C. Silva, L. B. Colado, F. Antunes, B. L. Soares // IEEE Transactions on Power Electronics. – Vol. 25. – № 3. – P. 677-685.

7. Ershov M. I., Prokofiev V. E., Yanovich K. V. Calculation of the main parameters of an inverter for electrical installations using solid oxide fuel cells // VA MTO, St. Petersburg, 2019. – № 3(4). – P. 110-116.

8. Andriyanov A. I., Bulokhov N. M., Mikhalchenko G. Ya. Control of the dynamics of pulsed constant voltage converters. – Electricity, 2013 – № 8. –P. 41-49.

9. Faddeev N. A., Belichenko M. A., Serik A. V., Sokolova V. A., Smirnova N. V. Study of the effect of changing the load profile on the performance of a stack based on proton exchange membrane fuel cells. // [https://elektromekhanika.npi-tu.ru/index.php/electromeh/article/view/2277] doi.org/10.17213/0136-3360-2022-4-25-30.

10. Wang Y., Diaz D. F. R., Chen K. S., Wang Z., & Adroher X. C. Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells–a review // Materials today. – 2020. – T. 32. – P. 178-203.

11. Vasyukov I. V., Pavlenko A. V., Batishchev D. V. Review and analysis of topologies of converters of power supply systems based on hydrogen fuel cells for unmanned aerial vehicles of the kilowatt power class. Izv. universities Electromechanics. – 2022. – T. 65. – № 2. – P. 19.

12. Borup, R., Meyers, J., Pivovar, B., Kim, Y. S., Mukundan, R., Garland. Scientific aspects of polymer electrolyte fuel cell durability and degradation // Chemical reviews. – 2007. – T. 107. – № 10. – P. 3904-3951.

13. Ferreira H. L., Garde R., Fulli G., Kling W., Lopes J. P. Characterization of electrical energy storage technologies // Energy. – 2013. – T. 53. – P. 288-298.

14. Aarhaug T. A., Svensson A. M. Degradation rates of PEM fuel cells running at open circuit voltage // ECS Transactions. – 2006. – T. 3. – № 1. P. 775.

15. Anastasiadis A. G., Konstantinopoulos S. A., Kondylis G. P., Vokas G. A., Papageorgas P. Effect of fuel cell units in economic and environmental dispatch of a Microgrid with penetration of photovoltaic and micro turbine units // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – T. 42. – № 5. – P. 3479-3486.

16. Abdelfatah Kolli, Arnaud Gaillard, Alexandre De Bernardinis, Olivier Betoux, Daniel Hissel, Zoubir Khatir A review on DCDC converter architectures for power fuel cell applications // Energy Conversion and Management, November, 2015. – Vol. 105. – P. 716-730. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.07.060

17. Dawei Gao, Zhenhua Jin, Jiexun Liu, Minggao Ouyang An interleaved step-up/step-down converter for fuel cell vehicle applications // International Journal of Hydrogen Energy, December, 2016. – Vol. 41. – Issue 47, 21. – P. 22422-22432. DOI: 10.1016/

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

j.ijhydene.2016.09.171

18. Kolesnikov S. V., Leonov A. P. Reliability of insulation of stator windings of frequency-controlled electric motors // Electrical engineering and information complexes and systems. – 2022. – № 1. – V. 18. – P. 33-62.

19. Dudkin A. N., Leonov A. P., Supueva A. S. The influence of defects in interturn insulation on its resistance to operational loads, characteristic of energy-efficient methods of controlling electrical equipment. – Tomsk: Izvestia TPU, 2015. – T. 326. – № 11. – P. 83-89.

20. Colak I. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes / I. Colak, E. Kabalci, R. Bayindir // Energy Conversion and Managment. –2011. – Vol. 52. – P. 1114-1128.

21. Panagis P. Comparison of State of the Art Multilevel Inverters / P. Panagis, F. Stergiopoulos, P. Marabeas // Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE Conference Publications. – P. 4296-4301.

22. Blaajberg F. PWM Z-source NPC inverter / P. C. Lox, F. Blaajberg, S. Y. Feng, R. N. Soon // Proc. APEC2006. – 2006. – P. 40-46.

23. Li R. An active modulation technique for sin-gle-phase grid connected CSI / R. Li, H. S. Chung, T. K. M. Chan // IEEE Transitions on Power Electronic. – 2007. – vol. 22. – P. 1373-1380.

24. Volkov A. G. Analysis of New Multizone Rectifier for Electric Locomotives of VI85 Type / A. P. Kosarev, A. G. Volkov, G. S. Zinoviev // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2010). – Erlagol, Altai. – June 30-July 4, 2010. – P. 475-479.

25. Z. Bai, Z. Zhang, Y. Zhang A Generalized Three-Phase Multilevel Current Source Inverter with Carrier Phase-Shifted SPWM / Z. Bai, Z. Zhang, Y. Zhang // IEEE Trans. Ind. Electron. – P. 220-227.

26. Ivakin V. N., Kovalev V. D., Magnitsky A. A. Standardization of energy efficiency of distribution transformers // Energy of a single network. – 2017. – № 5 (34). – P. 20-31.

27. Beletsky A. F. Theory of linear electrical circuits. – St. Petersburg: Lan Publishing House, 2008. – 544 p.

28. The world's first commercial fuel cell power-pack for drone DP30 Powerpack [Electronic resource]. Access mode: https://www.doosanmobility.com/en/products /powerpack/

29. Tao Lei, Zhou Yang, Zicun Lin, Xiaobin Zhang State of art on energy management strategy for hybrid-powered unmanned aerial vehicle // Chinese Journal of Aeronautics, June, 2019. – Vol. 32. – Issue 6. – P. 1488-1503. DOI: 10.1016/j.cja.2019.03.013.

30. Zirka S. E., Moroz Yu. I., Moroz E. Yu., Tarchutkin A. L. Topological models of transformer // Electricity, 2012. – № 10. – P. 33-42.

31. Vinogradov A. B., Korotkov A. A. Control algorithms for a high-voltage multilevel frequency converter: monograph. – Ivanovo: Publishing house Ivanovo State Energy University, 2018. – 184 p.

32. Akagi H. Active harmonic filters // Proceedings of the IEEE. – 2005. – T. 93. – Vol. 12. – P. 2128-2141.

33. Lepanov M., Rozanov Y. Multifunctional regulator based on SMES and power electronic converter for increasing of power quality and power supply reliability // Power Engineering, Energy and Electrical Drives POW-ERENG), 2013. Fourth International Conference on. – IEEE, 2013. – P. 1387-1391.

34. Non-traditional and renewable energy sources: textbook / ed. V. V. Denisova. – Rostov n/d: Phoenix, 2015. – 382 p.

35. Bezrukikh P. P., Strebkov D. S. Renewable energy: strategy, resources, technologies. – M.: RASHN, 2005.

36. Gabderakhmanova T. O., Director L. B., Popel O. S., Tarasenko A. B. – № 23. Alternative energy ecology, 2015. – P. 195. / Gabderakhmanova T. S. Comparative analysis of electrical energy storage devices.

37. Booth D. A., B. l. Alievsky, S. R. Mizjurin, P. V. Vasiukevich; Ed. Booth D.A. M.: Jeneroatomizdat, 1991. – S. 398 / Booth D. A. Nakopiteli jenergii.

38. Varypaev V. N. Himicheskie istochniki toka / V. N. Varypaev, Dasojan M. A., Nicholas A. M.: Vysshaja Shkola, 1990. – S. 240.

39. Chervonenko A. P., Kotin D. A., Rozhko A. V. Transferring the load from the main network to the backup one using a standard automatic transfer switch // News of higher educational institutions. Energy problems. – 2021. – T. 23. – № 5. – P. 160-171.

40. Power semiconductor devices: Handbook / O. G. Chebovsky, L. G. Moiseev, R. P. Unfinished. – 2nd ed. Reworked and additional – M: Energoatomizdat, 1985. – 400 p.

41. Boyarskaya N. P. Synthesis of filter-compensating devices for power supply systems: monograph / N. P. Boyarskaya, V. P. Dovgun, D. E. Egorov. – Krasnoyarsk: SFU, 2014. – 192 p.

Транслитерация по BSI

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭНЕРГЕТИКИ
ENVIRONMENTAL ASPECTS OF ENERGY

ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ
ENERGY AND ECOLOGY

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕГАПОЛИСОВ
ECOLOGICAL PROBLEMS OF INDUSTRIAL MEGAPOLISES

Статья поступила в редакцию 05.02.24 Ред. Рег. № 300-002-24 The article has entered in publishing office 05.02.24 Ed. Reg. No. 300-002-24

УДК 620.93

СИСТЕМА ГЕНЕРАЦИИ ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Филина О. А.[1,2], Малозёмов Б. В.[2], Щуров Н. И.[2]

[1] Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, 420059, Россия
[2] Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, 630073, Россия,
e-mail: borisnovel@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.134-146

Заключение совета рецензентов: 14.02.24 Заключение совета экспертов: 19.02.24 Принято к публикации: 27.02.24

В данной статье рассматриваются достижения в области проектирования двигателей на водородном топливе; исследуются основные характеристики гибридного двигателя; намечаются перспективы дальнейших исследований; разработки и совершенствования конструкций двигателей, исследование процессов в двигателях, работающих на природном газе и водороде. Транспорт является одним из ключевых элементов современной цивилизации. Его состояние и перспективы развития в большей степени зависят от возможностей снабжения транспортных энергоустановок топливом. Истощение запасов жидких углеводородных топлив и проблемы загрязнения окружающей среды могут поставить человечество перед выбором – либо сокращать транспортные перевозки, либо найти новые пути энергоснабжения транспорта. ЦЕЛЬ – рассмотреть используемые электрохимические технологии для производства водорода на автозаправочных станциях и функционирования двигателей гибридных электромобилей на аккумуляторных батареях с топливными элементами. Провести сравнительный анализ производства и использования энергии электрохимическими и традиционными методами на автотранспорте. МЕТОДЫ основаны на анализе литературных данных и проведении математических расчетов. Для легкового электромобиля было рассчитано количество электричества, которое можно получить в топливном элементе при переработке 1 кг водорода. Показано, что удельный расход топлива для водородного электромобиля составляет в среднем 1 кг водорода на 100 км. Водород может стать экологически безопасным топливом будущего, снизить глобальную зависимость от ресурсов ископаемого топлива и уменьшить выбросы углекислого газа в транспортной отрасли.

Ключевые слова: транспорт на водороде, альтернативное топливо, водородная энергетика, топливные элементы, водородные автозаправочные станции, электрохимические технологии, экология.

Филина О. А., Малозёмов Б. В., Щуров Н. И. Система генерации водородного топлива для бензиновых двигателей внутреннего сгорания легковых автомобилей // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 02 (419) 2024, с. 134-146

Filina O. A., Malozyomov B. V., Shchurov N. I. Hydrogen fuel generation system for petrol internal combustion engines passenger cars // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 02 (419) 2024, pp. 134-146

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

HYDROGEN FUEL GENERATION SYSTEM FOR PETROL INTERNAL COMBUSTION ENGINES PASSENGER CARS

Filina O. A.[1,2], Malozyomov B. V.[2], Shchurov N. I.[2]

[1]Kazan State Energy University, Kazan, Russia; olga_yuminova83@mail.ru
[2]Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia,
e-mail: borisnovel@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.134-146

Referred: 14.02.24 Received in revised form: 19.02.24 Accepted: 27.02.24

This article reviews advances in hydrogen fuel engine design; the main characteristics of the hybrid engine are studied; prospects for further research are outlined; development and improvement of engine designs, research of processes in engines running on natural gas and hydrogen. Transport is one of the key elements of modern civilization. Its condition and development prospects largely depend on the ability to supply transport power plants with fuel. The depletion of liquid hydrocarbon fuel reserves and problems of environmental pollution may present humanity with a choice – either to reduce transport transportation or to find new ways to supply energy to transport. OBJECTIVE: To review the electrochemical technologies used for the production of hydrogen at gas stations and the operation of hybrid electric vehicle engines using fuel cell batteries. Conduct a comparative analysis of the production and use of energy by electrochemical and traditional methods in vehicles. METHODS are based on analysis of literature data and mathematical calculations. For a passenger electric vehicle, the amount of electricity that can be obtained in a fuel cell by processing 1 kg of hydrogen was calculated. It has been shown that the specific fuel consumption for a hydrogen electric vehicle averages 1 kg of hydrogen per 100 km. Hydrogen has the potential to be the sustainable fuel of the future, reducing global dependence on fossil fuel resources and reducing carbon emissions from the transportation industry.

Keywords: hydrogen transport, alternative fuel, hydrogen energy, fuel cells, hydrogen filling stations, electrochemical technologies, ecology.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Филина
Ольга Алексеевна
Filina
Olga Alexeevna

Сведения об авторе:
Место работы: ассистент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского Государственного Технического Университета.
Образование: инженер-электромеханик, Казанский государственный энергетический университет**.**
Ученая степень: кандидат технических наук.
Область научных интересов: электроэнергетика, электротехника, электрические машины, системы управления.
Публикации: 80.
Индекс Хирша: 6.

About the author:
Place of work: assistant at the Department of Electrical Engineering Complexes, Novosibirsk State Technical University.
Education: electrical engineer, Kazan State Energy University.
Academic degree: Candidate of Technical Sciences.
Area of scientific interests: electrical power engineering, electrical engineering, electrical machines, control systems.
Publications: 80.
H-index: 6.

Малозёмов
Борис Витальевич
Malozyomov
Boris Vitalievich

Сведения об авторе:
Место работы: доцент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского Государственного Технического Университета.
Образование: инженер-электромеханик, Новосибирский Государственный Технический Университет.
Научное звание: доцент.
Ученая степень: кандидат технических наук.
Область научных интересов: электроэнергетика, электротехника, электрические машины, системы управления.
Публикации: 120.
Индекс Хирша: 8.

About the author:
Place of work: Associate Professor, Department of Electrical Engineering Complexes, Novosibirsk State Technical University.
Education: electrical engineer, Novosibirsk State Technical University.
Scientific title: associate professor.
Academic degree: Candidate of Technical Sciences.
Area of scientific interests: electrical power engineering, electrical engineering, electrical machines, control systems.
Publications: 120.
H-index: 8.

Щуров Николай Иванович
Shhurov Nickolay Ivanovich

Сведения об авторе:

Место работы: Д.т.н., профессор, заведующий кафедры электротехнических комплексов Новосибирского Государственного Технического Университета.

Образование: инженер-электромеханик, Новосибирский электротехнический институт.

Научное звание: профессор.

Ученая степень: доктор технических наук.

Область научных интересов:

электроэнергетика, электротехника, электрические машины, системы управления.

Публикации: 250.

Индекс Хирша: 12.

About the author:

Place of work: Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Engineering Complexes of the Novosibirsk State Technical University.

Education: electrical engineer, Novosibirsk Electrical Engineering Institute.

Scientific title: professor.

Academic degree: Doctor of Technical Sciences.

Area of scientific interests:

electrical power engineering, electrical engineering, electrical machines, systems management.

Publications: 250.

H-index: 12.

Список обозначений	
Аббревиатуры	
GM	General Motors – автомобильная корпорация
ОГ	Отработанные газы
КПД	коэффициент полезного действия
РФ	Российская Федерация
США	Соединённые Штаты Америки
ЕС	Евросоюз
АЗС	Автозаправочная станция
АТС	Автотранспортное средство
ТСВТЭ	Транспортные средства на базе водородных топливных элементов
ДВС	Двигатель внутреннего сгорания
Нижние и верхние индексы	
%	Проценты
$\varphi_{рс}$	$\varphi_{рс}$ – текущее значение угла поворота кривошипа, отсчитываемое от начала сгорания
φ_1 и φ_2	Углы от начала горения до достижения максимальной скорости выгорания соответственно в первой и во второй фазе сгорания
кВт*ч/кг	Количество энергии, отнесенное к массе
МДж/кг	Количество энергии, отнесенное к массе
атм	Атмосфер
млн	Миллион
млрд	Миллиард
тыс	Тысяча
км	Километр
л	Литр
$dQ_{подв}$	Элементарное количество теплоты, подведенной к рабочему телу при сгорании топлива
м^3	Метр кубический
H_2	Водород
O_2	Кислород
X_1 и X_2	Доли теплоты, выделившиеся ответственно в первой и во второй фазе
$\sum_1^n i\, idMi$	поток энтальпии, внесенный (+) и вынесенный (–) с элементарными массами *dMt* из объема цилиндра *V*, м^3
M	Масса рабочего тела в цилиндре
U	Удельная внутренняя энергия рабочего тела
pdV	Полезная работа
dQw	Теплота, отведенная в стенки камеры сгорания
p	Давление
T	Температура
$	Доллар
n_o, *n*	n_o, n – число оборотов двигателя при работе в исходном и расчетном режимах соответственно
a_0, *a*	Коэффициент избытка воздуха при работе в исходном и расчетном режимах соответственно
T_0, *T*	Средние за период сгорания значения температуры при работе в исходном и расчетном режимах соответственно
V_0, *V*	Объем газовоздушной смеси, поступающей в цилиндр при работе в исходном и расчетном режимах соответственно
G, *Gd*	Расходы газового и дизельного топлив
G_{dti}	Запальная порция топлива
Q_w	Низшая теплотворная способность топлива
Q_u	Потери тепла в стенке камеры сгорания
Q_g, Q_d	Низшая теплота сгорания газового и дизельного топлива соответственно
α	Коэффициент избытка воздуха

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Введение

Наиболее перспективным топливом не нефтяного происхождения на ближайшее будущее является природный газ, запасы которого значительно превышают нефтяные и при сгорании которого образуется меньше вредных веществ. В более отдаленной перспективе, предполагая, что ископаемые энергоносители будут близки к полному исчерпанию и основой энергетики станут ядерные или термоядерные установки, для транспорта будут использовать либо электромобили, либо тепловые двигатели, питаемые водородом. В этом случае возможно радикальным образом решить проблему загрязнения окружающей среды вредными выбросами.

Разработка, совершенствование и исследование двигателей, работающих на альтернативных топливах, связано с большими трудностями.

С учетом того, что замена топлива может кардинальным образом повлиять на все процессы, происходящие в двигателе, объективное прогнозирование перспектив применения новых видов топлива и необходимых для этого изменений конструктивных и регулировочных параметров требует, чтобы моделирование было комплексным и включало в связанную систему расчет всех основных явлений в двигателе. Особое внимание должно быть уделено процессам топливоподачи, смесеобразования, сгорания и формирования токсичных составляющих отработавших газов. Как убеждает мировой опыт, кардинальная модернизация автотранспорта возможна, прежде всего, за счет отказа от традиционных жидких нефтяных топлив и перехода на гибридные и полностью электрические автомобили, на базе водородных топливных элементов.

В сфере грузового автотранспорта и автобусов водород уже сейчас обладает экономическими преимуществами перед батарейным электрическим транспортом в отличие от водородных легковых автомобилей, которые пока являются дальнесрочной перспективой. Водородные технологии конкурируют не с традиционными способами получения электрической и тепловой энергии, а с системами декарбонизации энергетической системы: с улавливанием и хранением углерода и его оксидов, биоэнергетикой и тепловыми насосами.

В энергетической политике стран строго определено, что к 2050 году выбросы должны сократиться на 50 %. Россия имеет высокий потенциал для производства экологически чистого водорода.

1. Постановка задачи

Работы по уменьшению загрязнения воздуха ОГ автомобильного транспорта и по нормированию предельно допустимых концентраций токсичных веществ в отработавших газах автомобилей впервые проводились в США, в штате Калифорния, где в 1959 году были приняты стандарты на предельно допустимые концентрации окиси углерода и углеводородов. В современных розничных ценах на моторное топливо значительную долю составляет налоговая нагрузка (в России порядка 50 %), в некоторых странах ЕС она варьируется от 40-45 % (Австрия, Португалия, Швеция) до 60 % и выше (Нидерланды, Дания, Ирландия, Великобритания) [1]. В январе 2020 года Toyota предоставила 150 автобусов на водородном топливе.

Водород представляет собой один из трех основных вариантов по декарбонизации транспортной сферы наряду с биотопливом и электромобилями. В современном мире природный газ используется в качестве топлива в газодизелях, где воспламенение газовоздушной смеси происходит с помощью запальной порции дизельного топлива, а также в газовых двигателях с искровым зажиганием. Для газодизельных двигателей актуальными являются вопросы снижения запальной дозы и увеличение стабильности и давления впрыска при малых подачах топлива, а также определение рационального закона регулирования состава газовоздушной смеси в зависимости от режима работы двигателя. Значительные преимущества для двигателей с искровым зажиганием дает рабочий цикл с непосредственным впрыском топлива в цилиндр и расслоением заряда, что успешно используется в бензиновых двигателях.

Работы по конвертированию двигателей на водородное топливо ведутся в двух направлениях – создание двигателей, работающих на «чистом» водороде и на бензине с добавкой водорода. В ближайшей перспективе целесообразно использование бензоводородных двигателей по причине отсутствия водородной инфраструктуры, сравнительно высокой стоимости водорода и больших массогабаритных показателей систем хранения запасов водорода на борту транспортного средства. Применение водорода в качестве дополнительного топлива позволяет осуществить работу двигателя при частичных нагрузках на бедных топливовоздушных смесях, в результате чего значительно повышается экономичность и снижается токсичность отработавших газов двигателя. При этом наиболее эффективным является смешанное регулирование мощности двигателя.

К плюсам применения водородного топлива относятся:

– широкая распространенность водорода во вселенной (по оценкам астрофизиков, вселенная на 75 % по массе и на 90 % по количеству атомов состоит из водорода);

– преобразование водорода в электроэнергию

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

осуществляется быстро и эффективно (КПД топливных элементов достигает 60-70 % и более);

– продукты использования водорода и сам водород при утечке не наносят вреда окружающей среде;

– высокая легкость и способность к диффузии приводит к относительно низкой взрывоопасности (возгорание водорода происходит при концентрациях гораздо более низких, чем при его взрыве). При этом, сила взрыва водорода в 22 раза меньше, чем бензиновых паров, а жаропроизводительность водородного пламени – на 7 % меньше бензинового);

– Если АЗС компримирует водород до 700 атм., то примерный расход электроэнергии составляет 68 кВт*ч/кг.

– Уже в настоящее время существуют трубопроводы для транспорта водорода на большие расстояния. Причем теоретические потери энергии при транспортировке водорода оцениваются вдвое меньшими, чем при передаче электроэнергии по линиям электропередачи.

Существует в настоящий момент наиболее перспективный путь использования данного альтернативного топлива, заключающийся в использовании мелкодисперсной воды в дизельном топливе.

Предложенные способы регулирования бензоводородных двигателей получены, исходя из принципа улучшения экономических и токсических показателей двигателя при ограниченных расходах водорода. Не исследованы возможности улучшения характеристик двигателя при увеличении расхода водорода вплоть до работы двигателя на различных режимах с максимально возможной добавкой водорода, которая ограничивается появлением обратных вспышек. Крайне ограничены сведения о способах регулирования и топливной аппаратуре бензоводородных гибридных автобусов, использующих бортовой генератор получения водорода на основе взаимодействия энергоаккумулирующих веществ с водой. Специфика указанного способа (образование в генераторе вместе с водородом водяного пара) такова, что рассмотренные способы и характеристики регулирования и топливная аппаратура в данном случае не могут быть использованы без существенной доработки.

Большое значение при конвертировании двигателей на альтернативные топлива имеет разработка и применение математических моделей различных процессов в двигателе, позволяющих выбрать оптимальные конструктивные и регулировочные параметры, а также значительно сократить сроки и объем экспериментальных исследований. Одним из наиболее перспективных направлений альтернативной энергетики считается применение водорода в качестве источника возобновляемой энергии.

В настоящее время рынок аккумуляторных электромобилей, основанных на электрохимических технологиях производства энергии, стремительно растет, хотя все же есть некоторые недостатки, которые до сих пор остаются нерешенными, включая высокие инвестиционные затраты, небольшой запас хода, ограниченную инфраструктуру подзарядки и электричество на основе ископаемого топлива, сводящее к минимуму устойчивые преимущества технологии [4, 5]. На данный момент технология топливных элементов не настолько развита, чтобы составить конкуренцию электромобилям по цене, к этому же прибавляются упомянутые проблемы с водородной инфраструктурой.

Разработки и совершенствования конструкций двигателей, работающих на природном газе и водороде

Существующие газовые котлы могут работать на водородных смесях без значительных модернизаций. Водородные технологии могут помочь как в интеграции, так и в расширении производства электроэнергии с низким содержанием углерода. Для прогнозирования индикаторных и эффективных показателей газодизеля и бензоводородного двигателя разработаны математические модели рабочих процессов этих двигателей. Применяя метод паровой конверсии, можно получать водород разной чистоты: 95-98 % или особо чистый. После очистки от щелочи водород насыщен водяным паром и имеет температуру около 50 °С, т.е. требуется его охлаждение и осушка.

При анализе макропроцессов, происходящих в цилиндрах двигателей, достаточно удовлетворительные результаты дают нульмерные модели, основанные на хорошо известных уравнениях первого закона термодинамики для открытых систем, дополненные формулами для упрощенного расчета тепло- и массообмена на границах расчетной области. Рассчитаем, какое количество электричества можно получить в топливном элементе при переработке 1 кг водорода.

Основное исходное уравнение:

$$dQ_{\text{подв}} \pm \sum_1^n i\, idMi = d(MU) + pdV + dQ_w \qquad (1)$$

где $dQ_{\text{подв}}$ – элементарное количество теплоты, подведенной к рабочему телу при сгорании топлива;

$\sum_1^n i\, idMi$ – поток энтальпии, внесенный (+) и вынесенный (–) с элементарными массами dMt из объема цилиндра V;

M – масса рабочего тела в цилиндре;

U – удельная внутренняя энергия рабочего тела;

pdV – полезная работа;

dQw – теплота, отведенная в стенки камеры сгорания.

Предполагается, что рабочее тело обладает свой-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ствами идеального газа, кроме того, процессы, совершаемые над ним, квазиравновесны. Вторым базовым уравнением является уравнение состояния, которое в дифференциальной форме имеет вид

$$\frac{dp}{p}+\frac{dV}{V}=\frac{dM}{M}+\frac{dT}{T} \quad (2)$$

После несложных преобразований система дифференциальных уравнений для тактов сжатия-расширения приводится к виду:

$$\frac{dp}{d\varphi}=p\left[\frac{g_u Q_u dx}{Mc_v T d\varphi}-\frac{k}{V}\frac{dV}{d\varphi}-\frac{1}{Mc_v T}\frac{dQ_w}{d\varphi}\right] \quad (3)$$

где p – давление, T – температура, M – масса рабочего тела в цилиндре, к =c/cv – постоянная адиабаты рабочего тела, cv, cp – изохорная и изобарная теплоемкости рабочего тела, V – объем цилиндра, Qw – низшая теплотворная способность топлива, gu – цикловая подача топлива, Qu – потери тепла в стенках камеры сгорания, dx/dcp = F(p) – функция, описывающая процесс тепловыделения в цилиндре двигателя.

Таким образом, динамика тепловыделения в газодизеле, как и в дизеле включает два этапа, только второй участок динамики тепловыделения связан с распространением пламени от источника воспламенения до стенки камеры сгорания и последующим догоранием смеси за фронтом пламени. В качестве основы для численного описания процесса тепловыделения в газодизеле подходит формула:

$$\frac{dx}{d\varphi}=\frac{X_1}{\varphi_1}\left(\frac{\varphi_c}{\varphi_1}\right)exp\left(-0.5\left(\frac{\varphi_c}{\varphi_1}\right)^2\right)+\frac{X_{2(k_2-1)}}{\varphi_2}\left(\frac{\varphi_c}{\varphi_2}\right)^{k_2-1}exp\left(-\frac{k_{2-1}}{k_2}\left[\frac{\varphi_c}{\varphi_2}\right]\right)^2 \quad (4)$$

где X_1 и X_2 – доли теплоты, выделившиеся соответственно в первой и во второй фазе; φ_c – текущее значение угла поворота кривошипа, отсчитываемое от начала сгорания; φ_1 и φ_2 – углы от начала горения до достижения максимальной скорости выгорания соответственно в первой и во второй фазе сгорания.

Поскольку в газодизеле продолжительность задержки самовоспламенения превышает продолжительность впрыска запального топлива, можно считать, что здесь это количество теплоты определяется величиной запальной порции жидкого топлива. Однако по результатам эксперимента при равных количествах теплоты, введенной с дизельным топливом за время задержки самовоспламенения, величина X_i у газодизеля выше, чем у дизеля. Это позволяет сделать вывод о совместном сгорании в течение первой фазы дизельного топлива и газа, находящегося в зоне факела топлива, впрыснутого в цилиндр за период задержки воспламенения. Предложена формула, позволяющая ввести соответствующую поправку в оценку X_1, исходя из того, что в быстрое сгорание вовлекается часть газовоздушного заряда, соответствующая стехиометрическому соотношению дизельного топлива и воздуха:

$$X_1=\frac{\left(\frac{G_{dti}L_{od}}{\alpha(G_d L_{od}+G_g L_w)}\right)G_g Q_g+G_d Q_d}{G_g Q_g+G_d Q_d} \quad (5)$$

где G_{dti} – запальная порция топлива, $L_{od} > L_o$ – стехиометрические соотношения для дизельного и газового топлив, G, G_d – расходы газового и дизельного топлив, Q_g, Q_d, – низшая теплота сгорания газового и дизельного топлива, а – коэффициент избытка воздуха.

Расчеты X_1 по формуле хорошо согласуются с экспериментальными данными.

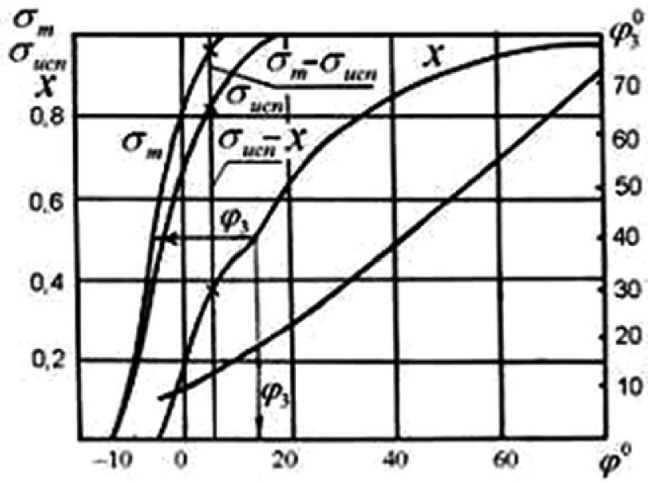


Рис. 1. Зависимость доли теплоты, выделившейся в первой фазе сгорания, от доли теплоты, введенной с дизельным топливом за время задержки воспламенения (Ne = 10 кВт, и n = 1500 об/мин, $\varphi_{ов}$ = – 38 °C).

Fig. 1. Dependence of stake of the warmth distinguished in the first phase of combustion, from the stake of the warmth entered with a diesel fuel in times of delay of self-ignition (Ne = 10 kW, and n = 1500 about/mines, $\varphi_{ов}$ = – 38 °C).

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Для второй фазы сгорания определяющим параметром является угол достижения максимальной скорости тепловыделения φ_2, который зависит от скорости распространения фронта пламени. Теоретический анализ влияния различных факторов на турбулентную скорость сгорания позволил получить безразмерный комплекс:

$$\frac{\varphi_2}{\varphi_{20}} \approx \frac{(T_0)(\alpha_0)(V_0 n_0)}{(T)(\alpha)(Vn)} = \Phi \qquad (6)$$

где n_o, n – число оборотов двигателя при работе в исходном и расчетном режимах; a_0, а – коэффициент избытка воздуха при работе в исходном и расчетном режимах; T_0, T – средние за период сгорания значения температуры при работе в исходном и расчетном режимах; V_0, V – объем газовоздушной смеси поступающей в цилиндр при работе в исходном и расчетном режимах.

Аппроксимация экспериментальных данных дает выражение

$$\varphi_2 = \left(0{,}339\left(\frac{T_0}{E}\right)\left(\frac{\alpha_0}{\alpha}\right)\left(\frac{V_0}{V}\right)\left(\frac{n_0}{n}\right) + 0{,}661\right)\varphi_{20} \qquad (7)$$

Важную роль в математическом моделировании рабочего процесса играет точность определения момента начала тепловыделения в цилиндре газодизеля.

Для этого необходимо иметь возможность расчета задержки самовоспламенения после подачи запального дизельного топлива. Как показали экспериментальные исследования (рис. 2), задержка самовоспламенения в газодизеле увеличивается по сравнению с дизелем, что связано, по-видимому, с наличием в объеме цилиндра стойких к воспламенению молекул метана.

Путем обработки экспериментальных данных получена следующая формула для определения задержки самовоспламенения в газодизеле:

$$\tau_i = 1{,}65_p^{-0{,}82} exp\left(\frac{2510}{T}\right) \qquad (8)$$

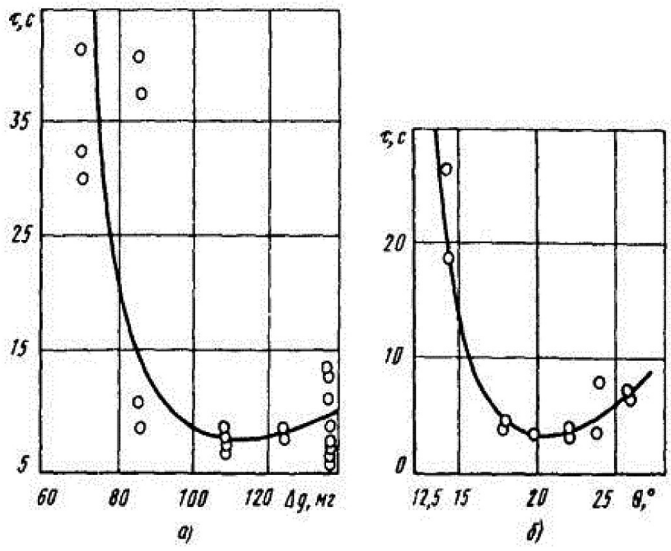


Рис. 2. Влияние угла опережения впрыска на период задержки самовоспламенения на номинальном режиме работы (*Ne* = 10 кВт, *n* = 1500 об/мин, 0,048 г/цикл)

Fig. 2. Influence of corner of passing of injection on the period of delay of spontaneous combustion on nominal office (*Ne* = 10 kW, *n* = 1500 about/mines, 0,048 г/cycle)

Для получения 1 м^3 H_2 и 0,5 м^3 O_2 при нормальных условиях необходимо затратить теоретически 805 г воды. Добавка пара в бензо-водородовоздушную смесь снижает эффективный предел обеднения смеси и, соответственно, КПД двигателя, поэтому на режимах частичных нагрузок добавка водяного пара в топливовоздушную смесь нецелесообразна. Расчетные характеристики регулирования состава бензо-водородовоздушной смеси, а также достигаемые при этом значения эффективного КПД двигателя и токсичности ОГ, представлены на рис. 3.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

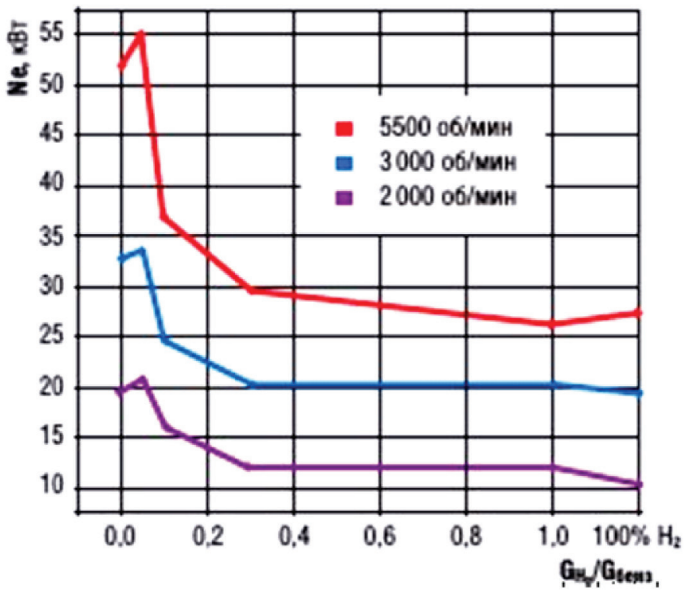


Рис. 3. Регулирование бензоводородного двигателя по максимальному КПД
Fig. 3. Regulation of the fuel-hydrogen engine according to maximum efficiency

Таким образом, с учетом проведенных расчетов, можно утверждать, что водородный легковой автомобиль с электрическими характеристиками как у Tesla3, сможет проехать на 1 кг водорода около 100 км. Отношение мощности тяговой аккумуляторной батареи к общей мощности (степень гибридизации) варьируется в зависимости от модели. Наилучшая топливная экономичность двигателя достигается при максимально возможной замене бензина водородным топливом. При этом на режимах больших нагрузок (участок АВ на зависимости а) добавка водорода ограничивается необходимостью достижения требуемой мощности, затем – возникновением обратных вспышек (участок ВС) и, наконец, при Pc < 0,5PC (участок СЕ) возможна работа двигателя на водородовоздушной смеси.

В автомобиле с водородным двигателем, как правило, есть два бака – с водородом и воздухом, при смешивании которых выделяется электричество. Регулирование мощности – смешанное (АД – качественное, ДЕ – количественное).

Для получения водорода разработан генератор на основе взаимодействия сплава магния с водой. В генераторе вместе с водородом образуется водяной пар.

На рис. 4 приведена принципиальная схема, показывающая функциональное взаимодействие основных систем транспортного средства, работающего на водородных топливных элементах (ТСВТЭ). При заправке водород закачивается в транспортное средство через заправочный блок и поступает в систему хранения водорода. Водород, закачиваемый и поступающий в систему хранения водорода, может быть либо в компримированном газообразном, либо сжиженном состоянии. При запуске транспортного средства газообразный водород постепенно высвобождается из системы хранения водорода. Посредством регуляторов давления и другого оборудования в системе подачи водородного топлива давление водорода снижается до соответствующего уровня, обеспечивающего функционирование системы топливных элементов. В последней системе водород вступает в электрохимическое взаимодействие с кислородом (из воздуха), и в результате такой реакции вырабатывается электрическая энергия высокого напряжения. Эта электроэнергия подается в систему электрической тяги и распределения энергии и используется для питания приводных электродвигателей и/или подзарядки аккумуляторных батарей и ультраконденсаторов. При этом виде генерации вода разлагается на кислород и водород под действием электрического тока. Электролиз имеет ряд преимуществ перед другими методами получения водорода:

– высокая чистота продукта до 99,9 %;

– простота и непрерывность технологического процесса, возможность автоматизации, отсутствие подвижных частей в электролизёре;

– получение ценных отходов – кислорода и тяжелой воды.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

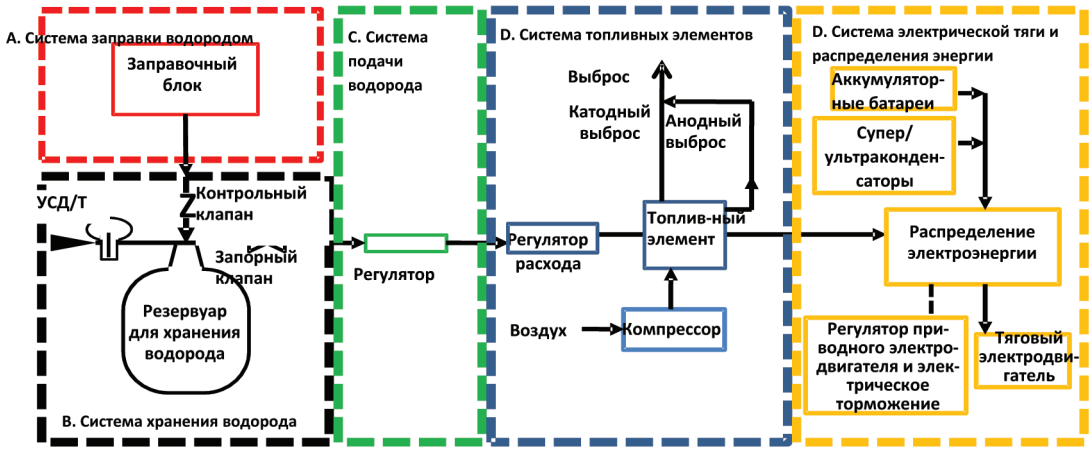


Рис. 4. Примерная принципиальная схема главных систем

Fig. 4. Exemplary fundamental chart of the main systems

Произведённого водорода достаточно для 40 км пробега битопливного автомобиля (водород/бензин) FordFocus, для технико-экономического обоснования решения перехода на водородное топливо в рамках всего жизненного цикла проекта, проведения комплексных испытаний, подтверждения соответствия требованиям безопасности. Необходимость замены автомобилей, работающих на ДВС на водородные, обосновывается постоянным ростом цен на дизельное топливо.

Система питания предусматривает регулирование на выходе из реактора содержания оксида и диоксида углерода в составе синтезированного газа, что исключает явления взрывного горения водорода и связанных с этим вибрациях двигателя, уменьшает водородную хрупкость металлов. Эксперты Минэнерго оценивают мировой рынок водородного топлива к 2040 году в $32–164 млрд.

В расчётах будем использовать среднюю дальность пробега автобуса, равную 19200 км в год, потребление водорода – 1 кг на 96 км пробега. Таким образом, одному автобусу на водородных топливных элементах в год требуется 200 кг водорода, или 0,55 кг в день. Один килограмм водорода считают равным по энергетической ценности одному галлону (3,78 л) бензина [2]. Заправка выполняется газом в сжатом или сжиженном состоянии. Рыночная стоимость «электролизного» водорода в Европе сейчас составляет около 9 евро за килограмм на 100 км пробега.

Таблица 1

Технико-экономические характеристики перспективных энергоустановок безрельсовых ТС

Table 1

Technical and economic characteristics of promising power plants for trackless vehicles

Вид ТС	Автобус на КПГ	Троллейбус с АХ	Гибр. автобус	Электробус
Мощность ТЭД, кВт	–	150	150	150
Энергоемкость ЛИА, кВт ч	–	45	–	500
Мощность ЛИА, кВт	–	150	–	150
Энергоемкость КДЭС, кВт-ч	–	–	2 / 0,5	–
Мощность КДЭС, кВт	–	–	150	–
Мощность ДВС, кВт	150	–	35/100	–
Расход топлива (энергии) на 100 км пробега	50 м^3	200 кВт-ч	35 м^3	200 кВтч
Вес энергоустановки, кг	1500	1800	2000	6000
Стоимость энергоустановки, т. руб.	1500	5000	4000	10 000
Стоимость топлива (энергии) при пробеге 300 тыс. км., т. руб.	1800	1500	1200	1500
Стоимость 6-летнего эксплуатационного цикла, т. руб.	3200	6500 без замены ЛИА	5200	11 500

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

На режимах пуска двигателя, загородного магистрального движения и при интенсивных разгонах автомобиля содержание водорода в топливной смеси снижается до 10-15 %. Для заправки водородом требуется построить сеть заправочных станций.

Для заправочных станций, заправляющих автомобили жидким водородом, стоимость оборудования выше, чем для заправочных станций, заправляющих автомобили жидким топливом (бензином, этанолом и дизельным топливом). (Согласно GM, строительство 12 тысяч водородных заправочных станций в 2015 году оценивалось в $12 млрд, то есть $1 млн на одну заправочную станцию, в то время как комплект оборудования для бензиновых заправочных станций стоит от $40 тыс., в среднем $100-200 тыс.).

2. Обсуждение

Разработка, совершенствование и исследование двигателей, работающих на альтернативных топливах, связано с большими трудностями, определяемыми отсутствием эмпирического материала, обычно используемого при аналогичных работах в случае применения традиционных топлив. Эти трудности могут быть наиболее эффективно преодолены с помощью методов математического моделирования. С учетом того, что замена топлива может кардинальным образом повлиять на все процессы, происходящие в двигателе, объективное прогнозирование перспектив применения новых видов топлива и необходимых для этого изменений конструктивных и регулировочных параметров требует, чтобы моделирование было комплексным и включало в связанную систему расчет всех основных явлений в двигателе. Особое внимание должно быть уделено процессам топливоподачи, смесеобразования, сгорания и формирования токсичных составляющих отработавших газов. В связи с этим сформулируем следующее. Если сравнивать автомобили на электрохимических технологиях в целом с традиционными авто на органическом топливе с двигателями внутреннего сгорания, то уже сейчас, помимо известных экологических, очевидны их экономические преимущества.

Достоверность результатов исследований достигается разработкой математических моделей на основе фундаментальных законов и уравнений механики, термодинамики, газодинамики, физической обоснованностью принятых допущений и подтверждается согласованием результатов расчета с экспериментальными данными. Достоверность результатов эксперимента обуславливается соблюдением действующих стандартов РФ, использованием поверенных и аттестованных измерительных приборов и оборудования.

Как показывает обзор разработок и исследований по созданию газодизельных двигателей, одной из основных проблем является обеспечение требуемых параметров впрыскивания топлива как при работе двигателя в режиме дизеля, так и в том случае, когда дизельное топливо является запальным. Для решения этой проблемы предложена специальная конструкция форсунки, особенностью которой является совмещение в одном корпусе двух распылителей с различными проходными сечениями сопловой части. В форсунке предусмотрены две независимые иглы, каждая из которых открывается при отдельно устанавливаемом давлении топлива и пропускает топливо к своему ряду сопловых отверстий. Давления открытия и суммарные проходные сечения каждого распылителя подбираются таким образом, чтобы при малых подачах топливо подавалось только или преимущественно через сопла малого сечения. Впрыск больших порций топлива производится через оба ряда сопел, то есть через большое сечение. Тем самым достигается согласование проходных сечений форсунки с режимом работы двигателя: пропуск топлива через малое сечение обеспечивает достаточно высокие давления впрыскивания, необходимые для качественного распыливания запального топлива; на дизельном режиме топливо впрыскивается через такое же сечение, как в базовом режиме.

Основная задача исследования – добиться расслоения впрыснутого топлива на всех эксплуатационных режимах, которое обеспечит гарантированное воспламенение топливно-воздушной смеси. Критериями качества расслоения топлива являются коэффициент избытка воздуха в районе свечи зажигания в момент подачи искры, и распределение топлива по объему камеры сгорания. Необходимо, чтобы локальный коэффициент избытка воздуха находился в небольшом диапазоне, что соответствует максимальной скорости сгорания газа. Кроме того, газ должен быть распределен по пространству таким образом, чтобы не было зон с переобогащенной или очень бедной смесью. Достичь данного эффекта возможно только при определенной конфигурации камеры сгорания, расположении свечи зажигания и форсунки, давлении впрыска топлива. Были исследованы несколько вариантов камер сгорания. Проводился анализ вихревого движения воздуха, скорости движения потока свежего заряда, зоны распространения вихря, продолжительность его существования. По результатам исследований предложен вариант камеры сгорания, способной обеспечить надежное воспламенение газовоздушной смеси при работе двигателя с суммарным коэффициентом избытка воздуха во всем диапазоне скоростных режимов. При разработке системы топливоподачи необходимо стремиться к минимизации давления впрыска для более эффективного использования объема баллона с газом и уменьшения затрат энергии на создание давления впрыска. Однако

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

уменьшение давления ниже определенного предела приводит к уменьшению интенсивности подачи топлива и ухудшению процесса расслоения, особенно при малых цикловых подачах.

Выводы

Перспективы решения топливной проблемы транспорта, основной энергетической установкой которого является двигатель внутреннего сгорания, связаны с применением газовых топлив, в первую очередь – природного газа, в дальнейшей перспективе – водорода.

Из этого вытекает необходимость более интенсивных разработок в области конструирования и исследования газовых двигателей. Распространенные на данный момент подходы, связанные с конвертированием обычных двигателей жидкого топлива для работы на газах, не всегда позволяют в полной мере использовать потенциал газовых топлив. Наиболее эффективным подходом к решению этих проблем является комплексная оптимизация, охватывающая конструкцию и настройку систем воздухоснабжения и топливоподачи, выбор состава рабочих смесей на различных режимах работы, при которых обеспечиваются наилучшие показатели по экономичности двигателя и токсичности отработавших газов.

Водород является одним из наиболее энергоемких топлив, его теплота сгорания почти в 3 раза выше, чем нефтяных моторных топлив и составляет 120 МДж/кг.

Достоинствами данных решений является их быстрая реализация в серийном производстве, использование существующей транспортной инфраструктуры (в случае синтеза водорода на борту АТС), значительное (до 45 %) снижение выбросов вредных веществ и улучшение экономичности (до 15-20 %) автомобиля. С этой позиции, имеются реальные предпосылки для снижения стоимости производства электромобилей и сопутствующей инфраструктуры в связи с определенной унификацией и масштабированием производства.

Международное энергетическое агентство заключает, что продажи автомобилей на топливных элементах могут достичь 8 млн к 2030 году и 150 млн к 2050 году.

Список литературы

[1]. Malyshenko S. P., Borzenko V. I., Dunikov D. O., Nazarova O. V. Metal hydride technologies of hydrogen energy storage for independent power supply system's constructed on the basis of renewable sources of energy // Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika). – 2012. – Т. 59. – № 6. – С. 468-478.

[2]. Шустров, Ф. А. Особенности использования водородного топлива в двигателях внутреннего сгорания для автономных гибридных энергетических систем https://science-education.ru/pdf/2013/5/127.pdf

[3]. Aneke M., Wang M. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review // Applied Energy. – 2016. – Т. 179. – С. 350-377.

[4]. Zhang X., Chan S. H., Ho H. K., Tan S. -C., Li M., Li G., Li J., Feng Z. Towards a smart energy network: The roles of fuel/electrolysis cells and technological perspectives // International Journal of Hydrogen Energy. – 2015. – Т. 40. – № 21. – С. 6866-6919.

[5]. Emonts B., Schiebahn S., Görner K., Lindenberger D., Markewitz P., Merten F., Stolten D. Re-energizing energy supply: Electrolytically-produced hydrogen as a flexible energy storage medium and fuel for road transport // Journal of Power Sources. – 2017. – Т. 342. – С. 320-326.

[6]. Oliveira D. S. A Three-Phase High-Frequency Semicontrolled Rectifier for PM WECS / D. S. Oliveira, M. M. Reis, C. Silva, L. B. Colado, F. Antunes, B. L. Soares // IEEE Transactions on Power Electronics. – Vol. 25. – № 3. – P. 677-685.

[7]. Ершов М. И., Прокофьев В. Е., Янович К. В. Расчет основных параметров инвертора для электроустановок на твёрдооксидных топливных элементах //ВА МТО, Санкт-Петербург. – 2019. – № 3(4). – С. 110-116.

[8]. Андриянов А. И., Булохов Н. М., Михальченко Г. Я. Управление динамикой импульсных преобразователей постоянного напряжения. – Электричество, 2013. – № 8. – С. 41-49.

[9]. Фаддеев Н. А., Беличенко М. А., Серик А. В., Соколова В. А., Смирнова Н. В. Исследование влияния изменения профиля нагрузки на производительность стека на основе топливных элементов с протонообменной мембраной. // [https://elektromekhanika.npi-tu.ru/index.php/electromeh/article/view/2277] doi.org/10.17213/0136-3360-2022-4-25-30.

[10]. Wang Y., Diaz D. F.R., Chen K. S., Wang Z., & Adroher X. C. Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells–a review // Materials today. – 2020. – Т. 32. – С. 178-203.

[11]. Васюков И. В., Павленко А. В., Батищев Д. В. Обзор и анализ топологий преобразователей систем электропитания на водородных топливных элементах для беспилотных летательных аппаратов киловаттного класса мощности // Изв. вузов. Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – № 2. – С. 19.

[12]. Borup, R., Meyers, J., Pivovar, B., Kim, Y. S., Mukundan, R., Garland. Scientific aspects of polymer electrolyte fuel cell durability and degradation // Chemical reviews. – 2007. – Т. 107. – № 10. – С. 3904-3951.

[13]. Ferreira H. L., Garde R., Fulli G., Kling W.,

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Lopes J. P. Characterisation of electrical energy storage technologies // Energy. – 2013. – Т. 53. – С. 288-298.

[14]. Aarhaug T. A., Svensson A. M. Degradation rates of PEM fuel cells running at open circuit voltage // ECS Transactions. – 2006. – Т. 3. – № 1. – С. 775.

[15]. Anastasiadis A. G., Konstantinopoulos S. A., Kondylis G. P., Vokas G. A., Papageorgas P. Effect off uelcell units in economic and environmental dispatch of a Microgrid with penetration of photovoltaic and microturbine units // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Т. 42. – № 5. – С. 3479-3486.

[16]. Мартюшев Н. В., Малоземов Б. В., Сорокова С. Н., Ефременков Е. А., Валуев Д. В., Ци М. Обзор моделей и методов определения и прогнозирования надежности технических систем и транспорта. Математика, 2023, 11, 3317. doi: 10.3390/math11153317

[17]. Мартюшев Н. В., Малоземов Б. В., Филина, О. А., Сорокова С. Н., Ефременков Е. А., Валуев Д. В., Ци М. Стохастические модели и обработка вероятностных данных для решения задачи повышения надежности грузового электрического транспорта. Математика, 2023, 11, 4836. doi: 10.3390/math11234836

[18]. Кукарцев В. В., Гозбенко В. Е., Конюхов В. Ю., Михалев А. С., Кукарцев В. А., Тынченко Ю. А. Определение надежности автономной работы городского электротранспорта по диагностическим параметрам. Мировой Электр. Вех. Дж. 2023, 14, 334. doi: 10.3390/wevj14120334.

[19]. Бойчук И. П., Гринек А. В., Мартюшев Н. В., Клюев Р. В., Малоземов Б. В., Тынченко В. С., Кукарцев В. А., Тынченко Ю. А., Кондратьев С. И. Методический подход к моделированию корабельной электроэнергетической системы. Энергии 2023, 16, 8101. doi: 10.3390/en16248101

[20]. Филина О. А., Тынченко В. С., Кукарцев В. А., Башмур, К. А., Павлов П. П., Панфилова, Т. А. Повышение эффективности диагностики щеточно-коллекторного узла электродвигателя постоянного тока. Энергии 2024, 17, 17. doi: 10.3390/en17010017

[21]. Сорокова С. Н., Ефременков Е. А., Валуев Д. В., Ци М. Анализ прогнозной математической модели изменений погоды на основе нейронных сетей. Математика 2024, 12, 480. doi: 10.3390/math12030480

[22]. Кукарцев В. В., Конюхов В. Ю., Опарина, Т. А., Севрюгина Н. С., Гозбенко В. Е., Кондратьев, В. В. Определение эксплуатационных характеристик тяговой батареи электромобиля. Мировой Электр. Вех. Дж. 2024, 15, 64. doi: 10.3390/wevj15020064.

[23]. Сорокова С. Н., Ефременков Е. А., Валуев Д. В., Ци М. Математическое моделирование параметров тягового оборудования электрических грузовых автомобилей. Математика 2024, 12, 577. doi: 10.3390/math12040577

References

[1]. Malyshenko S. P., Borzenko V. I., Dunikov D. O., Nazarova O. V. Metal hydride technologies of hydrogen energy storage for independent power supply system's constructed on the basis of renewable sources of energy // Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika). – 2012. – T. 59. – No. 6. – P. 468-478.

[2]. Shustrov, F. A. Features of the use of hydrogen fuel in internal combustion engines for autonomous hybrid energy systems https://science-education.ru/pdf/2013/5/127.pdf

[3]. Aneke M., Wang M. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review // Applied Energy. – 2016. – T. 179. – P. 350-377.

[4]. Zhang X., Chan S. H., Ho H. K., Tan S. -C., Li M., Li G., Li J., Feng Z. Towards a smart energy network: The roles of fuel/electrolysis cells and technological perspectives // International Journal of Hydrogen Energy. – 2015. – T. 40. – No. 21. – P. 6866-6919.

[5]. Emonts B., Schiebahn S., Görner K., Lindenberger D., Markewitz P., Merten F., Stolten D. Re-energizing energy supply: Electrolytically-produced hydrogen as a flexible energy storage medium and fuel for road transport // Journal of Power Sources. – 2017. – T. 342. – P. 320-326.

[6]. Oliveira D. S. A Three-Phase High-Frequency Semicontrolled Rectifier for PM WECS / D. S. Oliveira, M. M. Reis, C. Silva, L. B. Colado, F. Antunes, B. L. Soares // IEEE Transactions on Power Electronics. – Vol. 25. – No. 3. – P. 677-685.

[7]. Ershov M.I., Prokofiev V.E., Yanovich K.V. Calculation of the main parameters of an inverter for electrical installations using solid oxide fuel cells //VA MTO, St. Petersburg. – 2019. – No. 3(4). - WITH.110-116.

[8]. Andriyanov A. I., Bulokhov N. M., Mikhalchenko G. Ya. Control of the dynamics of pulsed DC voltage converters. – Electricity, 2013. – No. 8. – P. 41-49.

[9]. Faddeev N. A., Belichenko M. A., Serik A. V., Sokolova V. A., Smirnova N. V. Study of the influence of changing the load profile on the performance of a stack based on fuel cells with a proton exchange membrane. //[https://elektromekhanika.npi-tu.ru/index.php/electromeh/article/view/2277]doi.org/10.17213/0136-3360-2022-4-25-30.

[10]. Wang Y., Diaz D. F. R., Chen K. S., Wang Z., & Adroher X. C. Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells—a review // Materials today. – 2020. – T. 32. – P. 178-203.

[11]. Vasyukov I.V., Pavlenko A.V., Batishchev D.V. Review and analysis of topologies of converters of power supply systems based on hydrogen fuel cells for unmanned aerial vehicles of the kilowatt power class. Izv. universities Electromechanics. – 2022. – T. 65. –

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

No. 2. – P. 19.

[12]. Borup, R., Meyers, J., Pivovar, B., Kim, Y. S., Mukundan, R., Garland. Scientific aspects of polymer electrolyte fuel cell durability and degradation // Chemical reviews. – 2007. – T. 107. – No. 10. – P. 3904-3951.

[13]. Ferreira H. L., Garde R., Fulli G., Kling W., Lopes J. P. Characterisation of electrical energy storage technologies // Energy. – 2013. – T. 53. – C. 288-298.

[14]. Aarhaug T. A., Svensson A. M. Degradation rates of PEM fuel cells running at open circuit voltage // ECS Transactions. – 2006. – T. 3. – № 1. – C. 775.

[15]. Anastasiadis A. G., Konstantinopoulos S. A., Kondylis G. P., Vokas G. A., Papageorgas P. Effect off uelcell units in economic and environmental dispatch of a Microgrid with penetration of photovoltaic and microturbine units // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – T. 42. – № 5. – C. 3479-3486.

[16]. Martyushev N.V., Malozemov B.V., Sorokova S.N., Efremenkov E.A., Valuev D.V., Tsi M. Review of models and methods for determining and predicting the reliability of technical systems and transport. Mathematics, 2023, 11, 3317. doi: 10.3390/math11153317

[17]. Martyushev N. V., Malozemov B. V., Filina O. A., Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Valuev D. V., Tsi M. Stochastic models and processing of probabilistic data for solving the problem of increasing reliability of electric freight transport. Mathematics, 2023, 11, 4836. doi: 10.3390/math11234836

[18]. Kukartsev V.V., Gozbenko V.E., Konyukhov V.Yu., Mikhalev A.S., Kukartsev V.A., Tynchenko Yu.A. Determination of the reliability of autonomous operation of urban electric transport using diagnostic parameters. World Electr. Weh. J. 2023, 14, 334. doi: 10.3390/wevj14120334.

[19]. Boychuk I. P., Grinek A. V., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Malozemov B. V., Tynchenko V. S., Kukartsev V. A., Tynchenko Yu. A., Kondratyev S. . I. Methodological approach to modeling the ship's electrical power system. Energies 2023, 16, 8101. doi: 10.3390/en16248101

[20]. Filina O. A., Tynchenko V. S., Kukartsev V. A., Bashmur, K. A., Pavlov P. P., Panfilova, T. A. Increasing the efficiency of diagnostics of the brush-commutator unit of a DC electric motor. Energies 2024, 17, 17. doi: 10.3390/en17010017

[21]. Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Valuev D. V., Tsi M. Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks. Mathematics 2024, 12, 480. doi: 10.3390/math12030480

[22]. Kukartsev V.V., Konyukhov V.Yu., Oparina, T.A., Sevryugina N.S., Gozbenko V.E., Kondratiev, V.V. Determination of the operational characteristics of an electric vehicle traction battery. World Electr. Weh. J. 2024, 15, 64. doi: 10.3390/wevj15020064.

[23]. Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Valuev D. V., Tsi M. Mathematical modeling of the parameters of traction equipment of electric trucks. Mathematics 2024, 12, 577. doi: 10.3390/math12040577

Транслитерация по BSI

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭНЕРГЕТИКИ
ENVIRONMENTAL ASPECTS OF ENERGY

ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ
ENERGY AND ECOLOGY

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕГАПОЛИСОВ
ECOLOGICAL PROBLEMS OF INDUSTRIAL MEGAPOLISES

Статья поступила в редакцию 03.02.24 Ред. Рег. № 302-002-24 The article has entered in publishing office 03.02.24 Ed. Reg. No. 302-002-24

УДК 621.35

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

РАЗВИТИЕ ПОРТАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ

Малозёмов Б. В., Порсев Е. Г.

Новосибирский Государственный Технический Университет
630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20
Тел. +7-965-825-59-83, borisnovel@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.147-165

Заключение совета рецензентов: 12.02.24 Заключение совета экспертов: 16.02.24 Принято к публикации: 27.02.24

В работе впервые проведён анализ возможности применения малых топливных элементов для питания устройств автоматики, проанализированы их недостатки и преимущества, востребованности в современной электроэнергетике с учётом процессов характерных для низковольтных цепей управления. Рассмотрены возможности применения экономичного источника тока, как источника тока для аварийного питания приборов АСУТП, который может позволить создать эффективную коммерческую основу для внедрения данного решения в зону промышленного производства в условиях возможных перебоев в электроснабжении (Крайний Север, Дальний Восток, условия удалённости центрального энергоснабжения), проведен анализ областей применения топливных элементов. Определены технические характеристики элементов для питания устройств автоматики, проведен химический и электрический расчёт исследуемого топливного элемента.

Ключевые слова: водородная энергетика, топливный элемент, электроэнергетика, портативные источники энергии, регенерация.

Малозёмов Б. В., Порсев Е. Г. Развитие портативных источников энергии на основе водородного топливного элемента с регенерацией // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 02 (419) 2024, с. 147-165
Malozyomov B. V., Porsev E. G. Development of portable energy sources based on hydrogen fuel cell with regeneration // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 02 (419) 2024, pp. 147-165

DEVELOPMENT OF PORTABLE ENERGY SOURCES BASED ON HYDROGEN FUEL CELL WITH REGENERATION

Malozyomov B. V., Porsev E. G.

Novosibirsk State Technical University
630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20
Tel. +7-965-825-59-83, borisnovel@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.147-165

Заключение совета рецензентов: 12.02.24 Заключение совета экспертов: 16.02.24 Принято к публикации: 27.02.24

The paper was the first to analyze the possibility of using small fuel cells to power automation devices, analyze their disadvantages and advantages, and their demand in modern electric power industry, taking into account the processes characteristic of low-voltage control circuits. The possibilities of using an economical current source as a current source for emergency power supply of automated control system devices are considered, which can create an effective commercial basis for the implementation of this solution in an industrial production area in conditions of possible power outages (Far North, Far East, conditions of remoteness of the central power supply), An analysis of the areas of application of fuel cells was carried out. The technical characteristics of elements for powering automation devices have been determined, and chemical and electrical calculations of the fuel cell under study have been carried out.

Keywords: hydrogen energy, fuel cell, electric power, portable energy sources, regeneration.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Малозёмов
Борис Витальевич
Malozyomov
Boris Vitalievich

Сведения об авторе:
Место работы: доцент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского Государственного Технического Университета.
Образование: инженер-электромеханик, Новосибирский Государственный Технический Университет.
Научное звание: доцент.
Ученая степень: кандидат технических наук.
Область научных интересов: электроэнергетика, электротехника, электрические машины, системы управления.
Публикации: 120.
Индекс Хирша: 8.

About the author:
Place of work: Associate Professor, Department of Electrical Engineering Complexes, Novosibirsk State Technical University.
Education: electrical engineer, Novosibirsk State Technical University.
Scientific title: associate professor.
Academic degree: Candidate of Technical Sciences.
Area of scientific interests: electrical power engineering, electrical engineering, electrical machines, control systems.
Publications: 120.
H-index: 8.

Порсев
Евгений Георгиевич
Porsev
Evgenij Georgievich

Сведения об авторе:
Место работы: профессор кафедры электротехнических комплексов Новосибирского Государственного Технического Университета.
Образование: инженер-электромеханик, Новосибирский институт водного транспорта.
Научное звание: профессор.
Ученая степень: доктор технических наук.
Область научных интересов: электроэнергетика, электротехника, электрические машины, системы управления.
Публикации: 140.
Индекс Хирша: 9.

About the author:
Place of work: Professor of the Department of Electrical Engineering Complexes of the Novosibirsk State Technical University.
Education: electrical engineer, Novosibirsk Institute of Water Transport.
Scientific title: professor.
Academic degree: Doctor of Technical Sciences.
Area of scientific interests: electrical power engineering, electrical engineering, electrical machines, control systems.
Publications: 140.
H-index: 9.

Список обозначений

Буквы латинского алфавита	
C	Емкость
I	Сила тока
j	Плотность тока
m	Масса
n	Количество элементов
P	Мощность
q	Электрохимический эквивалент активного вещества
r	Радиус
R	Активное сопротивление
S	Площадь
t	Время
U	Напряжение
V	Объем
W	Удельная энергия
Нижние индексы	
уд	Удельный
ср	Средний
исп	Использования
раб	Работы
н	Нагрузка
факт	Фактическое
разр	Разряд
пит	Питание
яч	Ячейка
посл	Последовательно
пар	Параллельно
увелич	Увеличение
REF	Внутреннее базовое
OUT	Выходной
PEAK	Пиковый
Аббревиатуры	
ТЭ	Топливный элемент
МТЭРТ	Малый топливный элемент регенеративного типа
АСУТП	Автоматизированные системы управления технологии производства
АВР	Автоматический ввод резерва
ИБП	Источник бесперебойного питания
ПЛК	Программируемый логический контроллер
RMS	Среднеквадратичное значение

Введение

Водородные топливные элементы являются современными, функциональными источниками получения электрической энергии из водорода. Развитие топливных элементов определяется практическим интересом его применения для множества отраслей – от автономной электроэнергетики до транспорта [1-5]. В настоящее время одной из важнейших мировых проблем является нехватка энергоресурсов, что приводит к дефициту энергии. Существующие методы производства электроэнергии и высокий темп роста ее потребления приводят к разрушению окружающей среды. Поэтому одной из главных задач является переход к новым источникам энергии и возможность иметь «чистую энергетику».

С этой целью разрабатывается технология использования топливных элементов (ТЭ), которые представляют собой эффективный, надежный, долговечный и экологически чистый источник энергии. Одна из проблем при работе ТЭ – это получение исходных ресурсов для их работы.

Рассмотрим принцип действия топливных элементов на примере типа SOFC, как наиболее современного топливного элемента (Рис. 1).

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

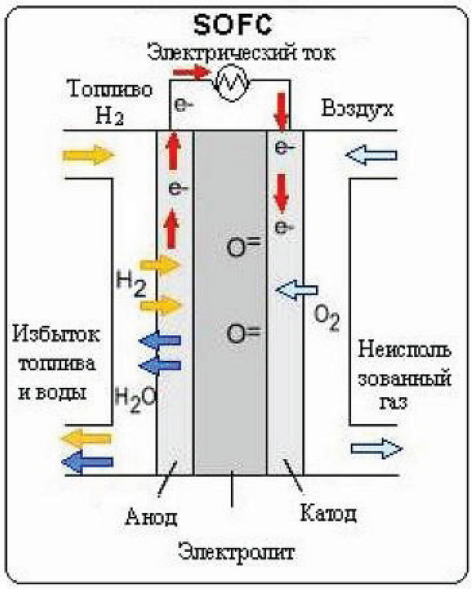


Рис. 1. Структурная схема топливного элемента технологии SOFC
Fig. 1. Block diagram of a SOFC technology fuel cell

Элемент состоит из двух электродов, разделенных электролитом, системы подвода топлива (H_2) на анод и окислителя (O_2) – на катод и системы для удаления реакционных продуктов. При протекании в электролите реакции синтеза возникает ЭДС. Внешней цепью топливный элемент подключён к нагрузке, которая потребляет вырабатываемую электроэнергию. Топливные элементы данного типа предполагают выделение большого количества тепла в процессе работы установки.

Основными минусами классических топливных элементов являются:

- сложность производства установки;
- сложность в производстве и транспортировке реагирующих веществ (жидкий кислород и водород);
- инертная структура производства электроэнергии;
- требовательность к дополнительной инфраструктуре;
- высокие температура и давление в процессе работы;
- пожаровзрывоопасность;
- высокая цена на этапе постройки;
- требование высокой компетенции обслуживающего персонала.

Именно эти параметры и ограничивают повсеместную реализацию топливных элементов, его ресурсного обеспечения и специфики управления им. Если данные параметры не будут пересмотрены, то топливные элементы останутся «уделом» больших генерирующих мощностей. В связи с этим разработка малого топливного элемента регенеративного типа – это актуальный вопрос малой генерации электроэнергии (МТЭРТ).

Целью исследования является исследование основных направлений электроэнергетики, требующих использования источников бесперебойного питания с предложением энергоэффективного МТЭРТ для применения в автоматизированных системах управления технологии производства (АСУТП). Анализ возможности применения экономичного источника тока, как источника тока для аварийного питания приборов АСУТП, который может позволить создать эффективную коммерческую основу для внедрения данного решения в зону промышленного производства в условиях возможных перебоев в электроснабжении в условиях удалённости от центрального энергоснабжения.

Основным отличием топливных элементов от аккумуляторных батарей является преобразование части энергии топлива, поступающего от внешнего источника. В процессе работы химический состав топливного элемента не изменяется, т.е. он не нуждается в перезарядке, в соответствии с рисунком 1. При использовании чистого водорода в качестве топлива, продуктами реакции, кроме вырабатываемой электрической энергии, являются также тепловая энергия и вода (или водяной пар), т.е. в атмосферу не выбрасываются газы, которые могут вызвать загрязнение окружающей среды. В связи с высокой химической активностью водорода процесс его получения представляет сложность и ограничивает развитие технологии ТЭ [1].

Основным преимуществом мембранных установок является возможность работы при разных давлениях разделяемого газа. Пример такой установки показан на рисунке 2. Кроме того, на мембранных установках, в отличие от адсорбционных и криоген-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ных систем, легко осуществляется регулирование чистоты получаемого водорода, что позволяет подобрать для установки наиболее оптимальный режим работы. Водородные установки на основе мембранного разделения не содержат изнашиваемых узлов, по этой причине они практически не требуют обслуживания. Полное отсутствие движущихся деталей в составе установок также является большим достоинством. Благодаря этому стало возможным производить исключительно надежное и неприхотливое в эксплуатации оборудование. При этом установки полностью автоматизированы, обладают отличными техническими характеристиками и очень компактны. Эксплуатировать мембранные водородные установки может персонал без специальной подготовки: поддержка и контроль всех рабочих параметров осуществляется электроникой. Срок службы водородных мембран составляет от 120 до 180 тыс. часов непрерывной работы.

Рис. 2. Общий вид мембранной водородной установки
Fig. 2. General view of a membrane hydrogen plant

Существуют различные виды ТЭ, которые выдвигают определенные требования к топливу и характеру его применения. Были изучены характеристики ТЭ, их анализ позволил определить, какой тип ТЭ целесообразно использовать.

Сравнение типов существующих ТЭ представлено в Таблице 1.

Таблица 1

Обзор типов топливных элементов

Table 1

Overview of fuel cell types

Тип ТЭ	Рабочая температура	КПД, %	Номинальная мощность	Требования к топливу
С протонообменной мембраной (*PEMFC*)	60-160	50-70	1-100	Высокие требования к качеству топлива, поскольку загрязненное топливо может вывести из строя мембрану, катализатор – платина
На основе ортофосфорной кислоты (*PAFC*)	150-200	70-80	200	Терпимо к примесям в ископаемых видах топлива, катализатор – платина
На основе расплавленного карбоната (*MCFC*)	600-700	70-85	250	Не склонно к окиси углерода и двуокиси углерода, устойчиво к примесям топлива, не требует драгоценных металлов катализатора
Твердооксидные топливные элементы (*SOFC*)	700-1000	85-80	250-5000	Не отравляются угарным газом (CO), который может быть использован в качестве топлива. Позволяют использовать газы из угля, не требуют драгоценных металлов катализатора. Допускают на несколько порядков больше серы, чем другие типы ячеек

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Из-за скорого распространения систем связи во всем мире, а также роста социально-экономической значимости технологии мобильных телефонов, необходимость надежного и экономичного резервного электропитания стала максимально остро. Убытки электросети на протяжении года из-за окружающей среды или ограничения мощности сети представляют собой постоянную проблему для операторов сети [2].

Классические решения в области резервного электропитания включают батареи (свинцово-кислотный элемент аккумуляторной батареи с клапанным регулированием) для резервного питания в течение непродолжительного времени и топливные генераторы для более продолжительного резервного питания. Батареи являются относительно дешевым источником резервного питания на 1-2 часа. Но аккумуляторные батареи не подходят для продолжительного питания, а стоимость их эксплуатации растёт с каждым годом их использования. Генераторы обеспечивают продолжительное резервное электропитание, но обладают большим количеством ограничений: низкая надёжность, обширное техническое обслуживание – а также выделяют в атмосферу загрязнения и газы, вызывающих парниковый эффект.

Основными достоинствами топливных ячеек являются: надежность, отсутствие шума, минимальное количество подвижных деталей, в сравнении с генератором, что делает их максимально энергоэффективными и безопасными. Также эксплуатационные затраты на такую ячейку во много раз ниже, чем на генератор. Они складываются из того, что техническое обслуживание данной системы неприхотливо и требует всего одного обслуживания в год. В итоге, топливный элемент является максимально экологичным источником электроэнергии, сохраняющим окружающую среду. Установки на топливных ячейках являются резервным электропитанием для критически важных инфраструктур сети связи: беспроводной, постоянной и широкополосной связи в системе телекоммуникаций в диапазоне от 250 Вт до 15 кВт. Основными плюсами перед конкурентами являются:

- надежность – малое количество подвижных деталей и отсутствие разрядки в режиме ожидания;
- энергосбережение;
- тишина – низкий уровень шумов;
- устойчивость – рабочий диапазон от – 40°C до + 50°C;
- адаптивность – установка на улице и в помещении (контейнер/защитный контейнер);
- высокая мощность – до 15 кВт;
- низкая потребность в техническом обслуживании – минимальное ежегодное техническое обслуживание;
- экономичность – привлекательная совокупная стоимость владения;
- экологически чистая энергия – низкий уровень выбросов с минимальным воздействием на окружающую среду.

Данные системы производят постоянный мониторинг напряжения на шине питания потребителей и включаются при его пропаже. Топливные элементы являются источником питания постоянного тока, поэтому для питания потребителей переменного рода тока требуется установка внешней инфраструктуры – как комплекс фильтров, так и батарея преобразователей. Ввиду того, что они используют топлива, то их время работы ограничено только запасами реагирующих веществ.

Использование классических батарей накладывает ряд ограничений, которые могут повлиять на эксплуатационные характеристики. К примеру, уровень зарядки (ограничение выходного напряжения), температура (скорость и качество химической реакции), количество циклов (срок службы) и другие непостоянные факторы. Топливные элементы практически не подвержены воздействиям данных параметров и могут обеспечивать питание, пока есть топливо. Данная особенность позволяет облегчить прогнозирование работы системы. Также в топливных элементах присутствует малое количество подвижных деталей, из-за чего повышается надёжность их работы по сравнению с конкурентами (пропановые и дизельные генераторы). Топливом является метанол, который легко смешивается с водой, имеет низкую точку замерзания (– 71 °C) и не распадается при длительном хранении [3].

Сети связи требуют высокой надёжности и длительного срока работы в чрезвычайных ситуациях (от нескольких часов до нескольких дней), если основное электропитание стало недоступным. Поэтому основным доводом применения топливных элементов в данных сетях является высокая общая надёжность и безопасность. Мощность таких топливных ячеек варьируется от 250 Вт до 15 кВт [4].

Сети передачи данных также являются особо ответственным потребителем, так как информация, передаваемая по ним, может быть критически важной: сети здравоохранения, массовой информации, сотовой связи и другие. Для обеспечения резервного питания таких сетей топливными элементами будут являться следующие факторы: надёжность работы и низкие требования к эксплуатации.

Типичные характеристики мест применений для использования установок на топливных ячейках в сетях передачи данных:

- Потребители от 100 Вт до 15 кВт;
- Автономная работа более 4 часов;
- Различные повторители и активные фильтры связи;
- Высокоскоростные сетевые узлы;
- Узлы WiMAX.

Благодаря тихой работе, малой массе, устойчи-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

вости к перепадам температур и функционированию практически без вибраций, топливные элементы можно устанавливать вне здания, в промышленных помещениях/контейнерах или на крышах, приготовления быстры и экологичны, т.к. топливо представляет собой экологически чистое решение для городской среды [4].

Бесперебойное питание цепей управления систем АСУТП является ключевой задачей любого технологического процесса. Информация, математические вычисления, базы данных должны непрерывно участвовать в процессах технологии производства. Перебой или остановка работы логических элементов управления могут привести к финансовым потерям, авариям или техногенным катастрофам.

Для резервирования питания данных цепей используются как системы автоматического ввода резерва (АВР), так и источники бесперебойного питания, основой которого являются батареи аккумуляторов. Данные решения имеют свои преимущества и недостатки:

Плюсы использования АВР:

− оперативность переключения питания;

− возможность работы без наличия питания на основном вводе (АВР на контакторах);

− отсутствие необходимости применения программируемых логических контроллеров (ПЛК).

Минусы использования АВР:

− «Слепая система» – при отсутствии логических контроллеров нет возможности настраиваемого автоматического управления;

− управление питанием возможно только по заранее заложенным алгоритмам;

− при отсутствии напряжения на резервных вводах питания – защищаемая система остаётся без питания.

Плюсы использования ИБП:

− использование ИБП позволяет обеспечить питание цепей управления без наличия напряжения на питаемых вводах;

− гибкая система настраивания резервных емкостей за счёт возможного расширения количества аккумуляторных батарей;

− возможность настройки алгоритмов работы питания: отдельных цепей, питания ПЛК или всего шкафа управления.

Минусы использования ИБП:

− дорогостоящая система: высокая стоимость элементов;

− дороговизна в обслуживании;

− низкая надёжность из-за малого срока службы аккумуляторных батарей [5].

Применение топливных элементов позволит избавиться от большинства недостатков «классических» систем бесперебойного питания цепей АСУТП:

− низкая стоимость комплектующих системы;

− гарантированное бесперебойное питание защищаемых систем;

− высокий коэффициент отношения производимой мощности к габаритам;

– малая стоимость электроэнергии, производимой топливным элементом.

Недостатки существующих систем:

− взрывопожароопасность реагирующих компонентов (применение водорода и кислорода в жидком виде);

− сложность в эксплуатации;

− требование обширной инфраструктуры: топливного элемента, подвода/отвода реагентов, баков хранения, взрывобезопасное оборудование и т.д.;

− высокая температура (+ 300 С°) и давление (до 110 кг/см^3) топлива во время работы.

Таким образом, нами был проанализирован сегмент рынка топливных элементов, плюсы и минусы применения в существующих низковольтных сетях.

1. Постановка задачи

Для разработки малого топливного элемента регенеративного типа (МТЭРТ) были предложены следующие исходные данные, которые приведены в Таблице 2.

Основной задачей в разработке бесперебойного обеспечения электроэнергией контроллера М221 [6] – шкафа управления электрообогревом предизолированных импульсных линий – ставилась подача серы. В случае остановки системы, сера кристаллизируется в течение 30 минут. В результате остановки предстоит полная замена импульсных линий, вследствие невозможности их последующей очистки. Замена оборудования системы обойдётся более чем в 6000 евро. Схема шкафа управления электрообогревом представлена на рисунке 3.

В результате анализа предполагается дублирование блока питания. В случае пропажи напряжения, проектируемый топливный элемент должен автома-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

тически произвести замену питающего постоянного напряжения 24 В ПЛК. Питание электрообогрева пропадёт из-за пропажи переменного напряжения 220 В, но питание температурных датчиков класса PTD100 приемлемо для передачи информации с них на верхний уровень АСУТП на автоматизированное рабочее место оператора (АРМ).

Таблица 2

Технические характеристики МТЭРТ

Table 2

Technical characteristics of SRFC

№	Параметр	Требуемый показатель
1	Количество фаз нагрузки	1
2	Номинальное напряжение на нагрузке, В	24
3	Частота напряжения на нагрузке, Гц	постоянный ток
4	Гальваническая развязка нагрузки	Да
5	Тип питаемого оборудования	ПЛК
6	Ток, потребляемый нагрузкой, А	0,2
7	Время автономной работы, мин.	60
8	Среднее число отказов питания за промежуток времени	1 раз в месяц
9	Запас по мощности на развитие системы	20 %
10	Удалённый контроль, мониторинг	RS485, протокол Modbus RTU
11	Дополнительное оборудование	нет
12	Максимальная температура в помещении, ^{0}C	40
13	Минимальная температура в помещении, ^{0}C	15
14	Средняя температура в помещении, ^{0}C	25
15	Планируемая площадь для размещения оборудования, м^2	0,3
16	Дополнительные параметры	1. Установка на DIN-рейку 2. Реализация IP55 3. «Горячая» замена модулей

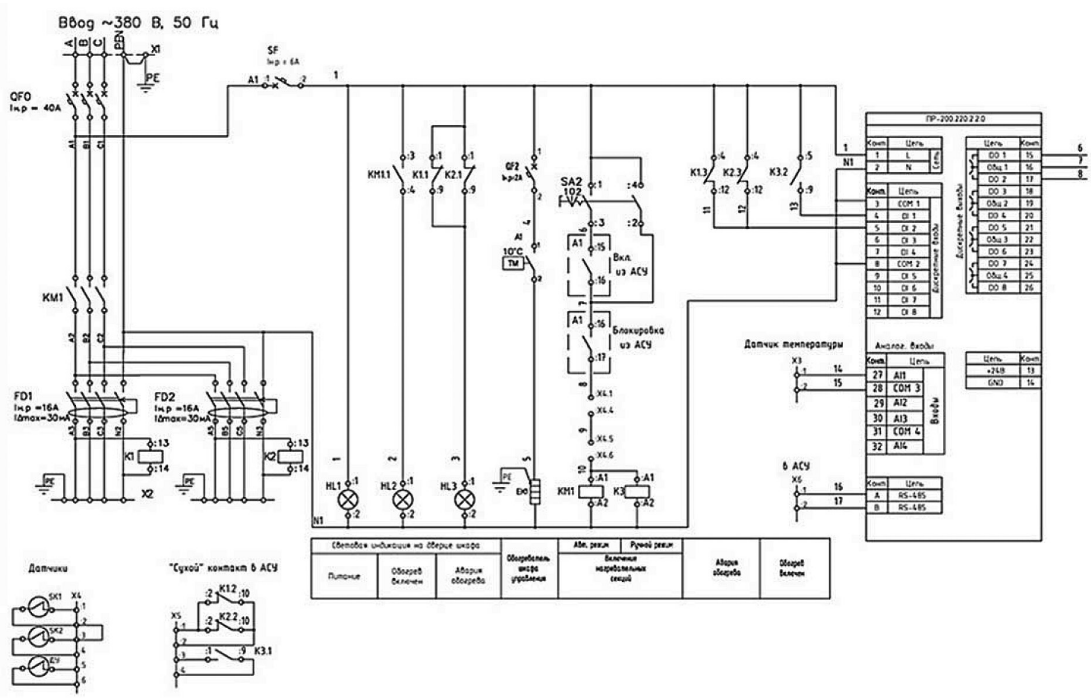


Рис. 3. Принципиальная схема шкафа электрообогрева
Fig. 3. Schematic diagram of electrical heating cabinet

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

2. Химический анализ топливного элемента

Составление электрохимической реакции предполагает использование нескольких параметров:

− Установка топливного элемента в существующий шкаф АСУТП.

− Шкаф установлен в помещении, не имеющем категории взрывопожароопасной зоны (общепромышленные условия).

− Задача не предполагает использования тепловой энергии, которую производят классические топливные элементы.

В связи с этим требуется разработка топливного элемента, не имеющего данных особенностей. Блок-схема данного устройства показана на рисунке 4.

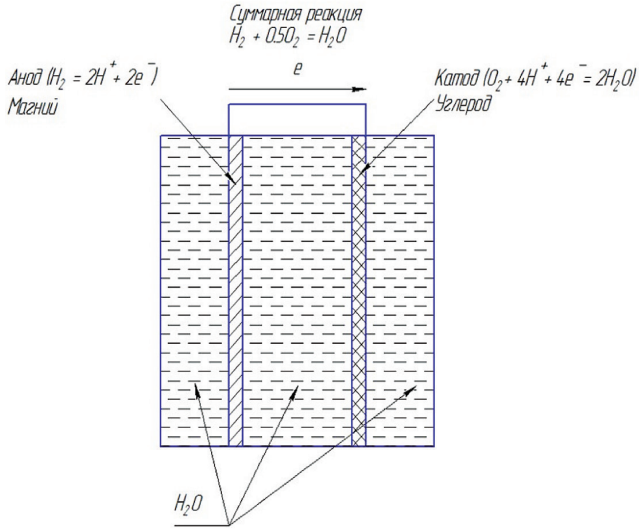


Рис. 4. Блок-схема химической реакции разложения магния водой
Fig. 4. Block diagram of the chemical reaction of the decomposition of magnesium with water

Известно, что процесс электрохимического окисления водорода состоит из нескольких стадий [7]:

1. Растворение газообразного водорода в электролите;

2. Диффузия растворенного водорода к поверхности электрода;

3. Адсорбция водорода на поверхности электрода;

4. Диссоциация молекулы водорода на атомы, их частичное растворение в материале электрода с образованием твердого раствора внедрения и диффузия атомов к активному центру электрокатализатора:

$$H_2 = 2 \text{ x } H_{адс} \quad (1)$$

5. Электрохимические стадии переноса заряда, ионизация:

$$H_{адс} + H_2O = H_3O^+ + e^-; \quad (2)$$

$$H_{адс} + OH– = H_2O + e^-; \quad (3)$$

6. Десорбция продуктов электрохимической реакции. Следует отметить, что стадии диссоциации и переноса заряда для ряда материалов заменяются стадией электрохимической десорбции, которая в кислой среде выражается следующим образом:

$$H_2 + H_2O = H_3O^+ + H_{адс} + e^-; \quad (4)$$

Для производства электроэнергии нами была выбрана реакция взаимодействия магния с водой:

$$Mg+2H_2O = Mg(OH)_2 + H_2; \quad (5)$$

Токообразующая анодная реакция сводится к ионизации водорода:

$$2H_2O = H_3O^+ + OH^-; \quad (6)$$

Константа равновесия процесса диссоциации воды, как и для любого равновесного процесса, может быть представлена в виде:

$$K_c = \frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]}, \quad (7)$$

где H_3O^+ − катион гидроксония;

H^+ − концентрация ионов (протонов);

OH^- − концентрация гидроксид-ионов;

H_2O − концентрация воды (в молекулярной форме) в воде;

Базовый потенциал химической реакции:

$$E_0 = 2{,}34 \text{ В}; \quad (8)$$

где E_0 – базовый потенциал химической реакции.

Поскольку при разряде поверхность магния переходит в активное состояние, реализуется элемент «магний-вода» при разности стандартных электрод-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ных потенциалов более 1,5 В. В результате, на электродной поверхности одновременно с разрядом протекает саморазряд магния, который суммируется из двух сопряжённых реакций – анодного растворения магния и катодного восстановления воды. Повышение температуры ускоряет саморазряд.

С ростом тока скорость саморазряда увеличивается. Это приводит к тому, что анодный стандартный потенциал магния оказывается ниже ожидаемого (в морской воде около 1,5 В).

Назначение положительного электрода (угольного стержня) – создать необходимые условия для протекания токогенерирующей реакции:

$$O_2 + e^- + H_2O = HO_2 \quad (9)$$

Удельная энергия данной реакции:

$$W_{уд} = \frac{j \cdot s \cdot U_{ср} \cdot t}{m} = \frac{90 \cdot 0,00136 \cdot 2,34 \cdot 50}{0,09} = 159,12,\ Вт \cdot ч / кг \quad (10)$$

Удельная мощность:

$$P_{уд} = \frac{j \cdot s \cdot U_{ср}}{m} = \frac{90 \cdot 0,00136 \cdot 2,34}{0,09} = 3,2,\ Вт / кг \quad (11)$$

где j − плотность тока, (90 А/м^2), S − поверхность электрода, м^2, $U_{ср}$ − среднее напряжение разряда, В, t − время разряда, ч, m − масса ТЭ.

В данном опыте удельная энергия – 140-170 Вт/ч·кг, удельная мощность 2-5 Вт/кг.

Время реакции магния с водой при температуре + 25 °С составит около 50 часов. В процессе предварительного расчёта химической реакции была получена удельная энергия и удельная мощность химической реакции. Расчёт вёлся по предполагаемым габаритам топливной ячейки.

3. Анализ электротехнических свойств топливного элемента

Анализ электрической мощности топливного элемента, достаточного для поддержания бесперебойной работы системы, эффективно выполнять через определение ёмкости топливной ячейки, а также через подбор оптимальной системы стабилизации напряжения.

Важнейшим параметром, характеризующим источник, является электрическая ёмкость. При разряде ёмкость равна [8]:

$$C = \int_0^t I dt; \quad (12)$$

где С – ёмкость источника, А·ч, I – сила тока, А, t – время.

Для реализации ёмкости источника С масса активного вещества электрода должна составить:

$$m = C \cdot q; \quad (13)$$

где m – масса реагируемого вещества,

q – электрохимический эквивалент активного вещества.

Активное вещество используется не полностью. Ёмкость источника с учётом использования массы электрода:

$$C = \frac{m}{q} \cdot K_{исп}; \quad (14)$$

где $K_{исп}$ – коэффициент использования.

В расчёте $K_{исп}$ принимается 50 % и электрохимическим эквивалентом вещества (Mg) – 0,45 г/А·ч.

Для расчета емкости ТЭ для заданной мощности и времени работы применяется простая формула:

$$P = 100 \cdot t_{раб} \cdot P_H, \quad (15)$$

где $t_{раб}$ – время бесперебойной работы (1 час),

P_H – мощность потребляемой нагрузки (0,005 кВт).

Исходя из этого, получаем, что ёмкости ТЭ требуется не менее Р = 5 Вт, при напряжении 24 В. Для перевода в А·ч воспользуемся формулой:

$$C_{факт} = \frac{P \cdot t}{U}; \quad (16)$$

Ёмкость, требуемая для поддержания ПЛК в рабочем состоянии, составит С1 = 0,21 А·ч, т.к. реакция длится 50 часов емкость фактическая требуется:

$$C_{факт} = C1 \cdot 50 = 0,21 \cdot 50 = 10,5\ А \cdot ч; \quad (17)$$

Найдём величину тока, решив интегральное уравнение:

$$10.5 = \int_0^{50} I_{разр} dt = 50 \cdot I_{разр.}; \quad (18)$$

$I_{разр}$ = 0,21 А.

Тогда масса активного вещества одной ячейки:

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

$$m = \frac{C_{факт} \cdot q}{K_{исп}} = 9.45\ г \text{ активного вещества;} \quad (19)$$

Найденная нами масса показывает количество только активного вещества.

Для получения максимальной выходной мощности с одного элемента потребуется

$$V = \frac{m}{\rho} = 5.437\ см^3,$$

где V – объём активного вещества, ρ – плотность магния.

В процессе работы используется не более 1 мм активного вещества. Поэтому для максимального взаимодействия потребуется картридж толщиной не менее 4 мм, следовательно, другие стороны будут:

$$a = \sqrt{\frac{V}{d}} = \sqrt{\frac{5.437}{0.4}} = 3.68\ см,$$

для параллелепипеда; (20)

Разработанный концепт картриджа показан на рисунке 5.

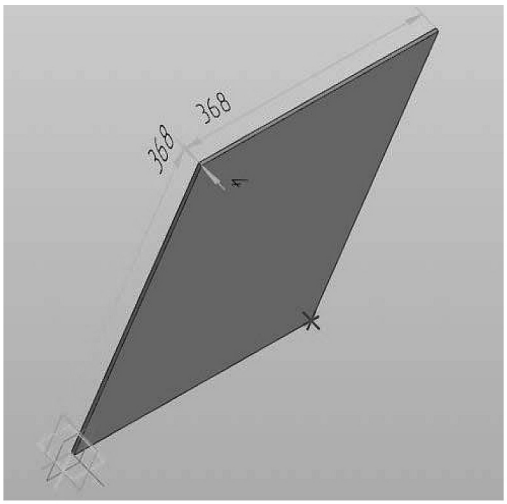


Рис. 5. Концепт картриджа магния для топливной ячейки (квадратный)

Fig. 5. Magnesium cartridge concept for fuel cell (square)

Радиус топливной ячейки R определим как

$$r = \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot d}} = \sqrt{\frac{5.437}{3.14 \cdot 0.4}} = 2.08\ см \text{ для цилиндра.}$$

Концепт цилиндрического картриджа представлен на рисунке 6.

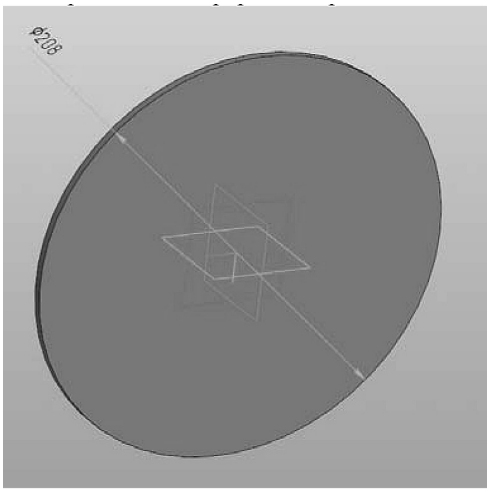


Рис. 6. Концепт картриджа магния для топливной ячейки (круглый)

Fig. 6. Magnesium cartridge concept for fuel cell (round)

Форма цилиндра для магниевого картриджа принята из-за несложности использования в топливных установках в виду: простоты эксплуатации, облегчения замены, увеличения площади поверхности активного вещества.

Далее был выполнен расчет количества топливных ячеек. Для увеличения напряжения до 24 вольт потребуется подключение следующего количества МТЭРТ последовательно:

$$= \frac{U_{пит}}{U_{яч}} = \frac{24}{2.34} = 10.25 \approx 11 \text{ элементов.}$$

где $n_{посл}$ – количество элементов, соединённых последовательно;

$U_{пит}$ – напряжение питания потребителя;

$U_{яч}$ – напряжение разряда одной ячейки.

С учётом тока разряда топливного элемента $K_{разр}$ = 0,21 А, потребуется увеличение величины тока заряда до 0,2 А. Согласно первому закону Кирхгофа:

$$n_{пар.} = \frac{I_{зар}}{I_{яч.}} = \frac{0.2}{0.21} = 0.95 \approx 1$$

где $n_{пар.}$ – количество элементов, соединённых параллельно, $I_{зар}$ – ток питания потребителя, $I_{яч}$ – ток разряда одной ячейки.

В результате расчётов мы получаем, что при использовании топливных ячеек с комбинацией последовательно-параллельного подключения потребуется не менее 11 топливных ячеек для питания ПЛК класса Modicon M221.

Нами был рассчитан топливный элемент на 11 топливных ячеек (подключённых последовательно). Мощность 1 ячейки топливного элемента равна:

$$P_{яч} = U_{яч} \cdot I_{яч} = 2{,}34 \cdot 0{,}21 = 0{,}491 \text{ Вт,} \quad (21)$$

где $P_{яч}$ – мощность одной ячейки.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Мощность всей системы при применении схемы в 11 элементов:

$$P_{сис.\ 11-1} = U_{11} \cdot I_{11} = 25{,}74 \cdot 0{,}21 = 5{,}41 \text{ Вт}, \qquad (22)$$

где $P_{сис.\ 11-1}$ – мощность линейки ТЭ 11-1, U_{11} – выходное напряжение системы 11-1 (2,34 В · 11 = 25,74 В), I_{11} – выходной ток системы 11-1 (0,21 · 1 = 0,21 А).

С последующим возможным расширением системы резервирования контроллера потребуется увеличение мощности до 23,3 Вт для питания блоков расширения ПЛК. При этом сила тока питания будет:

$$I_{сис.расшир} = \frac{P_{сис.расшир}}{U_{пит.}} = 23{,}3/24 = 0.97 \text{ А}$$

где $I_{сис.расшир.}$ – ток потребителя с учётом полной нагрузки системы, $P_{сис.расшир}$ – мощность потребителя, с учётом полной нагрузки системы.

С учетом увеличения мощности на полную нагрузку:

$$K_{увелич} = \frac{P_{сис.расшир}}{P_{сис.11-1}} = 23{,}3/5.41 = 4.3 \text{ раз}$$

где $К_{увелич.}$ – коэффициент увеличения мощности с учётом полной нагрузки.

Рассчитаем кол-во элементов с учётом увеличения количества топливных ячеек для повышения выходной мощности:

$$n_{послед} = \frac{U_{пит}}{U_{яч.}} = 24/2.34 = 10.25 \rightarrow 11 \text{ элементов}$$

$$n_{пар.} = \frac{I_{зар.}}{I_{яч.}} = 0.97/0.21 = 4.61 \rightarrow 5 \text{ элементов}$$

При этом данное решение имеет ряд недостатков:

− напряжение напрямую зависит от напряжения на последовательных плечах ячеек;

− отсутствует стабилизация выходного тока;

− низкое качество электроэнергии;

− сложное контролирование проходящей реакции.

Преимущества:

− дешевизна производства МТЭРТ.

Для последующего расширения системы, в том числе для питания блоков расширения ТМ3, может потребоваться увеличение мощности. Данное решение потребует увеличения плеч ячеек, что приведёт к серьёзному усложнению эксплуатации и повышенному запасу мощности. Так как реакция длится 50 часов (что также приводит к 50-кратному увеличению работы ПЛК в автономном режиме), реакцию сложно контролировать в условиях автономной работы после активации топливного элемента – это приведёт к увеличению расхода магния.

Для увеличения напряжения на источнике постоянного тока потребуется применение DC/DC конвертера.

4. Применение DC-DC преобразователя

Для питания маломощных нагрузок выгодно использовать DC/DC преобразователи ввиду малых габаритов, простоты проектирования, сборки и эксплуатации, а также минимальных потерь электроэнергии [9].

Максимально распространены на рынке преобразователи с индуктивностью. Их характерным отличием является отсутствие гальванической развязки между элементами, а также наличие собственного источника питания. Ключевыми элементами часто выступают биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) и полевые транзисторы разного типа (FET).

Типы конвертеров с индуктивностью:

− Понижающий импульсный DC-DC преобразователь. В роли ключа выступает транзистор, управляемый с помощью широтно-импульсного модулятора.

− Повышающий импульсный DC-DC преобразователь. Его особенности мы рассмотрим ниже.

Преобразователь с регулируемым выходным напряжением

Данные устройства позволяют задать и регулировать выходное напряжение. Это требуется при использовании Li-ионных батарей, ввиду падения напряжения на источники при длительной эксплуатации, что может привести к ускорению износа потребителя или его аварии. Авторами предложена структура DC-DC преобразователя, которая представлена на рисунке 7.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

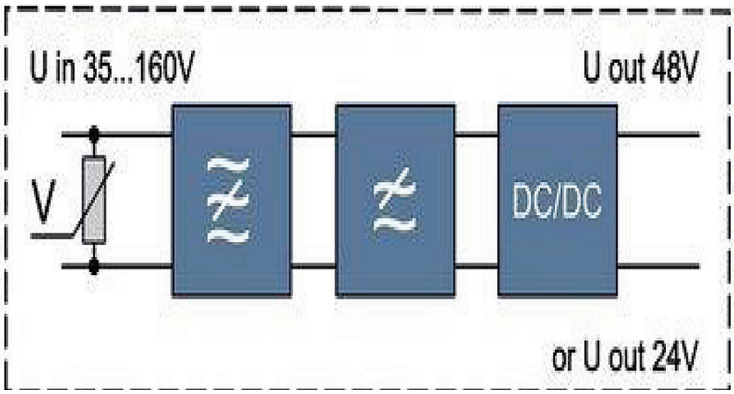


Рис. 7. Структурная схема преобразователя DC-DC
Fig. 7. DC-DC converter block diagram

Такие преобразователи используют импульсные трансформаторы, благодаря чему у них отсутствует гальваническая связь между источником и потребителем, что многократно повышает его срок службы и надёжность. Такие устройства обладают большой разницей потенциалов между входным и выходным напряжением. Они используются в блоках питания импульсных фотовспышек, входное напряжение которых около 400 В [10].

В нашей работе будет применён DC-DC преобразователь без индуктивности, ввиду малой нагрузки системы, большим диапазоном регулирующего напряжения и простоты установки. Поэтому был выбран MT3608 производства AEROSEMI.

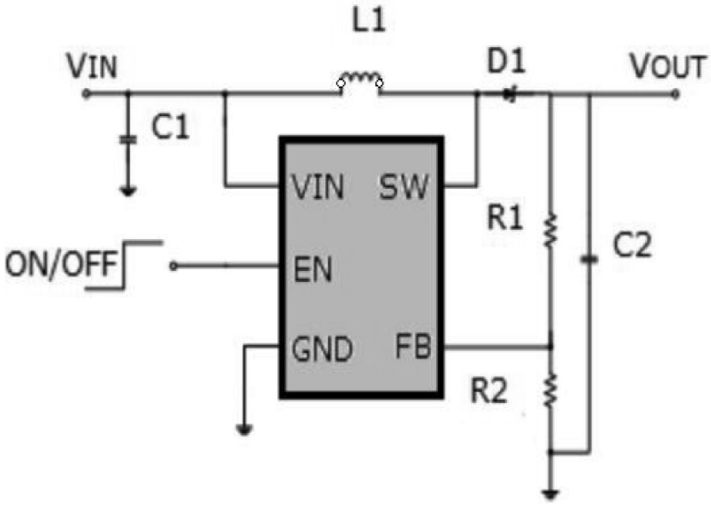


Рис. 8. Структурная схема подключения MT3608
Fig. 8. MT3608 connection block diagram

MT3608 − это 6-контактный повышающий преобразователь SOT23 с постоянной частотой, предназначенный для небольших приложений с низким энергопотреблением. MT3608, структурная схема которого показана на рисунке 8, переключается на частоте 1,2 МГц и позволяет использовать крошечные недорогие конденсаторы и катушки индуктивности высотой 2 мм или меньше. Внутренний плавный пуск приводит к небольшому пусковому току и продлевает срок службы батареи.

MT3608 имеет автоматический переход в режим частотно-импульсной модуляции при малых нагрузках. MT3608 включает в себя блокировку пониженного напряжения, ограничение тока и защиту от тепловой перегрузки для предотвращения повреждений в случае перегрузки на выходе. MT3608 доступен в небольшом 6-контактном корпусе SOT-23. Абсолютные максимальные значения MT3608 приведены в таблице 3.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Таблица 3

Предельные значения DC-DC Converter MT3608

Table 3

MT3608 DC-DC Converter limit values

АБСОЛЮТНЫЕ МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ			
IN, EN напряжения	− 0,3 V to 26 V	SW Напряжение	− 0,3 V … 30 V
Рабочая температура	− 40 °C to + 85 °C	Диапазон температур хранения	− 65 °C … 150 °C
Напряжения FB	− 0,3 V to 6 V	Пиковое потребление SW и ток источника	4 A
Температура перехода	160°C	Предельная температура (10 секунд)	+ 300 °C

Для возможности применения данного конвертера потребуется расчёт понижающих сопротивлений, ёмкостного фильтра (выходной выпрямитель) и индуктивности (силовой индуктор).

Установка выходного напряжения

Воспользуемся подбором, предоставленным производителем MT3608 для установки выходного напряжения. Внутренний выход VREF составляет 0,6 V (типичное). Выходное напряжение делится на резистор (делитель) R1 и R2 в выход FB. Выходное напряжение определяется выражением:

$$V_{out} = V_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right), \quad (23)$$

где U_{OUT} – расчётное выходное напряжение на MT3608,

U_{REF} – внутреннее базовое напряжение MT3608,

R_1 – активное сопротивление большего резистора в системе,

R_2 – активное сопротивление меньшего резистора в системе.

Тогда для определения отношения $\frac{R_1}{R_2}$:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{U_{out}}{U_{REF}} - 1 = \frac{24}{0.6} - 1; \quad (24)$$

Такое отношение можно получить, используя резистор E24001 (1 кОм) и E24039 (39 кОм).

Выбор силового индуктора

Воспользуемся подбором, предоставленным производителем MT3608 для силового индуктора.

Рекомендуемые значения индуктивности от 4,7 до 22 мкГн. Небольшой размер и лучшая эффективность − основные проблемы для портативных устройств, таких как MT3608, используемых для мобильных телефонов. Катушка индуктивности должна иметь низкие потери в сердечнике на частоте 1,2 МГц и низкий DCR для повышения эффективности. Чтобы избежать насыщения индуктора, следует учитывать номинальный ток.

Поэтому выбираем CDRH4D18 (номинальный ток от 0,14 до 1,72 А, индуктивность от 1 до 180 мкГн).

Выбор выходного выпрямителя

Воспользуемся подбором, предоставленным производителем MT3608 для выпрямителя.

Для MT3608 рекомендуются входные и выходные керамические конденсаторы емкостью 22 мкФ. Для лучшей фильтрации напряжения рекомендуются керамические конденсаторы с низким ESR. Типы X5R и X7R подходят из-за более широкого диапазона напряжений и температур.

В связи с этим выбираем GRM32ER61E226KE15L, керамический ЧИП-конденсатор 1210 X5R с ёмкостью 22 мкФ ± 10 % и рабочим напряжением 25 В.

Выбор диода

Диод Шоттки можно использовать для MT3608 из-за его низкого прямого падения напряжения и быстрого обратного восстановления. Использование диода Шоттки может повысить эффективность. Высокая скорость выпрямления также является хорошей характеристикой диода Шоттки для высокой частоты переключения. Номинальный ток диода должен соответствовать среднеквадратическому умножению пикового тока и среднего выходного тока следующим образом:

$$I_D\left(RMS\right) = \sqrt{I_{OUT} \cdot I_{PEAK}} = \sqrt{0.2 \cdot 4} = 0.89 \text{ А} \quad (25)$$

где $I_D(RMS)$ – номинальный ток диода Шоттки, I_{OUT} – выходной ток системы,

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

I_{PEAK} – пиковый ток, выдерживаемый MT3608

Также требуется помнить, что напряжение обратного пробоя диода должно быть больше, чем выходное напряжение. Выбираем 1N5818 со средним прямым током в 1 А и максимальным обратным напряжением в 30 В. Принципиальная схема спроектированного DC-DC преобразователя представлена на рисунке 9.

В процессе электрического расчёта системы нами было спроектировано 55 топливных ячеек (11 последовательно и 5 параллельно подключенных в ТЭ) без учёта применения типа стабилизации, а также разработана схема стабилизации напряжения на основе DC-DC преобразователя MT3608 (рис. 9).

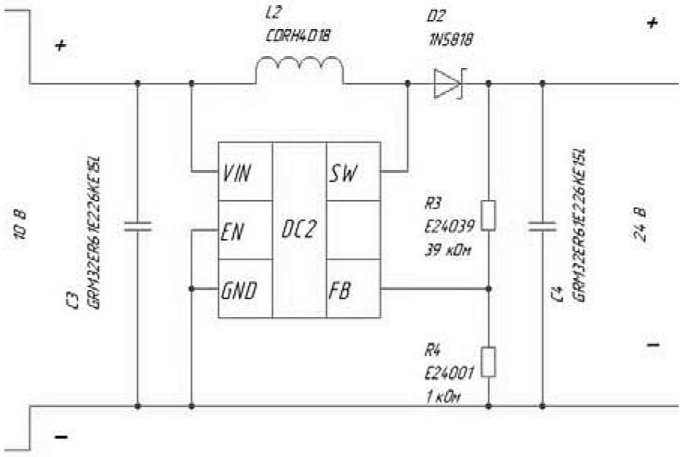


Рис. 9. Принципиальная схема сборки MT3608 для МТЭРТ
Fig. 9. Schematic diagram of MT3608 assembly for SRFC

Выводы

В работе впервые проведён анализ возможности применения малых топливных элементов для питания устройств автоматики, проанализированы их недостатки и преимущества, востребованность в современной электроэнергетике с учётом процессов, характерных для низковольтных цепей управления. Рассмотрены возможности применения экономичного источника тока, как источника тока для аварийного питания приборов АСУТП, который может позволить создать эффективную коммерческую основу для внедрения данного решения в зону промышленного производства в условиях возможных перебоев в электроснабжении (Крайний Север, Дальний Восток, условия удалённости центрального энергоснабжения), проведен анализ областей применения МТЭРТ. Определены технические характеристики элементов для питания устройств автоматики, проведен химический и электрический расчёт исследуемого топливного элемента.

Список литературы

[1]. Blaajberg F. PWM Z-source NPC inverter / P. C. Lox, F. Blaajberg, S. Y. Feng, R. N. Soon // Proc. APEC2006. – 2006. – P. 40-46.

[2]. Li R. An active modulation technique for single-phase grid connected CSI / R. Li, H. S. Chung, T. K. M. Chan //IEEE Transitions on Power Electronic. – 2007. – Vol. 22. – P. 1373-1380.

[3]. Volkov A. G. Analysis of New Multizone Rectifier for Electric Locomotives of VI85 Type / А. П. Косарев, А. Г. Волков, Г. С. Зиновьев // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2010). – Erlagol, Altai. – June 30-July 4, 2010. – P. 475-479.

[4]. Z. Bai, Z. Zhang, Y. Zhang A Generalized Three-Phase Multilevel Current Source Inverter with Carrier Phase-Shifted SPWM / Z. Bai, Z. Zhang, Y. Zhang // IEEE Trans. Ind. Electron. – P. 220-227.

[5]. Malyshenko S. P., Borzenko V. I., Dunikov D. O., Nazarova O. V. Metal hydride technologies of hydrogen energy storage for independent power supply systems constructed on the basis of renewable sources of energy // Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika). – 2012. – Т. 59. – № 6. – С. 468-478.

[6]. Gahleitner G. Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications // International Journal of Hydrogen Energy. – 2013. – Т. 38. – № 5. – С. 2039-2061.

[7]. Aneke M., Wang M. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review // Applied Energy. – 2016. – Т. 179. – С. 350-377.

[8]. Zhang X., Chan S. H., Ho H. K., Tan S. –

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

C., Li M., Li G., Li J., Feng Z. Towards a smart energy network: The roles of fuel/electrolysis cells and technological perspectives // International Journal of Hydrogen Energy. – 2015. – Т. 40. – № 21. – С. 6866-6919.

[9]. Emonts B., Schiebahn S., Görner K., Lindenberger D., Markewitz P., Merten F., Stolten D. Re-energizing energy supply: Electrolytically-produced hydrogen as a flexible energy storage medium and fuel for road transport // Journal of Power Sources. – 2017. – Т. 342. – С. 320-326.

[10]. Oliveira D. S. A Three-Phase High-Frequency Semicontrolled Rectifier for PM WECS / D. S. Oliveira, M. M. Reis, C. Silva, L. B. Colado, F. Antunes, B. L. Soares // IEEE Transactions on Power Electronics. – Vol. 25, no. 3. – P. 677-685.

[11]. Ершов М. И., Прокофьев В. Е., Янович К. В. Расчет основных параметров инвертора для электроустановок на твёрдооксидных топливных элементах // ВА МТО, Санкт-Петербург. – 2019. – № 3(4). – С. 110-116.

[12]. Андриянов А. И., Булохов Н. М., Михальченко Г. Я. Управление динамикой импульсных преобразователей постоянного напряжения. – Электричество, 2013. – № 8. – С. 41-49.

[13]. Фаддеев Н. А., Беличенко М. А., Серик А. В., Соколова В. А., Смирнова Н. В. Исследование влияния изменения профиля нагрузки на производительность стека на основе топливных элементов с протонообменной мембраной. // [https://elektromekhanika.npi-tu.ru/index.php/electromeh/article/view/2277] doi.org/10.17213/0136-3360-2022-4-25-30.

[14]. Wang Y., Diaz D. F. R., Chen K. S., Wang Z., & Adroher X. C. Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells–a review // Materials today. – 2020. – Т. 32. – С. 178-203.

[15]. Васюков И. В., Павленко А. В., Батищев Д. В. Обзор и анализ топологий преобразователей систем электропитания на водородных топливных элементах для беспилотных летательных аппаратов киловаттного класса мощности // Изв. вузов. Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – № 2. – С. 19.

[16]. Borup, R., Meyers, J., Pivovar, B., Kim, Y. S., Mukundan, R., Garland. Scientific aspects of polymer electrolyte fuel cell durability and degradation // Chemical reviews. – 2007. – Т. 107. – № 10. – С. 3904-3951.

[17]. Ferreira H. L., Garde R., Fulli G., Kling W., Lopes J. P. Characterisation of electrical energy storage technologies // Energy. – 2013. – Т. 53. – С. 288-298.

[18]. Aarhaug T. A., Svensson A. M. Degradation rates of PEM fuel cells running at open circuit voltage // ECS Transactions. – 2006. – Т. 3. – № 1. – С. 775.

[19]. Anastasiadis A. G., Konstantinopoulos S. A., Kondylis G. P., Vokas G. A., Papageorgas P. Effect of fuel cell units in economic and environmental dispatch of a Microgrid with penetration of photovoltaic and micro turbine units // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Т. 42. – № 5. – С. 3479-3486.

[20]. Abdelfatah Kolli, Arnaud Gaillard, Alexandre De Bernardinis, Olivier Bethoux, Daniel Hissel, Zoubir Khatir A review on DCDC converter architectures for power fuel cell applications // Energy Conversion and Management, November 2015. – Vol. 105. – P. 716-730. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.07.060

[21]. Dawei Gao, Zhenhua Jin, Jiexun Liu, Minggao Ouyang An interleaved step-up/step-down converter for fuel cell vehicle applications // International Journal of Hydrogen Energy, December 2016. – Vol. 41. – Issue 47, 21. P. 22422-22432. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.09.171

[22]. Колесников С. В., Леонов А. П. Надежность изоляции статорных обмоток частотно-управляемых электродвигателей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2022. – № 1. – Т. 18. – С. 33-62.

[23]. Дудкин А. Н., Леонов А. П., Супуева А. С. Влияние дефектов в межвитковой изоляции на ее стойкость к эксплуатационным нагрузкам, характерным для энергоэффективных способов управления электротехническим оборудованием. – Томск: Известия ТПУ, 2015. – Т. 326. – № 11. – С. 83-89.

[24]. Colak I. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes / I. Colak, E. Kabalci, R. Bayindir // Energy Conversion and Management. – 2011. – Vol. 52. – P. 1114-1128.

[25]. Panagis P. Comparison of State of the Art Multilevel Inverters / P. Panagis, F. Stergiopoulos, P. Marabeas // Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE Conference Publications. – P. 4296-4301.

[26]. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие / под ред. В. В. Денисова. – Ростов н/Д: Феникс, 2015. – 382с.

[27]. Безруких П. П., Стребков Д. С. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. – М.: РАСХН, 2005.

[28]. Габдерахманова Т. О., Директор Л. Б., Попель О. С., Тарасенко А. Б.; №. 23; Альтернативная энергетическая экология, 2015. С. 195. / Габдерахманова Т. С. Сравнительный анализ электрических накопителей энергии.

[29]. Booth D. A., B. l. Alievsky, S. R. Mizjurin, P. V. Vasiukevich; Ed. Booth D. A. M.: Jeneroatomizdat, 1991. S. 398. / Booth D. A. Nakopiteli jenergii.

[30]. Varypaev V. N. Himicheskie istochniki toka / V. N. Varypaev, Dasojan M. A., Nicholas A. M.: Vysshaja Shkola, 1990. – S. 240.

[31]. Червоненко А. П., Котин Д. А., Рожко А. В. Перевод нагрузки с основной сети на резервную с применением типового АВР // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 5. – С. 160-171.

[32]. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник / О. Г. Чебовский, Л. Г. Моисеев, Р. П. Недошивен. – 2-е изд. перераб. и доп. – М: Энер-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

гоатомиздат, 1985. – 400 с.

[33]. Боярская Н. П. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения: монография / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров. – Красноярск: СФУ, 2014. – 192 с.

[34]. Ивакин В. Н., Ковалев В. Д., Магницкий А. А. Нормирование энергоэффективности распределительных трансформаторов // Энергия единой сети. – 2017. – № 5 (34). – С. 20-31.

[35]. Белецкий А. Ф. Теория линейных электрических цепей. – СПб.: Изд-во «Лань», 2008. – 544 с.

[36]. The world's first commercial fuel cell powerpack for drone DP30 Powerpack – [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.doosanmobility.com/en/products /powerpack/

[37]. Tao Lei, Zhou Yang, Zicun Lin, Xiaobin Zhang State of art on energy management strategy for hybrid-powered unmanned aerial vehicle // Chinese Journal of Aeronautics, June 2019. – Vol. 32. – Issue 6. – P. 1488-1503. DOI: 10.1016/j.cja.2019.03.013.

[38]. Lepanov M., Rozanov Y. Multifunctional regulator based on SMES and power electronic converter for increase of power quality and power supply reliability // Power Engineering, Energy and Electrical Drives POWERENG), 2013 Fourth International Conference on. – IEEE, 2013. – P. 1387-1391.

[39]. Зирка С. Е., Мороз Ю. И., Мороз Е. Ю., Тарчуткин А. Л. Топологические модели трансформатора // Электричество, 2012. – № 10. – С. 33-42.

[40]. Виноградов А. Б, Коротков А. А. Алгоритмы управления высоковольтным многоуровневым преобразователем частоты: монография. – Иваново: Изд-во Ивановский государственный энергетический университет, 2018. – 184 с.

[41]. Akagi H. Active harmonic filters // Proceedings of the IEEE. – 2005. – T. 93. – Vol. 12. – P. 2128-2141.

[42]. Мартюшев Н. В., Малоземов Б. В., Сорокова С. Н., Ефременков Е. А., Валуев Д. В., Ци М. Обзор моделей и методов определения и прогнозирования надежности технических систем и транспорта. Математика, 2023, 11, 3317. doi: 10.3390/math11153317

[43]. Мартюшев Н. В., Малоземов Б. В., Филина, О. А., Сорокова С. Н., Ефременков Е. А., Валуев Д. В., Ци М. Стохастические модели и обработка вероятностных данных для решения задачи повышения надежности грузового электрического транспорта. Математика, 2023, 11, 4836. doi: 10.3390/math11234836

[44]. Кукарцев В. В., Гозбенко В. Е., Конюхов В. Ю., Михалев А. С., Кукарцев В. А., Тынченко Ю. А. Определение надежности автономной работы городского электротранспорта по диагностическим параметрам. Мировой Электр. Вех. Дж. 2023, 14, 334. doi: 10.3390/wevj14120334.

[45]. Бойчук И. П., Гринек А. В., Мартюшев Н. В., Клюев Р. В., Малоземов Б. В., Тынченко В. С., Кукарцев В. А., Тынченко Ю. А., Кондратьев С. И. Методический подход к моделированию корабельной электроэнергетической системы. Энергии 2023, 16, 8101. doi: 10.3390/en16248101

[46]. Филина О. А., Тынченко В. С., Кукарцев В. А., Башмур, К. А., Павлов П. П., Панфилова, Т. А. Повышение эффективности диагностики щеточно-коллекторного узла электродвигателя постоянного тока. Энергии 2024, 17, 17. doi: 10.3390/en17010017

[47]. Сорокова С. Н., Ефременков Е. А., Валуев Д. В., Ци М. Анализ прогнозной математической модели изменений погоды на основе нейронных сетей. Математика 2024, 12, 480. doi: 10.3390/math12030480

[48]. Кукарцев В. В., Конюхов В. Ю., Опарина, Т. А., Севрюгина Н. С., Гозбенко В. Е., Кондратьев, В. В. Определение эксплуатационных характеристик тяговой батареи электромобиля. Мировой Электр. Вех. Дж. 2024, 15, 64. doi: 10.3390/wevj15020064.

[49]. Сорокова С. Н., Ефременков Е. А., Валуев Д. В., Ци М. Математическое моделирование параметров тягового оборудования электрических грузовых автомобилей. Математика 2024, 12, 577. doi: 10.3390/math12040577

References

[1]. Blaajberg F. PWM Z-source NPC inverter / P. C. Lox, F. Blaajberg, S. Y. Feng, R. N. Soon // Proc. APEC2006. – 2006. – P. 40-46.

[2]. Li R. An active modulation technique for single-phase grid connected CSI / R. Li, H. S. Chung, T. K. M. Chan //IEEE Transitions on Power Electronic. – 2007. – Vol. 22. – P. 1373-1380.

[3]. Volkov A. G. Analysis of New Multizone Rectifier for Electric Locomotives of VI85 Type / A. P. Kosarev, A. G. Volkov, G. S. Zinoviev // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2010) . – Erlagol, Altai. – June 30-July 4, 2010. – P. 475-479.

[4]. Z. Bai, Z. Zhang, Y. Zhang A Generalized Three-Phase Multilevel Current Source Inverter with Carrier Phase-Shifted SPWM / Z. Bai, Z. Zhang, Y. Zhang // IEEE Trans. Ind. Electron. – P. 220-227.

[5]. Malyshenko S. P., Borzenko V. I., Dunikov D. O., Nazarova O. V. Metal hydride technologies of hydrogen energy storage for independent power supply systems constructed on the basis of renewable sources of energy // Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika). – 2012. – T. 59. – No. 6. – P. 468-478.

[6]. Gahleitner G. Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications // International Journal of Hydrogen Energy. – 2013. – T. 38. – No. 5. – P. 2039-2061.

[7]. Aneke M., Wang M. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

review // Ap-plied Energy. – 2016. – T. 179. – P. 350-377.

[8]. Zhang X., Chan S. H., Ho H. K., Tan S. -C., Li M., Li G., Li J., Feng Z.Towards a smart energy network: The roles of fuel/electrolysis cells and technological perspectives // International Journal of Hydrogen Energy. – 2015. – T. 40. – No. 21. – P. 6866-6919.

[9]. Emonts B., Schiebahn S., Görner K., Lindenberger D., Markewitz P., Merten F., Stolten D. Re-energizing energy supply: Electrolytically-produced hydrogen as a flexible energy storage medium and fuel for road transport // Journal of Power Sources. – 2017. – T. 342. – P. 320-326.

[10]. Oliveira D. S. A Three-Phase High-Frequency Semicontrolled Rectifier for PM WECS / D. S. Oliveira, M. M. Reis, C. Silva, L. B. Colado, F. Antunes, B. L. Soares // IEEE Transactions on Power Electronics. – Vol. 25, no. 3. – P. 677-685.

[11]. Ershov M.I., Prokofiev V.E., Yanovich K.V. Calculation of the main parameters of an inverter for electrical installations using solid oxide fuel cells // VA MTO, St. Petersburg. – 2019. – No. 3(4). – pp. 110-116.

[12]. Andriyanov A. I., Bulokhov N. M., Mikhalchenko G. Ya. Control of the dynamics of pulsed DC voltage converters. – Electricity, 2013. – No. 8. – P. 41-49.

[13]. 13. Faddeev N. A., Belichenko M. A., Serik A. V., Sokolova V. A., Smirnova N. V. Study of the influence of changing the load profile on the performance of a stack based on fuel cells with a proton exchange membrane. //[https://elektromekhanika.npi-tu.ru/index.php/electromeh/article/view/2277] doi.org/10.17213/0136-3360-2022-4-25-30.

[14]. Wang Y., Diaz D. F. R., Chen K. S., Wang Z., & Adroher X. C. Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells-a review // Materials today. – 2020. – T. 32. – P. 178-203.

[15]. Vasyukov I.V., Pavlenko A.V., Batishchev D.V. Review and analysis of topologies of converters of power supply systems based on hydrogen fuel cells for unmanned aerial vehicles of the kilowatt power class. Izv. universities Electromechanics. – 2022. – T. 65. – No. 2. – P. 19.

[16]. Borup, R., Meyers, J., Pivovar, B., Kim, Y. S., Mukundan, R., Garland. Scientific aspects of polymer elec-trolyte fuel cell durability and degradation // Chemical reviews. – 2007. – T. 107. – No. 10. – P. 3904-3951.

[17]. Ferreira H. L., Garde R., Fulli G., Kling W., Lopes J. P. Characterization of electrical energy storage technologies // Energy. – 2013. – T. 53. – P. 288-298.

[18]. Aarhaug T. A., Svensson A. M.Degradation rates of PEM fuel cells running at open circuit voltage // ECS Transactions. – 2006. – T. 3. – No. 1. – P. 775.

[19]. Anastasiadis A. G., Konstantinopoulos S. A., Kondylis G. P., Vokas G. A., Papageorgas P. Effect of fuel cell units in economic and environmental dispatch of a Microgrid with penetration of photovoltaic and micro turbine units // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – T. 42. – No. 5. – P. 3479-3486.

[20]. Abdelfatah Kolli, Arnaud Gaillard, Alexandre De Bernardinis, Olivier Betoux, Daniel Hissel, Zoubir Khatir A review on DCDC converter architectures for power fuel cell applications // Energy Conversion and Man-agement, November 2015. – Vol. 105. – R. 716-730. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.07.060

[21]. Dawei Gao, Zhenhua Jin, Jiexun Liu, Minggao Ouyang An interleaved step-up/step-down converter for fuel cell vehicle applications // International Journal of Hydrogen Energy, December 2016. – Vol. 41. – Issue 47, 21. P. 22422-22432. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.09.171

[22]. Kolesnikov S.V., Leonov A.P. Reliability of insulation of stator windings of frequency-controlled electric motors // Electrical engineering and information complexes and systems. – 2022. – No. 1. – T. 18. – P. 33-62.

[23]. Dudkin A. N., Leonov A. P., Supueva A. S. The influence of defects in interturn insulation on its resistance to operational loads characteristic of energy-efficient methods of controlling electrical equipment. – Tomsk: Izvestia TPU, 2015. – T. 326. – No. 11. – P. 83-89.

[24]. Colak I. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes / I. Colak, E. Kabalci, R.Bayindir // Energy Conversion and Management. – 2011. – Vol. 52. – P. 1114-1128.

[25]. Panagis P. Comparison of State of the Art Multilevel Inverters / P. Panagis, F. Stergiopoulos, P. Marabeas // Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE Conference Publications. – P. 4296-4301.

[26]. Non-traditional and renewable energy sources: textbook / ed. V. V. Denisova. – Rostov n/d: Phoenix, 2015. – 382 p.

[27]. Bezrukikh P. P., Strebkov D. S. Renewable energy: strategy, resources, technologies. – M.: RASHN, 2005.

[28]. Gabderakhmanova T. O., Director L. B., Popel O. S., Tarasenko A. B.; No. 23; Alternative energy ecology, 2015. P. 195. / Gabderakhmanova T. S. Comparative analysis of electrical energy storage devices.

[29]. Booth D. A., B. l. Alievsky, S. R. Mizjurin, P. V. Vasiukevich; Ed. Booth D. A. M.: Jeneroatomizdat, 1991. S. 398. / Booth D. A. Nakopiteli jenergii.

[30]. Varypaev V. N. Himicheskie istochniki toka / V. N. Varypaev, Dasojan M. A., Nicholas A. M.: Vysshaja Shkola, 1990. – S. 240.

[31]. Chervonenko A.P., Kotin D.A., Rozhko A.V. Transfer of load from the main network to the backup one using a standard automatic transfer switch // News of higher educational institutions. Energy problems. – 2021. – T. 23. – No. 5. – P. 160-171.

[32]. Power semiconductor devices: Handbook / O. G. Chebovsky, L. G. Moiseev, R. P. Nedoshiven. – 2nd ed. reworked and additional – M: Energoatomizdat, 1985. – 400 p.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

[33]. Boyarskaya N.P. Synthesis of filter compensating devices for power supply systems: monograph / N.P. Boyarskaya, V.P. Dovgun, D.E. Egorov. – Krasnoyarsk: SFU, 2014. – 192 p.

[34]. Ivakin V.N., Kovalev V.D., Magnitsky A.A. Standardization of energy efficiency of distribution transformers // Unified Network Energy. – 2017. – No. 5 (34). – P. 20-31.

[35]. Beletsky A.F. Theory of linear electrical circuits. – St. Petersburg: Lan Publishing House, 2008. – 544 p.

[36]. The world's first commercial fuel cell powerpack for drone DP30 Powerpack – [Electronic resource]. Access mode: https://www.doosanmobility.com/en/products /powerpack/

[37]. Tao Lei, Zhou Yang, Zicun Lin, Xiaobin Zhang State of art on energy management strategy for hybrid-powered unmanned aerial vehicle // Chinese Journal of Aeronautics, June 2019. – Vol. 32. – Issue 6. – P. 1488-1503. DOI: 10.1016/j.cja.2019.03.013.

[38]. Lepanov M., Rozanov Y. Multifunctional regulator based on SMES and power electronic converter for in-crease of power quality and power supply reliability // Power Engineering, Energy and Electrical Drives POWERENG), 2013 Fourth International Conference on. – IEEE, 2013. – P. 1387-1391.

[39]. Zirka S. E., Moroz Yu. I., Moroz E. Yu., Tarchutkin A. L. Topological models of a transformer // Electricity, 2012. – No. 10. – P. 33-42.

[40]. Vinogradov A. B, Korotkov A. A. Control algorithms for high-voltage multilevel frequency converter: monograph.– Ivanovo: Publishing house Ivanovo State Energy University, 2018. – 184 p.

[41]. Akagi H. Active harmonic filters // Proceedings of the IEEE. – 2005. – T. 93. – Vol. 12. – P. 2128-2141.

[42]. Martyushev N.V., Malozemov B.V., Sorokova S.N., Efremenkov E.A., Valuev D.V., Tsi M. Review of models and methods for determining and predicting the reliability of technical systems and transport. Mathematics, 2023, 11, 3317. doi: 10.3390/math11153317

[43]. Martyushev N. V., Malozemov B. V., Filina O. A., Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Valuev D. V., Tsi M. Stochastic models and processing of probabilistic data for solving tasks of increasing the reliability of electric freight transport. Mathematics, 2023, 11, 4836. doi: 10.3390/math11234836

[44]. Kukartsev V.V., Gozbenko V.E., Konyukhov V.Yu., Mikhalev A.S., Kukartsev V.A., Tynchenko Yu.A. Determination of the reliability of autonomous operation of urban electric transport using diagnostic parameters. World Electr. Weh. J. 2023, 14, 334. doi: 10.3390/wevj14120334.

[45]. Boychuk I. P., Grinek A. V., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Malozemov B. V., Tynchenko V. S., Kukartsev V. A., Tynchenko Yu. A. ., Kondratyev S.I. Methodological approach to modeling the ship's electrical power system. Energies 2023, 16, 8101. doi: 10.3390/en16248101

[46]. Filina O. A., Tynchenko V. S., Kukartsev V. A., Bashmur, K. A., Pavlov P. P., Panfilova, T. A. Increasing the efficiency of diagnostics of the brush-commutator unit of a DC electric motor current. Energies 2024, 17, 17. doi: 10.3390/en17010017

[47]. Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Valuev D. V., Tsi M.Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks. Mathematics 2024, 12, 480. doi: 10.3390/math12030480

[48]. Kukartsev V.V., Konyukhov V.Yu., Oparina, T.A., Sevryugina N.S., Gozbenko V.E., Kondratyev, V.V. Determination of the operational characteristics of an electric vehicle traction battery. World Electr. Weh. J. 2024, 15, 64. doi: 10.3390/wevj15020064.

[49]. Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Valuev D. V., Tsi M. Mathematical modeling of the parameters of traction equipment of electric trucks. Mathematics 2024, 12, 577. doi: 10.3390/math12040577

Транслитерация по BSI

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Статья поступила в редакцию 02.02.24. Ред. Рег. № 301-002-24 The article has entered in publishing office 02.02.24. Ed. Reg. No. 301-002-24

УДК 62-838

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИМУЛЯЦИЯ ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С ТОПЛИВНЫМИ ЯЧЕЙКАМИ

Щуров Н. И., Дедов С. И., Штанг А. А.

Новосибирский Государственный Технический Университет
630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20
Тел. +7-996-376-67-45, dedov@corp.nstu.ru, dedov_s.i@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.166-181

Заключение совета рецензентов: 19.02.24 Заключение совета экспертов: 26.02.24 Принято к публикации: 29.02.24

Статья посвящена разработке имитационной модели в программной среде MATLAB Simulink гибридного тягового электропривода электромобиля на базе топливных ячеек и литиевого аккумулятора. Рассмотрены применяемые топологии аккумуляторного и гибридного тягового привода. Синтезирована модель тягового привода, в котором основным источником энергии выступает топливная ячейка (ТЯ) с протонообменной мембраной (ПОМ), а неравномерность транспортной нагрузки сглаживает буферный накопитель (БН) высокой мощности на базе литий-титанатного (LTO) аккумулятора.

Получена зависимость необходимой емкости БНЭ от мощности первичного источника, приведенная к тонне веса транспортного средства. На ее основе определен оптимальный диапазон параметров гибридной энергоустановки (мощность ТЯ от 5 до 11 кВт/т, емкость LTO аккумулятора от 6 до 10 А·ч/т) при движении согласно нагрузочному циклу WLTC. Расчетный расход топлива при этом составил 0,56 кг/(100км·т), а время включенного состояния ТЭ – 94,53 %.

Ключевые слова: гибридная энергоустановка, электромобиль, аккумулятор, топливная ячейка с протонообменной мембраной, имитационное моделирование, MATLAB Simulink.

Щуров Н. И., Дедов С. И., Штанг А. А. Моделирование и симуляция гибридного электромобиля с топливными ячейками // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 02 (419) 2024, с. 166-181

Shchurov N. I., Dedov S. I., Shtang A. A. Modelling and simulation hybrid electric vehicle with fuel cells // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 02(419) 2024, pp. 166-181

MODELLING AND SIMULATION HYBRID ELECTRIC VEHICLE WITH FUEL CELLS

Shchurov N. I., Dedov S. I., Shtang A. A.

Novosibirsk State Technical University
630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20
Tel. +7-996-376-67-45, dedov@corp.nstu.ru , dedov_s.i@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.166-181

Referred: 19.02.24 Received in revised form: 26.02.24 Accepted: 29.02.24

The article is devoted to the development of simulation model in the MATLAB Simulink software environment of an electric vehicle hybrid traction drive based on fuel cells and lithium battery. The applied topologies of battery and hybrid traction drives are considered. A traction drive model has been synthesized, in which the main energy source is a fuel cell (FC) with a proton exchange membrane (PEM), and the unevenness of the transport load is smoothed out by a high-power buffer storage unit (BSU) based on a lithium titanate (LTO) battery.

The dependence of the required BSU capacity on the power of the primary source, reduced to a ton of vehicle weight, was obtained. Based on this, the optimal range of *hybrid power plant* parameters was determined (FC power from 5 to 11 kW/t, LTO battery capacity from 6 to 10 Ah/t) when driving according to the WLTC load cycle. The estimated fuel consumption in this case was 0,56 kg/(100km·t), and the on-time of the fuel cell was 94,53 %.

Keywords: hybrid power plant, electric vehicle, battery, proton exchange membrane fuel cell, simulation modeling, MATLAB Simulink.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Щуров
Николай Иванович
Shchurov
Nikolai Ivanovich

Сведения об авторе: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехнические комплексы» Новосибирского государственного технического университета.

Образование: Новосибирский государственный технический университет (НЭТИ-НГТУ) (1970 г.)

Область научных интересов: повышение энергоэффективности электротехнических комплексов и систем.

Публикации: более 300 научных трудов, в том числе 11 монографий, 5 изобретений.

Information about the author: Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department «Electrical technical complexes» of Novosibirsk State Technical University.

Education: Novosibirsk State Technical University (NETI-NSTU) (1970)

Research area: increasing the energy efficiency of electrical complexes and systems.

Publications: more than 300 scientific works, including 11 monographs, 5 inventions.

Дедов
Сергей Игоревич
Dedov
Sergei Igorevich

Сведения об авторе: кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехнические комплексы» Новосибирского государственного технического университета.

Образование: Новосибирский государственный технический университет (НГТУ) (2018 г.).

Область научных интересов: повышение энергоэффективности систем накопления энергии на электротранспорте.

Публикации: 25 научных трудов, в том числе 2 монографии, 1 изобретение.

Information about the author: Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department. «Electrical technical complexes» of Novosibirsk State Technical University.

Education: Novosibirsk State Technical University (NSTU) (2018).

Research area: increasing the energy efficiency of energy storage systems in electric vehicles.

Publications: 25 scientific papers, including 2 monographs, 1 invention.

Штанг
Александр
Александрович
Shtang
Alexander Alexandrovich

Сведения об авторе: кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехнические комплексы» Новосибирского государственного технического университета.

Образование: Новосибирский государственный технический университет (2001 г.).

Область научных интересов: устройства накопления энергии, электромобили и возобновляемые источники энергии.

Публикации: более 100 научных трудов, в том числе 8 монографий, 3 изобретения.

Information about the author: candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department «Electrical technical complexes» of Novosibirsk State Technical University.

Education: Novosibirsk State Technical University (2001).

Research area: energy storage devices, electric vehicles and renewable energy sources.

Publications: more than 100 scientific works, including 8 monographs, 3 inventions.

Введение

На современном этапе технологического развития транспортной отрасли особое внимание уделяется переходу от классических автомобилей, использующих углеводородное топливо, к гибридным (ГТС) и полностью электрическим (ЭТС) видам транспортных средств [1-4]. В первую очередь данная направленность связана со стремлением существенно снизить потребление нефти и сократить выбросы CO_2 в транспортном секторе [5-8].

Благодаря нулевым выбросам углекислых газов, высокой топливной эффективности автомобили с тяговой энергоустановкой на базе ТЯ рассматриваются как замена классических бензиновых автомобилей [9-12]. Согласно прогнозу аналитического агентства Nova One Advisor [13], строгие экологические законы, наличие стимулов и субсидий на экологически чистые виды топлива, а также выбросы парниковых газов будут стимулировать рост рынка транспортных средств с ТЯ, как показано на рисунке 1.

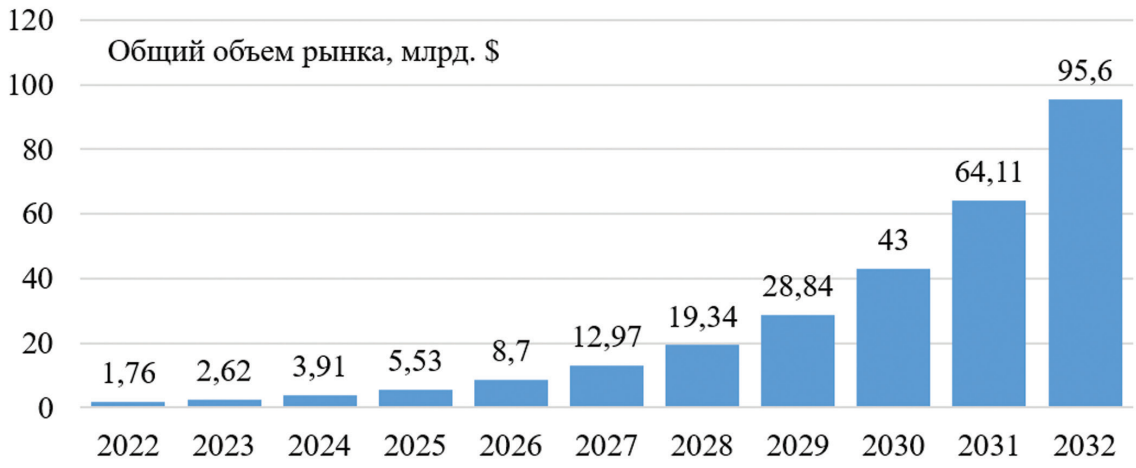


Рис. 1. Рынок транспортных средств с ТЯ, с 2022 по 2032 гг.

Fig. 1. Fuel cell vehicle market size, 2022 to 2032

В тяговом приводе ГТС и ЭТС помимо ТЯ используются аккумуляторные батареи (АБ) и/или конденсаторы двойного электрического слоя (КДЭС) в качестве дополнительного источника питания с целью обеспечения необходимой мощностью [14-17]. Возможные топологии (рисунок 2) подробно описаны в работах [18-21]. При этом наиболее предпочтительным режимом для ТЯ является непрерывная работа с номинальной мощностью [22, 23].

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

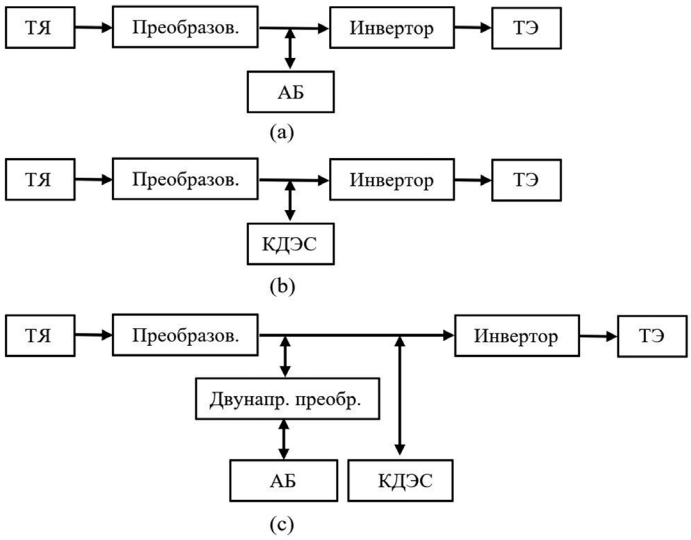


Рис. 2. Наиболее распространенные топологии применения ТЯ в тяговом приводе [24]:
а) ТЯ – АБ; *б)* ТЯ – КДЭС, *в)* ТЯ – АБ – КДЭС

Fig. 2. The most common topologies for using FCs in traction drives [24]:
a) FC – battery; *b)* FC –ultracapacitor; *c)* Fuel cell – battery – ultracapacitor

В работе [25] дана комплексная оценка текущего состояния и прогнозов электромобилей, оснащенных ТЯ, с классификацией по возможным конфигурациям, компонентам, системам энергоменеджмента (СЭ), а также освещены технологические проблемы в производстве и продвижении на рынке. В статьях [26, 27] рассмотрены применяемые типы ТЯ, вопросы проектирования и разработки, а также методы повышения производительности. В работах [28, 29, 30] проведено аналитическое сравнение СЭ при воздействии динамической нагрузки, таких как: детерминированная, на основе правил с нечеткой логикой, с линейной и нелинейной оптимизацией и др.

Несмотря на значительные научно-технические достижения в данном направлении, не существует единой методики расчета параметров источников энергии ГТС [31, 32, 33]. Поэтому целью данной работы является определение оптимальных удельных параметров ГТС, таких как мощность ТЯ и емкость АБ, посредством имитационного моделирования.

Список обозначений

Буквы латинского алфавита	
a	Ускорение транспортного средства
F	Сила
f	Постоянная Фарадея
G	Массовый расход водородного топлива
I	Величина тока
k	Доля содержания водорода
N	Количество
P	Мощность
Q	Емкость
R	Универсальная газовая постоянная
t	Температура в Цельсиях
T	Температура в Кельвинах
u	Коэффициент использования водородного топлива
U	Напряжение
V	Скорость движения транспортного средства
w	Удельное основное сопротивление движению
Буквы греческого алфавита	
η	КПД элемента тягового привода
γ	Коэффициент инерции вращающихся масс
Нижние индексы	
тяг	Тяга
торм	Торможение
б	Батарея
выб	Выбег
п	Полная
ТЭД	Тяговый электродвигатель
ПР	Преобразователь
МП	Механическая передача
мин	Минимальная

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ном	Номинальная
макс	Максимальная
р	Рабочая
яч	Ячейка
Аббревиатуры	
ТЯ	Топливная ячейка
ПОМ	Протонообменная мембрана
АБ	Аккумуляторная батарея

LTO	Литий-титанатный аккумулятор
СЭ	Система энергоменеджмента
БН	Буферный накопитель
ЭТС	Электротранспортное средство
ГТС	Гибридное транспортное средство
SOC	Уровень заряда
FSM	Конечный автомат состояний
КПД	Коэффициент полезного действия

1. Синтез имитационной модели

Для исследования выбрана схема тягового привода (рис. 3), включающая в себя ТЯ, выступающую в роли первичного источника энергии, а также буферную аккумуляторную батарею, принимающую энергию рекуперации и сглаживающую неравномерность тяговой нагрузки.

ТЯ должна поставлять мощность, необходимую для поддержания равномерного режима движения на максимальной скорости, а также обеспечивать работу цепей собственных нужд и покрывать всю транспортную работу. БН сглаживает энергию в моменты пиковых нагрузок, и поэтому большая мощность первичного источника не требуется.

Имитационное моделирование гибридной энергоустановки на основе ТЯ выполнено в программной среде MATLAB Simulink (рис. 4), что позволяет проводить точный расчет характеристик бортовых источников энергии при воздействии динамической нагрузки. Расчет модели приведен к тонне веса ТС, что позволяет проводить гибкую настройку элементов, а также получать результаты в удельном виде с возможностью их применения к системам с отличающимися массогабаритными показателями. Модель включает в себя:

- Подсистему «Р1», задающую транспортную нагрузку на тяговый привод электромобиля на основе диаграмм скорости и ускорения WLTC, а также текущего состояния аккумулятора;
- Подсистему «Р2», рассчитывающую реализуемую мощность ТЭД с учетом КПД установки и сопротивления движению;
- Подсистему «Р3», определяющую режим совместной работы источников на основе уровня заряда (SOC) БН;
- Подсистему «Р4», регулирующую подачу топлива, а также формирующую токовую нагрузку на ТЯ и БН;
- Подсистему «Р5», рассчитывающую удельный расход топлива, приведенный к 100 км пройденного пути.

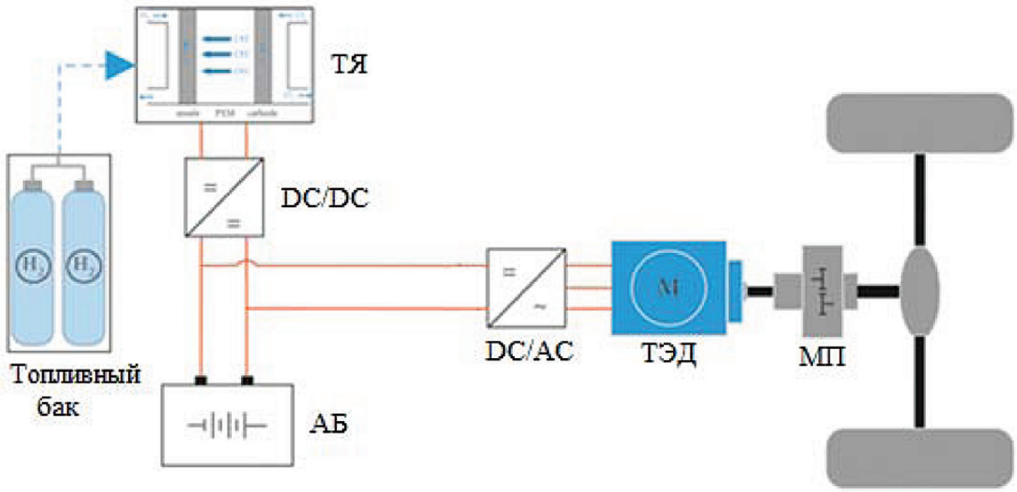


Рис. 3. Структурная схема тягового привода ГТС
Fig. 3. HEV power plant block diagram

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

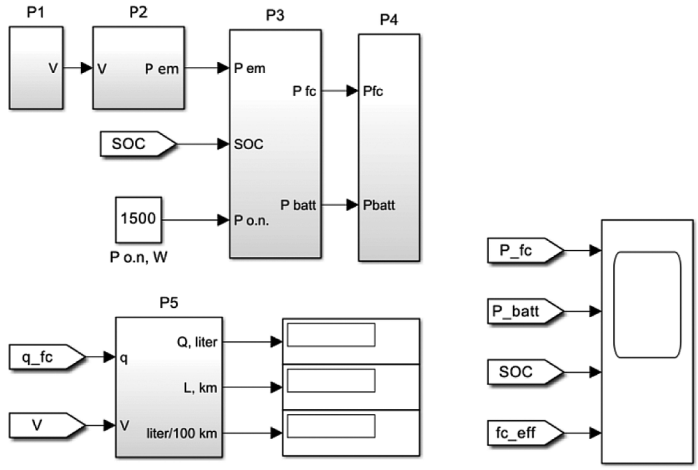


Рис. 4. Общий вид модели
Fig. 4. General view of the model

В качестве нагрузочного профиля использован Worldwide harmonized light vehicles test cycle (WLTC), заданный в модели повторяющимся сигналом скорости «V» (рис. 34). Цикл разделен на 4 фазы, отличающиеся динамическими показателями, тем самым имитирующие нахождение автомобиля в разном транспортном потоке: «Low» и «Medium» в городской среде движения, «High» и «Extra high» – вне города.

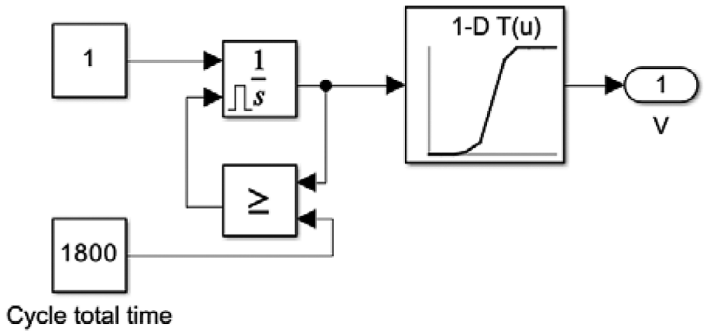


Рис. 5. Подсистема P1
Fig. 5. Subsystem P1

В подсистеме «P2», представленной на рисунке 6, выполняется расчет мощности тяги и торможения на основе цикла WLTC, заданного скоростью и ускорением. В «P2» рассчитывается основное сопротивление движению *w(V)*, а также сила, необходимая для реализации заданного ускорения. На вход системы подаются значения скорости с шагом дискретизации в 1 секунду. Возможности MATLAB Simulink позволяют выполнять интерполяцию полученных характеристик. Ускорение замедления автомобиля при выбеге по формуле (1):

$$a_{выб} = \frac{9{,}81 \cdot w}{1000} \; [м/c^2]; \qquad (1)$$

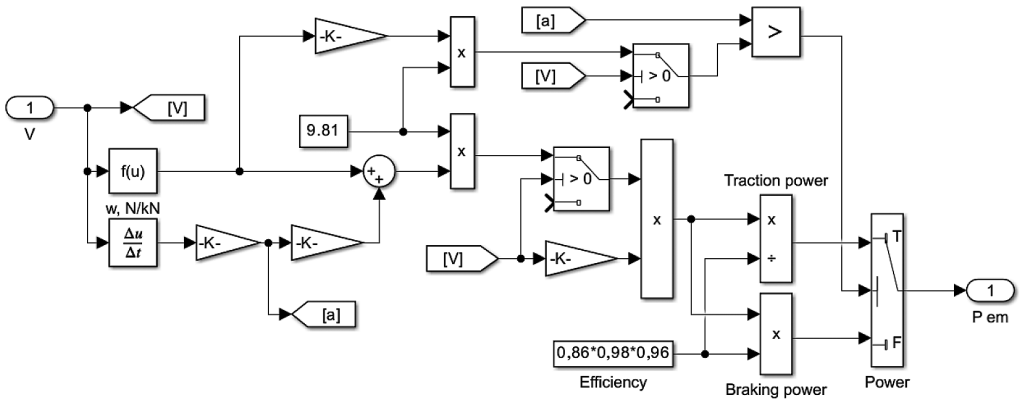


Рис. 6. Подсистема P2
Fig. 6. Subsystem P2

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Удельное основное сопротивление движению рассчитывается по формуле (2):

$$w = 12 + 0{,}0018 \cdot V^2 \text{ Н/кН}; \quad (2)$$

Реализуемые тяговым электродвигателем удельные силы тяги и торможения определяются на основе соотношениям:

$$F_{тяг,торм} = 9{,}8 \cdot \left(102 \cdot \left(1+\gamma\right) \cdot a \pm w\right) \text{ Н/т}; \quad (3)$$

где $(1+\gamma)$ – коэффициент инерции.

Удельная мощность двигателя в режимах тяги (4) и торможения (5) рассчитываются по соотношениям [35]:

$$P_{тяг} = \frac{F_{тяг} \cdot V}{3{,}6 \cdot \eta_{ТЭД} \cdot \eta_{ПР} \cdot \eta_{МП}} \text{ Вт/т}; \quad (4)$$

$$P_{торм} = \frac{F_{торм} \cdot V \cdot \eta_{ТЭД} \cdot \eta_{ПР} \cdot \eta_{МП}}{3{,}6} \text{ Вт/т}; \quad (5)$$

где $\eta_{ТЭД}$ – КПД тягового электродвигателя, $\eta_{ПР}$ – КПД импульсного преобразователя, $\eta_{МП}$ – КПД механической передачи.

В гибридных энергосистемах СЭ определяет распределение мощности между бортовыми источниками питания [36, 37, 38]. Эти стратегии могут быть реализованы по-разному, как с позиции эвристики, так и с позиции подхода к оптимизации [39, 40]. Входы СЭ описывают текущее состояние системы; входными параметрами являются запрашиваемая мощность, доступная мощность ТЯ и SOC БН. Выходной сигнал формирует мощность ТЯ $P_{ТЯ}$. Мощность БН при этом определяется из соотношения:

$$P_б(t) = P_п(t) - P_{ТЯ}(t); \quad (6)$$

где $P_п$ – полная потребляемая мощность, складываемая из мощности ТЭД и собственных нужд, $P_{ТЯ}$ – мощность ТЯ.

В данном исследовании выбрана детерминированная СЭ (рис. 7), представляющая собой конечный автомат состояний (FSM), направленная на работу системы с максимальным КПД, а также на power reliability (поддерживание SOC в диапазоне, сохраняющем ресурс БН). Уставка мощности ТЯ определяется на основе SOC, как показано в соотношении:

$$P_{ТЯ}(t) = \begin{cases} P_{мин} \ при \ SOC \geq 80\% \\ P_{ном} \ при \ 80\% > SOC \geq 20\% \\ P_{макс} \ при \ SOC < 20\% \end{cases} \quad (7)$$

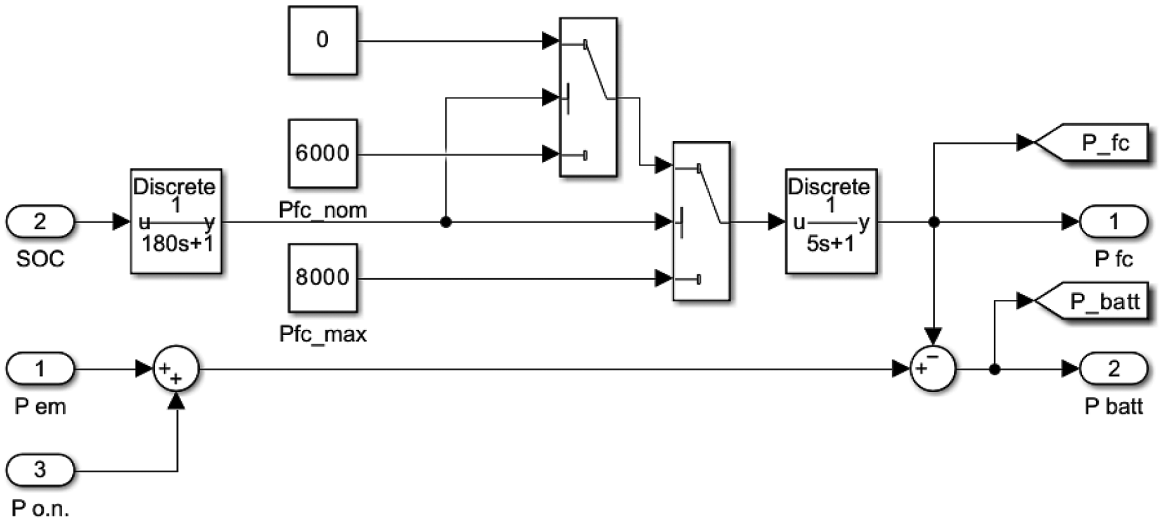


Рис. 7. Подсистема Р3

Fig. 7. Subsystem P3

Во избежание частых переключений состояний ТЯ использован блок LPF с постоянной времени τ_1 = 180 sec. Для имитации времени отклика ТЯ при изменении мощности также использован блок LPF с постоянной времени $\tau_г$ = 5 sec [24].

В подсистеме «Р4» с помощью двух управляемых источников тока задается нагрузка на ТЯ и БН (рис. 8).

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

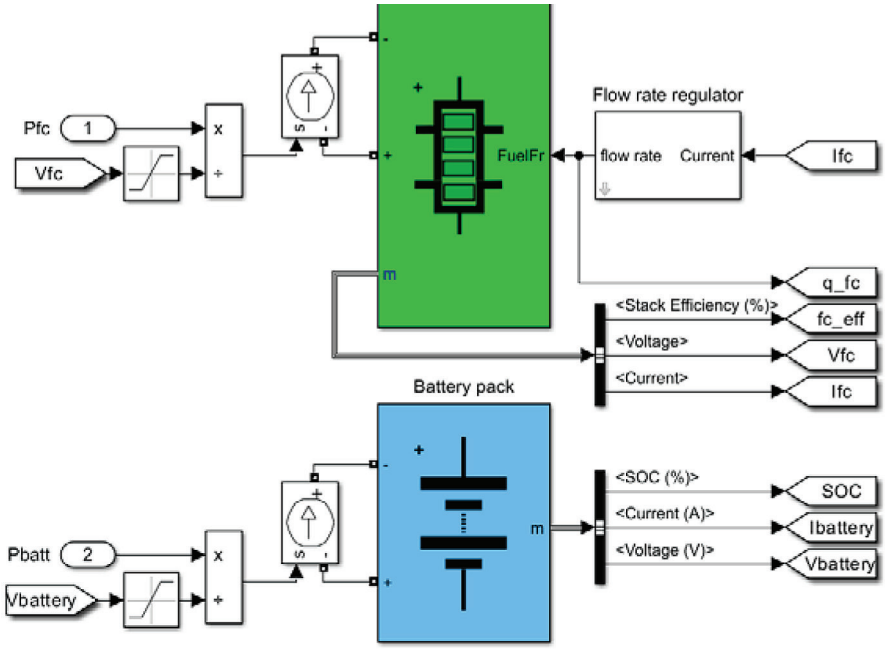


Рис. 8. Подсистема P4
Fig. 8. Subsystem P4

Скорость потока топлива для ТЯ определяется исходя из соотношения:

$$q = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot R \cdot t \cdot N_{ТЯ} \cdot I}{2 \cdot f \cdot P_{ТЯ} \cdot \frac{u}{100\%} \cdot \frac{k}{100\%}}, \text{ л/мин} \qquad (8)$$

где R – универсальная газовая постоянная; t – рабочая температура, 65 °C; $N_{ТЯ}$ – количество последовательно соединенных ячеек; I – величина тока, А; f – постоянная Фарадея; u – коэффициент использования водородного топлива, 99,56 %; k – доля содержания водорода, 99,95 %.

В подсистеме P5 выполняется расчет общего и удельного расхода топлива, приведенного к 100 км пройденного пути. Соотношение для расчета удельного массового расхода топлива:

$$G = \frac{\rho_0 \cdot P_p \cdot T_0 \cdot \int q dt}{60 \cdot 10^3 \cdot P_0 \cdot T_p \cdot \int V dt}, \text{ кг/км} \qquad (9)$$

где ρ_0 – плотность водорода при Н.У., 0,0899 кг/м^3; T_p и P_p – рабочие температура и давление, T_0 и P_0 – температура и давление при Н.У.

2. Расчет параметров ТЯ и БН

В качестве модели ТЯ использован пресет с номинальной мощностью 6 кВт [41]. Характеристики представлены на рисунке 9 и таблице 1. Выбор обусловлен средней мощностью, потребляемой при движении в цикле WLTC, анализ цикла представлен в работах [42, 43].

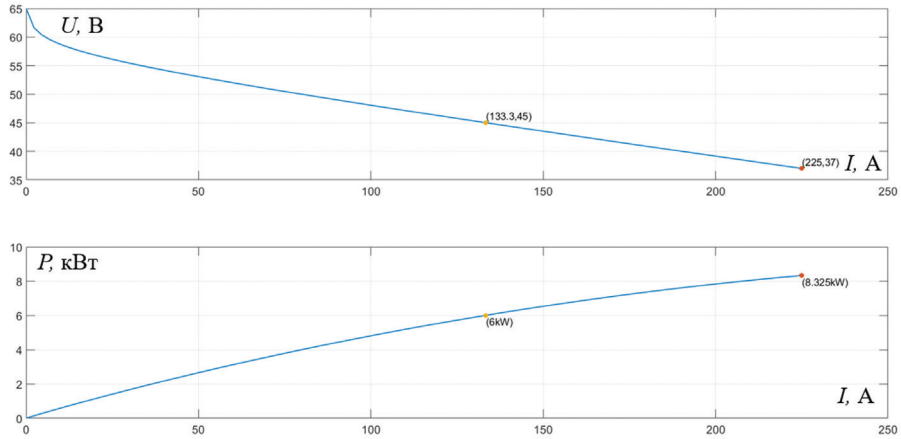


Рис. 9. Характеристики ТЯ
a) Вольтамперная; *b)* Зависимость мощности от величины тока

Fig. 9. Characteristics of the fuel cell
a) Current-voltage; b) Dependence of power on current value

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Таблица 1

Параметры ТЯ

Table 1

FC parameters

Параметр	Размерность	Величина
Тип ТЯ	-	ТЯ с ПОМ
Номинальная мощность	кВт	6
Number of cells	-	65
Nominal stack efficiency	%	55
Operation temperature	°C	65
Nominal air flow rate	л/мин	300
Nominal fuel supply pressure	бар	1,5

В качестве БН выбрана LTO аккумуляторная батарея с характеристиками, представленными в таблице 2 [44]. Выбор данного типа аккумулятора обусловлен высоким показателем удельной мощности [45], и, как следствие, высоким значением удельного тока, приведенного к емкости:

$$I_{отн} = I_{LTO_яч} / Q_{яч}, \text{ C} \quad (10)$$

Таблица 2

Параметры LTO ячейки

Table 2

LTO cell parameters

Параметр		Размерность	Величина
Номинальное напряжение		В	2,4
Ток разряда	Ном.	C	10
	Макс.		75C (SOC > 50 %, 10 с, 25 °C
Ток заряда	Ном.	C	10
	Макс.		62,5C (SOC > 50 %, 10 с, 25 °C
Удельная энергоемкость		Вт·ч/кг	47
Габаритные размеры		мм	116x22x106
Масса		кг	0,51

Для формирования выходного напряжения БН $U_{БН}$=365 необходимо соединить последовательно:

$$N_n^{'} = \frac{U_{БН}}{U_{LTO_яч}} = \frac{365}{2,3} = 152 \text{ шт.} \quad (11)$$

где $U_{LTO_яч}$ – номинальное напряжение LTO ячейки.

3. Совместная работа на динамическую нагрузку

На рисунке 10 представлены диаграммы изменения состояний ТЯ и БН при прохождении цикла WLTC. По достижении аккумулятором верхней уставки SOC происходит плавное отключение ТЯ с временной задержкой τг, аналогично осуществляется включение ТЯ по достижении нижней уставки SOC.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

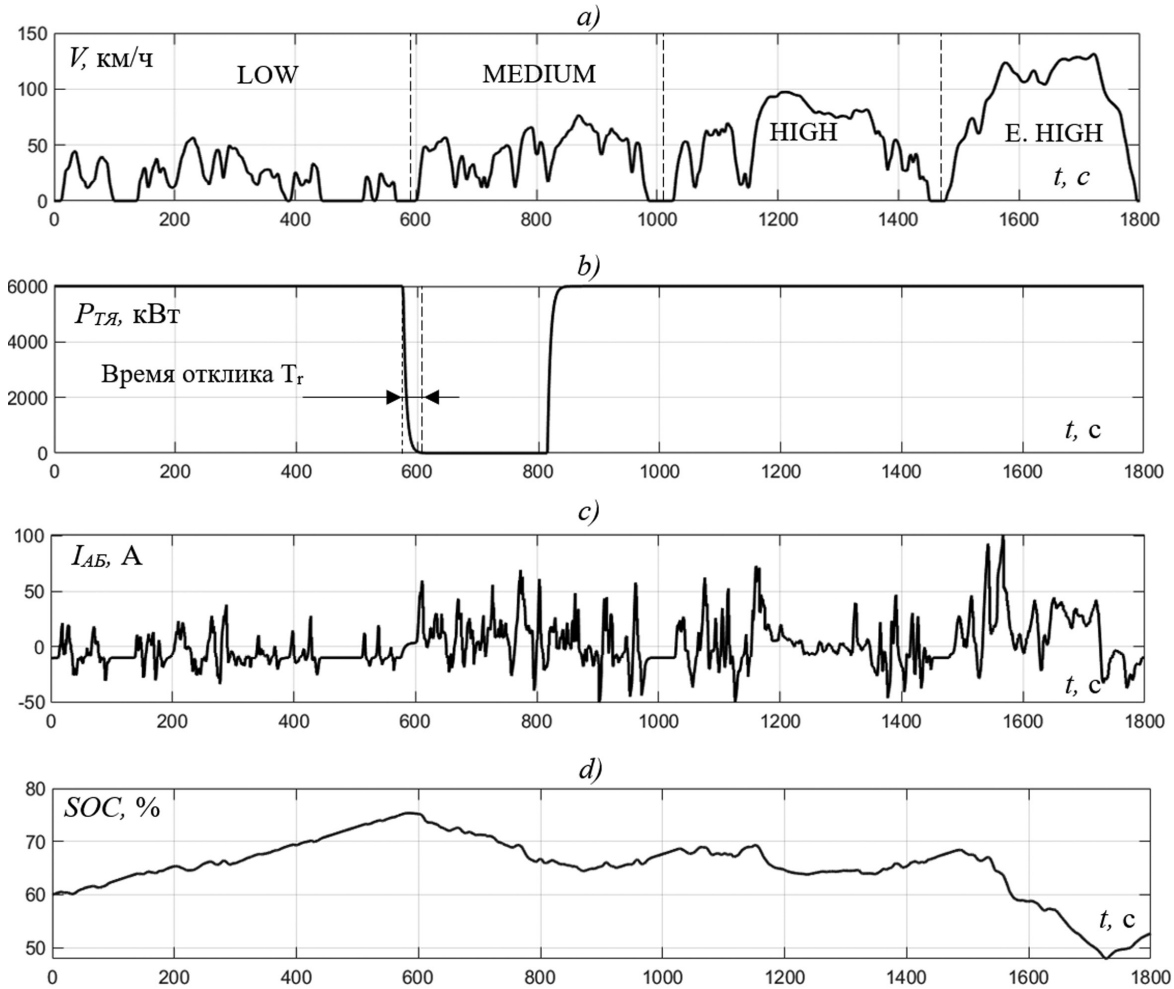


Рис. 10. Диаграммы изменения основных величин энергоустановки:
а) Скорость; *б)* Мощность ТЯ; *в)* Величина тока БН; *г)* SOC БН
Fig. 10. Diagrams of changes in the main quantities of the power plant:
a) Speed; *b)* FC power; *c)* BN current value; *d)* BN SOC

Величина тока при мощности ТЯ $P_{ТЯ}$ = 6 кВт не превышает 100 А в режиме разряда, и 50 *А* в режиме заряда. Таким образом, емкость БН не должна быть менее 10 А·ч.

4. Результаты и обсуждение

Для уточнения выбранных параметров мощности ТЯ и емкости БН выполнено имитационное моделирование при различных SOC. Как видно из рисунка 11, за 3,5 часа СЭ на основе FSM нормализует работу БН, используя его в ресурсосберегающем диапазоне SOC.

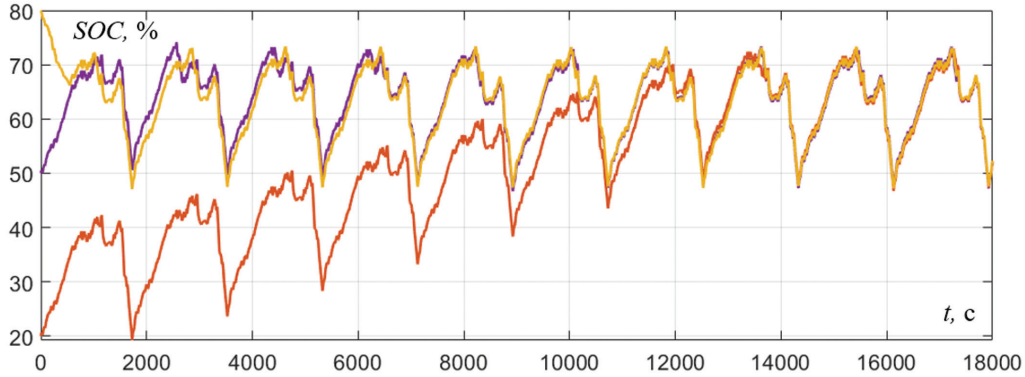


Рис. 11. Изменение SOC при различных начальных состояниях

Fig. 11. SOC changes for different initial states

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Согласно разработанной имитационной модели выполнен анализ гибридного тягового привода с различным сочетанием мощности ТЯ и емкости БН (Рис. 12). Ограничения, накладываемые на установку:

Максимальная мощность ТЯ не может быть меньше средней мощности нагрузочного цикла WLTC;

Максимальная кратковременная токовая нагрузка на БН не должна превышать 10 с.

Область I является примером технологического развития в направлении аккумуляторных ЭТС, при этом устраняется необходимость в дополнительном источнике энергии (ДВС, ТЯ и т.д.), тогда как в области III рациональнее всего отказаться от БН, а тяговый привод выполнять в соответствии с классическим автотранспортом. Область II – промежуточное решение, связанное с необходимостью минимизировать затраты топлива и с ограничениями, накладываемыми характеристиками применяемых типов аккумуляторов. Согласно разработанной модели:

Область I – Мощность ТЯ менее 5 кВт/т. Из-за ограничения по максимальному току БН на базе LTO аккумулятора значительно увеличивается требуемая емкость. Кроме этого, номинальной мощности ТЯ недостаточно для генерации энергии на всем пути, поэтому происходят кратковременные включения на максимальной мощности.

Область II – Мощность ТЯ от 5 до 11 кВт/т. Наиболее благоприятная область совместной работы двух источников энергии в составе гибридной энергоустановки. При этом БН эксплуатируется в ресурсосберегающей области SOC, а ТЯ работает в номинальном режиме с кратковременными отключениями.

Область III – Мощность ТЯ более 11 кВт/т. Дальнейшее увеличение мощности приводит к длительному простою ТЯ. При этом происходит не уменьшение, а увеличение требуемой емкости БН. Это связано с кратковременными пиками энергопотребления, которые определяют параметры БН, а скорости включения ТЯ недостаточно, чтобы отреагировать на изменение величины потребляемой мощности.

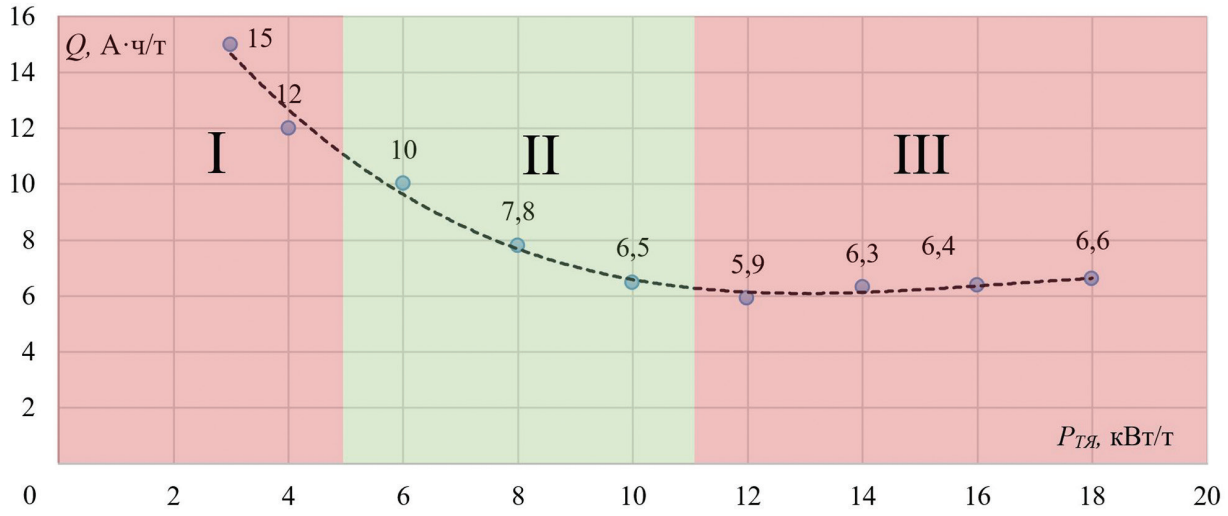


Рис. 12 .Зависимость требуемой емкости БН от мощности ТЯ

Fig. 12. Dependence of the required BN capacity on the power of the fuel cell

Удельный расход топлива полученной модели гибридной энергоустановки при прохождении цикла WLTC составил 0,56 кг/(100 км·т), что согласуется с показателями современных промышленных моделей порядка 0,3…0,7 кг/(100 км·т). Доля включенного состояния ТЯ составила 94,53 % от всего времени заезда, что подтверждает корректность выбранного оборудования и адекватность синтезированной модели.

Выводы

Выполнено имитационное моделирование и симуляция тягового гибридного привода электромобиля на базе ПОМТЯ и буферного LTO аккумулятора. Синтезированная модель позволяет проводить оценку параметров бортовых источников энергии и итогового расхода топлива установки, при воздействии нагрузочного профиля согласно WLTC. Реализована детерминированная СЭ на основе FSM, направленная на работу системы с максимальным КПД, а также на поддержание ресурсосберегающего диапазона SOC БН.

По результатам анализа синтезированной модели получен оптимальный диапазон мощности ПОМТЯ и емкости БН, приведенный к тонне веса транспортного средства. Полученная величина удельного расхода топлива (0,56 кг/(100 км·т) и доля включенного состо-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

яния ТЯ (94,53 %) подтверждают корректность имитационной модели.

Дальнейшее исследование направлено на применение более интеллектуальных СЭ для улучшения взаимодействия ТЯ и БН и, как следствие, повышение топливной эффективности.

Список литературы

[1]. K. G. Logan, J. D. Nelson, C. Brand, A. Hastings. Phasing in electric vehicles: Does policy focusing on operating emission achieve net zero emissions reduction objectives? // Transportation Research Part A: Policy and Practice. – 2021. – № 152 – P. 100-114. https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.08.001.

[2]. M. Ehsani, K. V. Singh, H. O. Bansal, R. T. Mehrjardi. State of the Art and Trends in Electric and Hybrid Electric Vehicles // Proceedings of the IEEE. – 2021. – № 109(6). – P. 967-984. https://doi.org/10.1109/jproc.2021.3072788.

[3]. J. N. Barkenbus. Prospects for Electric Vehicles // Sustainability. – 2020. – № 12(14). 5813. https://doi.org/10.3390/su12145813.

[4]. N. Kittner, I. Tsiropoulos, D. Tarvydas, O. Schmidt, I. Staffell, D. M. Kammen. Electric vehicles // Technological Learning in the Transition to a Low-Carbon Energy System. – 2020. – P. 145-163. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818762-3.00009-1.

[5]. S. Solaymani. CO_2 emissions patterns in 7 top carbon emitter economies: the case of transport sector // Energy. – 2018. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.145.

[6]. G. Santos. Road transport and CO2 emissions: What are the challenges? // Transport Policy. – 2017. – № 59. – P. 71-74. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.06.007.

[7]. M. Muratori, M. Alexander, D. Arent, M. Bazilian, P. Cazzola, E. M Dede, J. Farrell, C. Gearhart, D. Greene, A. Jenn. The rise of electric vehicles – 2020 status and future expectations. // Progress in Energy. – 2021. – Vol. 3(2). https://doi.org/10.1088/2516-1083/abe0ad.

[8]. A. F. Pennington, C. R. Cornwell, K. D. Sircar, M. C. Mirabelli. Electric vehicles and health: A scoping review // Environmental Research – 2024. – Vol. 251, Part 2. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118697.

[9]. J. J. Hwang, W. R. Chang. Characteristic study on fuel cell/battery hybrid power system on a light electric vehicle // Journal of Power Sources. – 2012. – № 207, 1 – P. 111-119, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.008.

[10]. A. Veziroglu, R. Macario. Fuel cell vehicles: State of the art with economic and environmental concerns // International Journal of Hydrogen Energy. – 2011. – № 35, 1. – P. 25-43, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.145.

[11]. J. J. Hwang, W. R. Chang., F. B. Weng, A. Su, C.K. Chen. Development of a small vehicular PEM fuel cell system // International Journal of Hydrogen Energy. – 2008. – № 33, 14. – P. 3801-07, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.04.043.

[12]. C. E. Thomas Fuel cell and battery electric vehicles compared // International Journal of Hydrogen Energy. – 2009. – № 34, 15. – P. 6005-20, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.06.003.

[13]. Fuel Cell Vehicle Market Size, Share & Trends Analysis Report [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.novaoneadvisor.com/report/fuel-cell-vehicle-market. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 15.08.2023).

[14]. N. Mebarki, T. Rekioua, Z. Mokrani, D. Rekioua, S. Bacha. Fuel cell and battery electric vehicles compared // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – № 41, 45. – P. 20993-21005, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.208.

[15]. N. I. Shurov, S. I. Dedov, A. A. Shtang // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1661: International Conference on Information Technology in Business and Industry (ITBI 2020), Novosibirsk, 6-8 Apr. 2020. – Art. 012193 (8 p.). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1661/1/012193.

[16]. Current status and operating principles of hydrogen power plant in urban transport / E. A. Spiridonov, N. I. Schurov, M. V. Yaroslavtsev, E. G. Langeman, K. I. Kulikov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560: International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, 2018. – Art. 012111 (5 p.). – https://doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012111.

[17]. Щуров Н. И., Штанг А. А., Дедов С. И., Латышев Р. Н. Применение комбинированного накопителя энергии для увеличения срока службы аккумулятора электромобиля // Электропитание. – 2022. – № 2. – С. 24-33. EDN: VHCWNR

[18]. Andriyashin S. N. Fuel cells as a future of automotive industry: A review of current developments / S. N. Andriyashin, N. I. Schurov. – DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012002. – Text: direct // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1061: International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021), Novorossiysk, 15-16 June 2021. – Art. 012002 (6 p.).

[19]. T. S. Babu, K. R. Vasudevan, V. K. Ramachandaramurthy, S. B. Sani, S. CheMud, R. M. Lajim. A comprehensive review of hybrid energy storage systems: converter topologies, control strategies and future prospects // IEEE Access. – 2020. Vol. 8. https://doi.org/10.1109/access.2020.3015919.

[20]. T. Zimmermann, P. Keil, M. Hofmann, M. F. Horsche, S. Pichlmaier, A. Jossen. Review of system

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

topologies for hybrid electrical energy storage systems // Journal of Energy Storage. – 2016. – Vol. 8. – P. 78-90. https://doi.org/10.1016/j.est.2016.09.006.

[21].A. Khaligh, Li Zhihao. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2010. – Vol. 59(6) – P. 2806-14. https://doi.org/10.1109/tvt.2010.2047877.

[22].K. I. Kulikov, N. I. Schurov, M. V. Yaroslavtsev, E. A. Spiridonov, E. G. Langeman. Analysis of maximum braking power for determination of energy storage device characteristics within fuel cell electric bus // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1333, iss. 5. – Art. 052016 (6 p.). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/5/052016.

[23].Shiqi Liu, Yang Bin, Yaoyu Li, Birgit Scheppat B. Hierarchical MPC Control Scheme for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – № 51, 31. – P. 646-652, https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.10.151.

[24].J. Bauman, M. Kazerani. A Comparative Study of Fuel-Cell-Battery, Fuel-Cell-Ultracapacitor, and Fuel-Cell-Battery-Ultracapacitor Vehicles // IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY. – 2008. – № 57, 2. – P. 760-769, https://doi.org/10.1109/tvt.2007.906379.

[25].M. İnci, M. Büyük, M.H. Demir, G. İlbey. A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – № 137, https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110648.

[26].M. Muthukumar, N. Rengarajan, B. Velliyangiri, M. A. Omprakas, C. B. Rohit, U. Kartheek. The development of fuel cell electric vehicles – A review // Materials Today: Proceedings – 2021. – № 45, 2 – P. 1181-1187. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.679.

[27].Caisheng Wang, Hashem Nehrir M., Hongwei Gao. Control of PEM Fuel Cell Distributed Generation Systems // IEEE Transactions on Energy Conversion – 2006. – № 21, 2. – P. 586-595. https://doi.org/10.1109/TEC.2005.860404.

[28].Teng Teng, Xin Zhang, Han Dong, Qicheng Xue. A comprehensive review of energy management optimization strategies for fuel cell passenger vehicle // International Journal of Hydrogen Energy – 2020. – № 45, 39. – P. 20293-303. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.202.

[29].C. Deutsch, A. Chiche, S. Bhat, C. Lagergren, G. Lindbergh, J. Kuttenkeuler. Evaluation of energy management strategies for fuel cell/battery-powered underwater vehicles against field trial data // Energy Conversion and Management: X – 2022. – № 14. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100193.

[30].B. R. Trilaksono, A. Syaichu-Rohman, C. J. Dronkers, A. Sasongko. Energy Management of Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid Power Sources Using Model Predictive Control // IEEE Transactions on Industrial Informatics – 2014. – № 10, 4. https://doi.org/10.1109/TII.2014.2333873.

[31].Z. Chen, Y. Liu, M. Ye, Y. Zhang, Z. Chen, G. Li. A survey on key techniques and development perspectives of equivalent consumption minimisation strategy for hybrid electric vehicles // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – № 151, 111607. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111607.

[32].L. Tribioli, A. Fumarola, F. Martini. Methodology Procedure for Hybrid Electric Vehicles Design // SAE Technical Paper Series. – 2011. https://doi.org/10.4271/2011-24-0071.

[33].A. Lange, F. Küçükay. A new, systematic approach to determine the global energy optimum of a hybrid vehicle. // Automot. Engine Technol. – 2016. – № 1, – P. 35-46. https://doi.org/10.1007/s41104-016-0011-3.

[34].M. Tutuianu, P. Bonnel, B. Ciuffo, T. Haniu, N. Ichikawa, A. Marotta, H. Steven. Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) and a possible pathway for its introduction in the European legislation // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2015. – № 40. – P. 61-75. https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.07.011.

[35].Calculation of hybrid bus power demands by standard driving cycles / M. V. Yaroslavtsev, A. A. Shtang, S. I. Dedov, X. Wu // The 19 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2018: proc., Erlagol, Altai, 29 June – 3 July 2018. – IEEE Computer Society, 2018. – P. 469-472. – ISBN 978-153865021-9. https://doi.org/10.1109/EDM.2018.8435023.

[36].K. Ettihir, M. Higuita Cano, L. Boulon, K. Agbossou. Design of an adaptive EMS for fuel cell vehicles // International Journal of Hydrogen Energy, – 2017. – № 42(2) – P. 1481-1489. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.211.

[37].D. Feroldi, M. Serra, J. Riera. Energy Management Strategies based on efficiency map for Fuel Cell Hybrid Vehicles // Journal of Power Sources. – 2009. – № 190(2). – P. 387-401. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.01.040.

[38].H. -Y. Hwang. Developing Equivalent Consumption Minimization Strategy for Advanced Hybrid System-II Electric Vehicles // Energies. – 2020. – № 13, 2033. https://doi.org/10.3390/en13082033.

[39].M. J. Khan, M. T. Iqbal. Dynamic Modelling and Simulation of a Fuel Cell Generator, Fuel Cells Special Issue: Modelling of Fuel Cell Systems // Fuel Cells. – 2005. – № 5, – P. 97-104. https://doi.org/10.1002/fuce.200400054.

[40].Y. He, C. Miao, J. Wu, X. Zheng, X. Liu, F. Han. Research on the Power Distribution Method for Hybrid

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Power System in the Fuel Cell Vehicle // Energies. – 2021. – № 14, 734. https://doi.org/10.3390/en14030734.

[41].S. N. Motapon, O. Tremblay, L. A. Dessaint. Development of a generic fuel cell model: application to a fuel cell vehicle simulation // International Journal of Power Electronics. – 2012. – № 4(6), 505. https://doi.org/10.1504/ijpelec.2012.052427.

[42].Щуров Н. И. Анализ влияния режимов движения электромобилей на старение тяговых аккумуляторов на основе журнала WLTC / Н. И. Щуров, А. А. Штанг, С. И. Дедов // Журнал сибирского федерального университета. Серия: техника и технологии. – 2020. – № 13. – С. 12-18. EDN: TBRUXN.

[43].Щуров Н. И., Штанг А. А., Дедов С. И., Сяоган У. Анализ влияния режимов движения электромобилей на процесс старения тяговых аккумуляторов на основе цикла WLTC // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2020. – С. 977-990. https://doi.org/10.17516/1999-494x-0279.

[44].SCiB. High-power type cells [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/product/cell/high-power.html. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 15.08.2023).

[45].K. Wu, J. Yang, Y. Zhang. Investigation on Li4Ti5O12 batteries developed for hybrid electric vehicle // J Appl Electrochem. – 2012. – № 42. – P. 989-995. https://doi.org/10.1007/s10800-012-0442-0.

References

[1]. K. G. Logan, J. D. Nelson, C. Brand, A. Hastings. Phasing in electric vehicles: Does policy focusing on operating emission achieve net zero emissions reduction objectives? // Transportation Research Part A: Policy and Practice. – 2021. – № 152 – P. 100-114. https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.08.001.

[2]. M. Ehsani, K. V. Singh, H. O. Bansal, R. T. Mehrjardi. State of the Art and Trends in Electric and Hybrid Electric Vehicles // Proceedings of the IEEE. – 2021. – № 109(6). – P. 967-984. https://doi.org/10.1109/jproc.2021.3072788.

[3]. J. N. Barkenbus. Prospects for Electric Vehicles // Sustainability. – 2020. – № 12(14). 5813. https://doi.org/10.3390/su12145813.

[4]. N. Kittner, I. Tsiropoulos, D. Tarvydas, O. Schmidt, I. Staffell, D. M. Kammen. Electric vehicles // Technological Learning in the Transition to a Low-Carbon Energy System. – 2020. – P. 145-163. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818762-3.00009-1.

[5]. S. Solaymani. CO_2 emissions patterns in 7 top carbon emitter economies: the case of transport sector // Energy. – 2018. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.145.

[6]. G. Santos. Road transport and CO2 emissions: What are the challenges? // Transport Policy. – 2017. – № 59. – P. 71-74. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.06.007.

[7]. M. Muratori, M. Alexander, D. Arent, M. Bazilian, P. Cazzola, E. M Dede, J. Farrell, C. Gearhart, D. Greene, A. Jenn. The rise of electric vehicles – 2020 status and future expectations. // Progress in Energy. – 2021. – Vol. 3(2). https://doi.org/10.1088/2516-1083/abe0ad.

[8]. A. F. Pennington, C. R. Cornwell, K. D. Sircar, M. C. Mirabelli. Electric vehicles and health: A scoping review // Environmental Research – 2024. – Vol. 251, Part 2. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118697.

[9]. J. J. Hwang, W. R. Chang, Characteristic study on fuel cell/battery hybrid power system on a light electric vehicle // Journal of Power Sources. – 2012. – № 207, 1. – P. 111-119, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.008.

[10]. A. Veziroglu, R. Macario. Fuel cell vehicles: State of the art with economic and environmental concerns // International Journal of Hydrogen Energy. – 2011. – № 35, 1. – P. 25-43, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.145.

[11]. J. J. Hwang, W. R. Chang., F. B. Weng, A. Su, C.K. Chen. Development of a small vehicular PEM fuel cell system // International Journal of Hydrogen Energy. – 2008. – № 33, 14. – P. 3801-07, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.04.043.

[12]. C. E. Thomas Fuel cell and battery electric vehicles compared // International Journal of Hydrogen Energy. – 2009. – № 34, 15. – P. 6005-20, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.06.003.

[13]. Fuel Cell Vehicle Market Size, Share & Trends Analysis Report [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.novaoneadvisor.com/report/fuel-cell-vehicle-market. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 15.08.2023).

[14]. N. Mebarki, T. Rekioua, Z. Mokrani, D. Rekioua, S. Bacha. Fuel cell and battery electric vehicles compared // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – № 41, 45 – P. 20993-21005, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.208.

[15]. N. I. Shurov, S. I. Dedov, A. A. Shtang // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1661: International Conference on Information Technology in Business and Industry (ITBI 2020), Novosibirsk, 6-8 Apr. 2020. – Art. 012193 (8 p.). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1661/1/012193.

[16]. Current status and operating principles of hydrogen power plant in urban transport / E. A. Spiridonov, N. I. Schurov, M. V. Yaroslavtsev, E. G. Langeman, K. I. Kulikov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560: International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, 2018. – Art. 012111 (5 p.). – https://

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012111.

[17]. Shchurov N. I., Shtang A. A., Dedov S. I., Latyshev R. N. Application of a combined energy storage device to increase the service life of an electric vehicle battery // Electric Power Supply. – 2022. – No. 2. – P. 24-33. EDN: VHCWNR

[18]. Andriyashin S. N. Fuel cells as a future of automotive industry: A review of current developments / S. N. Andriyashin, N. I. Schurov. – DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012002. – Text: direct // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1061: International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021), Novorossiysk, 15-16 June 2021. – Art. 012002 (6 p.).

[19]. T. S. Babu, K. R. Vasudevan, V. K. Ramachandaramurthy, S. B. Sani, S. CheMud, R. M. Lajim. A comprehensive review of hybrid energy storage systems: converter topologies, control strategies and future prospects // IEEE Access. – 2020. Vol. 8. https://doi.org/10.1109/access.2020.3015919.

[20]. T. Zimmermann, P. Keil, M. Hofmann, M. F. Horsche, S. Pichlmaier, A. Jossen. Review of system topologies for hybrid electrical energy storage systems // Journal of Energy Storage. – 2016. – Vol. 8. – P. 78-90. https://doi.org/10.1016/j.est.2016.09.006.

[21]. A. Khaligh, Li Zhihao. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2010. – Vol. 59(6) – P. 2806-14. https://doi.org/10.1109/tvt.2010.2047877.

[22]. K. I. Kulikov, N. I. Schurov, M. V. Yaroslavtsev, E. A. Spiridonov, E. G. Langeman. Analysis of maximum braking power for determination of energy storage device characteristics within fuel cell electric bus // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1333, iss. 5. – Art. 052016 (6 p.). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/5/052016.

[23]. Shiqi Liu, Yang Bin, Yaoyu Li, Birgit Scheppat B. Hierarchical MPC Control Scheme for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – № 51, 31 – P. 646-652, https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.10.151.

[24]. J. Bauman, M. Kazerani. A Comparative Study of Fuel-Cell-Battery, Fuel-Cell-Ultracapacitor, and Fuel-Cell-Battery-Ultracapacitor Vehicles // IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY. – 2008. – № 57, 2. – P. 760-769, https://doi.org/10.1109/tvt.2007.906379.

[25]. M. İnci, M. Büyük, M.H. Demir, G. İlbey. A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – № 137, https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110648.

[26]. M. Muthukumar, N. Rengarajan, B. Velliyangiri, M. A. Omprakas, C. B. Rohit, U. Kartheek. The development of fuel cell electric vehicles – A review // Materials Today: Proceedings – 2021. – № 45, 2. – P. 1181-1187. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.679.

[27]. Caisheng Wang, Hashem Nehrir M., Hongwei Gao. Control of PEM Fuel Cell Distributed Generation Systems // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2006. – № 21, 2. – P. 586-595. https://doi.org/10.1109/TEC.2005.860404.

[28]. Teng Teng, Xin Zhang, Han Dong, Qicheng Xue. A comprehensive review of energy management optimization strategies for fuel cell passenger vehicle // International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – № 45, 39. – P. 20293-303. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.202.

[29]. C. Deutsch, A. Chiche, S. Bhat, C. Lagergren, G. Lindbergh, J. Kuttenkeuler. Evaluation of energy management strategies for fuel cell/battery-powered underwater vehicles against field trial data // Energy Conversion and Management: X. – 2022. – № 14. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100193.

[30]. B. R. Trilaksono, A. Syaichu-Rohman, C. J. Dronkers, A. Sasongko. Energy Management of Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid Power Sources Using Model Predictive Control // IEEE Transactions on Industrial Informatics – 2014. – № 10, 4. https://doi.org/10.1109/TII.2014.2333873.

[31]. Z. Chen, Y. Liu, M. Ye, Y. Zhang, Z. Chen, G. Li. A survey on key techniques and development perspectives of equivalent consumption minimisation strategy for hybrid electric vehicles // Renewable and Sustainable Energy Reviews. –2021. – № 151, 111607. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111607.

[32]. L. Tribioli, A. Fumarola, F. Martini. Methodology Procedure for Hybrid Electric Vehicles Design // SAE Technical Paper Series. – 2011. https://doi.org/10.4271/2011-24-0071.

[33]. A. Lange, F. Küçükay. A new, systematic approach to determine the global energy optimum of a hybrid vehicle. // Automot. Engine Technol. – 2016. – № 1. – P. 35-46. https://doi.org/10.1007/s41104-016-0011-3.

[34]. M. Tutuianu, P. Bonnel, B. Ciuffo, T. Haniu, N. Ichikawa, A. Marotta, H. Steven. Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) and a possible pathway for its introduction in the European legislation // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2015. – № 40. – P. 61-75. https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.07.011.

[35]. Calculation of hybrid bus power demands by standard driving cycles / M. V. Yaroslavtsev, A. A. Shtang, S. I. Dedov, X. Wu // The 19 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2018 : proc., Erlagol, Altai, 29 June – 3 July 2018. – IEEE Computer Society, 2018. – P. 469-472. – ISBN 978-153865021-9. – https://doi.org/10.1109/EDM.2018.8435023.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

[36]. K. Ettihir, M. Higuita Cano, L. Boulon, K. Agbossou. Design of an adaptive EMS for fuel cell vehicles // International Journal of Hydrogen Energy, – 2017. – № 42(2) – P. 1481-1489. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.211.

[37]. D. Feroldi, M. Serra, J. Riera. Energy Management Strategies based on efficiency map for Fuel Cell Hybrid Vehicles // Journal of Power Sources. – 2009. – № 190(2). – P. 387-401. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.01.040.

[38]. H. -Y. Hwang. Developing Equivalent Consumption Minimization Strategy for Advanced Hybrid System-II Electric Vehicles // Energies. – 2020. – № 13, 2033. https://doi.org/10.3390/en13082033.

[39]. M. J. Khan, M.T. Iqbal. Dynamic Modelling and Simulation of a Fuel Cell Generator, Fuel Cells Special Issue: Modelling of Fuel Cell Systems // Fuel Cells. – 2005. – № 5, – P. 97-104. https://doi.org/10.1002/fuce.200400054.

[40]. Y. He, C. Miao, J. Wu, X. Zheng, X. Liu, F. Han. Research on the Power Distribution Method for Hybrid Power System in the Fuel Cell Vehicle // Energies. – 2021. – № 14, 734. https://doi.org/10.3390/en14030734.

[41]. S. N. Motapon, O. Tremblay, L. A. Dessaint. Development of a generic fuel cell model: application to a fuel cell vehicle simulation // International Journal of Power Electronics. – 2012. – № 4(6), 505. https://doi.org/10.1504/ijpelec.2012.052427.

[42]. Shchurov N. I. Analysis of the influence of driving modes of electric vehicles on the aging of traction batteries based on the WLTC journal / N. I. Shchurov, A. A. Shtang, S. I. Dedov // Journal of the Siberian Federal University. Series: equipment and technology. – 2020. – №. 13. – P. 12-18. EDN: TBRUXN.

[43]. Shchurov N. I., Shtang A. A., Dedov S. I., Xiaogang Wu. Analysis of the influence of driving modes of electric vehicles on the aging process of traction batteries based on the WLTC cycle // Journal of Siberian Federal University. Technics and techology. – 2020. – P. 977-990. https://doi.org/10.17516/1999-494x-0279.

[44]. SCiB. High-power type cells [Electronic resource]. – Access mode: https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/product/cell/high-power.html. – Title from the screen. – (Date of access: 08.15.2023).

[45]. K. Wu, J. Yang, Y. Zhang. Investigation on Li4Ti5O12 batteries developed for hybrid electric vehicle // J Appl Electrochem. – 2012. – № 42. – P. 989-995. https://doi.org/10.1007/s10800-012-0442-0.

Транслитерация по BSI

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Статья поступила в редакцию 07.02.24 Ред. Рег. № 303-002-24 The article has entered in publishing office 07.02.24 Ed. Reg. No. 303-002-24

УДК 621.352

АНАЛИЗ СОЗДАНИЯ ПУСКОВОГО МОМЕНТА ТРЕХКАСКАДНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ НОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАРТЕРНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Жарков М. А., Сараханова Р. Ю., Харитонов С. А.

Новосибирский Государственный Технический Университет
630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20
e-mail; maks.zharkoff@yandex.ru;
sarakhanova_nstu@mail.ru; kharit1@yandex.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.182-197

Заключение совета рецензентов: 21.02.24 Заключение совета экспертов: 26.02.24 Принято к публикации: 29.02.24

Современные тенденции в отраслях, связанных с автономными, подвижными объектами, такими как авиастроение, направлены на увеличение доли электрификации или на полную замену всех агрегатов в пользу электрических. Замена узлов и агрегатов на полностью электрические соответствует концепции полностью электрического самолета, основой которого являются новые источники питания и источники электродвижения, такие как – литий-ионные аккумуляторы, водородные элементы питания, источники на основе возобновляемой энергетики. В то же время повышаются требования к энергоэффективности и массогабаритным показателям узлов и агрегатов. Эти потребности могут быть учтены за счет многоцелевого использования оборудования, а также с помощью новых систем, сочетающих в себе ряд функций.

В статье рассматривается использование авиационного трёхкаскадного синхронного генератора в качестве пускового устройства для газотурбинного двигателя. Проанализированы проблемы, связанные с использованием трёхкаскадного генератора, и предложен способ их решения. В статье представлен способ создания пускового момента с использованием реактивной составляющей электромагнитного момента для синхронного явнополюсного генератора. Анализ проведен с точки зрения формирования электромагнитного момента в авиационном генераторе с помощью инвертора напряжения. Получено обобщенное выражение для момента, регулируемое и управляемое электрическими параметрами преобразователя частоты.

Ключевые слова: система запуска, трехкаскадный синхронный генератор, dc/ac преобразователь, система управления, электромагнитный момент синхронного генератора, угловая характеристика.

Жарков М. А., Сараханова Р. Ю., Харитонов С. А. Анализ создания пускового момента трехкаскадного синхронного генератора для новой электростартерной системы на базе водородных топливных элементов // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 02 (419) 2024, с. 182-197

Zharkov M. A., Sarakhanova R. Yu., Kharitonov S. A. Analysis of the creation of the starting torque of a three-stage generator for a new electric starter system based on hydrogen fuel cells // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 02 (419) 2024, pp. 182-197

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ANALYSIS OF THE CREATION OF THE STARTING TORQUE OF A THREE-STAGE GENERATOR FOR A NEW ELECTRIC STARTER SYSTEM BASED ON HYDROGEN FUEL CELLS

Zharkov M. A., Sarakhanova R. Yu., Kharitonov S. A.

Novosibirsk State Technical University
630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20
e-mail; maks.zharkoff@yandex.ru;
sarakhanova_nstu@mail.ru; kharit1@yandex.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.182-197

Referred: 21.02.24 Received in revised form: 26.02.24 Accepted: 29.02.24

Current trends in industries related to autonomous, mobile objects, such as aircraft manufacturing, are aimed at increasing the share of electrification or completely replacing all units in favor of electric ones. Replacing components and assemblies with fully electric ones corresponds to the concept of a fully electric aircraft, which is based on new power sources and sources of electric propulsion, such as lithium-ion batteries, hydrogen batteries, and sources based on renewable energy. At the same time, the requirements for energy efficiency and weight and size parameters of components and assemblies are increasing. These needs can be met through the multi-purpose use of equipment, as well as through new systems that combine a number of functions.

The article discusses the use of an aircraft three-stage synchronous generator as a starting device for a gas turbine engine. The problems associated with the use of a three-stage generator are analyzed and a method for solving them is proposed. The article presents a method for creating a starting torque using the reactive component of the electromagnetic torque for a synchronous salient pole generator. The analysis was carried out from the point of view of the formation of electromagnetic torque in an aircraft generator using a voltage inverter. A generalized expression for the torque is obtained, regulated and controlled by the electrical parameters of the frequency converter.

Keywords: starting system, three-stage synchronous generator, dc/ac converter, control system, electromagnetic torque of the synchronous generator, angular characteristic.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Жарков
Максим Андреевич
Zharkov
Maksim Andreevich

Сведения об авторе: кандидат техн. наук, доцент кафедры Электроники и Электротехники, заместитель директора Института силовой электроники НГТУ.

Область научных интересов: силовая электроника, авиационные системы генерирования, электропривод.

Опубликовано: более 50 научных работ.

Inormation about the author: candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of EE, Deputy Director of the Institute of Power Electronics of NSTU.

Research interests: power electronics, aviation generation systems, electric drive.

More than 50 scientific papers have been published.

Сараханова
Регина Юрьевна
Sarakhanova
Regina Yurievna

Сведения об авторе: младший научный сотрудник, Институт Силовой Электроники, НГТУ.

Область научных интересов: силовая электроника, авиационные системы генерирования, непосредственные преобразователи частоты.

Опубликовано: 10 научныхработ.

Inormation about the author: engineer, Institute of power electronics, NSTU.

Her research interests are currently focused on power electronics, aircraft generating systems, direct frequency converters.

She is author of 10 scientific papers.

Харитонов
Сергей Александрович
Kharitonov
Sergey Aleksandrovich

Сведения об авторе: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Электроники и Электротехники, директор Института силовой электроники Новосибирского государственного технического университета.

Область научных интересов: силовая электроника, авиационные системы генерирования, непосредственные преобразователи частоты, системы накопления электрической энергии.

Опубликовано: более 300 научных работ.

Inormation about the author: Doctor of Science, Professor, Head Department of Electronics and Electrical Engineering, Director of Institute of Power Electronics, Novosibirsk State Technical University.

His research interests are currently focused on power electronics, aircraft generating systems, direct frequency converters.

He is author of 300 scientific papers.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Таблица сокращений	
Аббревиатуры	
ТСГ	Трехкаскадный синхронный генератор
ЭДС	Электродвижущая сила
БРЗУ	Блок регулирования защиты и управления
КПД	Коэффициент полезного действия
Airbus	Авиастроительная компания
H2Fly	Штутгартская компания
HY4	Четырехместный самолет
DLR	Немецкий аэрокосмический центр
Dornier	40-местный самолет
Символы и обозначения	
$E_0(n)$	Функция изменения ЭДС
$E_0(approx)$	Аппроксимированная функция изменения ЭДС
$E_0(exp)$	Экспериментальная функция изменения ЭДС
ψ_{line}	Линейное изменение угла управления
ψ_{seg}	Оптимальное изменение угла управления
ψ_{const}	Постоянный угол управления
θ	Угол нагрузки
θ_{cr}	Критический угол
δ	Относительная ошибка
n_{shaft}	Скорость вала
M_{em}	Электромагнитный момент
M_{fd}	Взаимоиндукция обмотки возбуждения с фазой обмотки статора
об/мин	Обороты в минуту
Φ_f	Магнитный поток обмотки возбуждения основного каскада
$k_{об}$	Обмоточный коэффициент
w_f	Количество витков

Введение

Внедрение экологически чистых технологий в авиацию обеспечит значительное улучшение экологии воздуха в ближайшем будущем и окажет положительное влияние на повышение качества жизни на планете. Сохранение климата и улучшение состояния окружающей среды будут достигнуты за счет широкого внедрения концепции альтернативной энергетики и экологии. Важнейшим принципом концепции является использование возобновляемых и экологически чистых невозобновляемых источников энергии для производства универсальных энергоносителей – водорода и электричества. В последнее время в связи с увеличением потока воздушных перевозок усиливается антропогенное воздействие на воздушную среду. Продукты сгорания попадают в океан и лесные зоны только через несколько лет или даже десятилетий. Токсичные вещества и парниковые газы оказывают крайне негативное воздействие на климат и экологию. Первый официальный запуск состоялся в 1957 году, а распространение электрических моделей самолетов началось в 1970-х годах. Первый полет с человеком на борту на электрическом самолете был осуществлен в 1973 году, время полета составило 14 минут. Основная проблема при создании электрического самолета заключается в том, что энергетическая емкость литий-ионных аккумуляторов более чем в десять раз меньше энергетической емкости керосинового топлива. Вторая проблема заключается в том, что масса такого летательного аппарата постоянна во время полета, в отличие от самолетов, использующих топливо. По мере израсходования топлива требуемая подъемная сила уменьшается, что позволяет ему летать в более экономичных режимах: на больших высотах или с меньшими углами атаки.

Использование водорода в системах топливных баков на борту самолетов и выработка электроэнергии в цикле топливных элементов, вероятно, устранят основные проблемы электрических самолетов с аккумуляторными батареями. Проект «Опыт» разрабатывается с 1980 года. Для обслуживания самолета был разработан авиационный криогенный комплекс, позволяющий проводить различные виды испытаний с использованием больших количеств криогенной жидкости. Первый полет был выполнен 15 апреля 1988 года экипажем летчика-испытателя В. А. Севанкаева. Первый испытательный полет на сжиженном газе был выполнен 18 января 1989 года. Всего было совершено более ста полетов, пять из них с использованием жидкого водорода, и установлено 14 мировых рекордов. Сам Ту-155 использовал один двигатель НК-88, работающий на водороде (справа), и два турбовентиляторных двигателя НК-8-2. Топливный бак с экранированной теплоизоляцией, содержащий 17,5 м^3 сжиженного газа вместе с системой подачи топлива и системой поддержания давления располагался в задней части фюзеляжа, в отсеке, постоянно продуваемом воздухом (или азотом) (из-за конструктивных трудностей размещения в крыле). Резервуар, трубопроводы и агрегаты топливного комплекса имели экранно-вакуумную изоляцию, обеспечивающую заданный приток тепла. Первоначально в качестве топлива использовался сжиженный водород (температура до –253 °С). В 1989 году самолет был переведен на сжиженный природный газ (температура –162 °С). Дополнительно установлены системы: гелиевая (для управления силовой установкой), азотная (заменяет нормальную атмосферу в отсеках самолета и предупреждает об утечке криогенного топлива), контроль вакуума в теплоизоляционных полостях.

В настоящее время мощность источников питания, установленных на пассажирских, грузовых и военных самолетах, достигла уровня 0,5-1,5 МВА. Тенденция к увеличению мощности бортовых систем обусловлена ростом потребителей электрической энергии, а также уровнем потребления электроэнергии на борту воздушных судов.

Основными потребителями электроэнергии на борту являются следующие системы: система управления воздушным судном; система кондиционирования воздуха; радиолокационное оборудование; пилотажно-навигационное оборудование; система управления двигателем; система внешнего освещения; противообледенительная система [1], [2], [3], [4], [5]. Конкуренция в индустрии пассажирских самолетов устанавливает новые стандарты комфорта пассажиров (многие современные самолеты оснащены спутниковой связью и Wi-Fi для нужд пассажиров), делает самолеты более экологичными и эффективными, снижает уровень шума и эксплуатационные расходы. Решение поставленных задач во многом определяет система электроснабжения самолета. В частности, концепция «полностью электрического самолета» подразумевает использование на борту только электроэнергии и полный отказ от гидравлических и пневматических систем, а также многофункциональное использование авиационных систем [6], [7], [8], [9], [10].

Одним из вариантов такого многофункционального использования является создание электростартерного генератора на базе стандартного бесконтактного синхронного генератора переменного тока [11], [12], [13], [14], [15]. Среди генераторов наибольшее распространение получили бесконтактные синхронные генераторы, которые конструктивно представляют собой три электрические машины, объединенные общим валом, что дало им второе название – трехступенчатый синхронный генератор (ТССГ). В конструкции бесконтактного синхронного генератора переменного тока силовые обмотки (три фазы) размещены на статоре, что принципиально решает проблему исключения из конструкции наиболее критически

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Рис. 1. Электрический самолет, который облетел весь мир
Fig. 1. An electric plane that flew around the world

ненадежного элемента генератора постоянного тока – щеточного узла. Эти генераторы обладают высоким уровнем надежности благодаря тому, что энергия для питания обмотки возбуждения передается бесконтактно от статора к ротору. Еще одним преимуществом генераторов этого типа является возможность регулирования напряжения с помощью встроенной системы возбуждения.

Основной научно-технической задачей при создании электрического стартер-генератора на базе бесконтактного синхронного генератора является создание электромагнитного крутящего момента при околонулевых скоростях вращения вала. Это происходит из-за отсутствия электродвижущей силы от возбудителя из-за отсутствия тока возбуждения машины, этот эффект обусловлен конструкцией генератора. Эта проблема может иметь несколько решений, связанных с методами и алгоритмами управления полупроводниковым преобразователем, который формирует систему трехфазных токов и напряжений для управления генератором в двигательном режиме.

1. Расчет электромагнитного момента трехкаскадного синхронного генератора

В общем случае электромагнитный момент будет формироваться согласно (1):

$$M_{эм} = \frac{p \cdot m \cdot E \cdot U}{\omega \cdot Xd} \cdot \sin(\theta) + \frac{p \cdot m \cdot U^2}{2\omega}\left(\cdot\frac{1}{Xd} - \frac{1}{Xq}\right)\sin(2\theta). \quad (1)$$

Из этого выражения видно, что момент синхронного двигателя содержит две составляющие. Первая обусловлена взаимодействием вращающегося магнитного поля статора с полем возбуждения ротора, а вторая представляет собой реактивный момент, обусловленный явнополюсным исполнением ротора [7], [8]. Угловая характеристика, согласно выражению (1), представлена на Рисунке 2.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

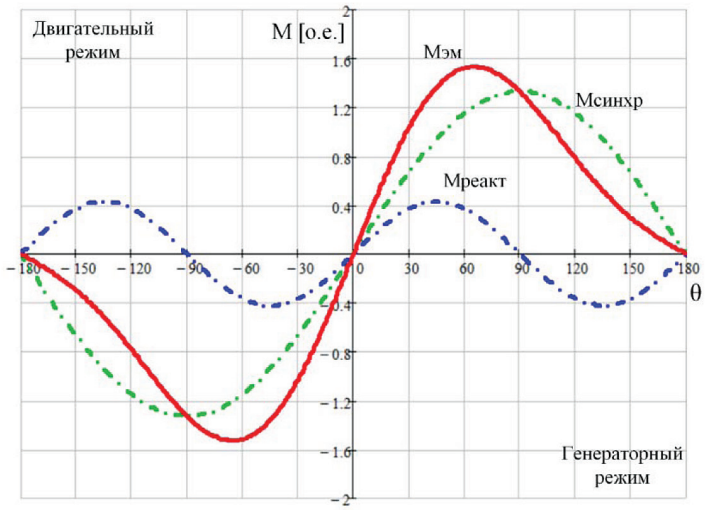


Рис. 2. Угловая характеристика явнополюсной синхронной машины
Fig. 2. Angular characteristic of a single-pole synchronous machine

Выражение (1) содержит напряжение и ЭДС машины. С точки зрения управления моментом синхронной машины с помощью инвертора напряжения, справедливо записать это выражение относительно амплитуды и фазы тока статора ТСГ. Активная мощность, потребляемая двигателем, определяется следующим выражением [9], [10]:

$$P_{эл}(I,U,\varphi) = m \cdot I \cdot U \cdot \cos(\varphi) \quad (2)$$

Исходя из условий максимального момента угловой характеристики явнополюсного генератора (Рис. 1), максимальный момент в двигательном режиме будет находится в диапазоне изменения угла нагрузки θ – от – 80 до – 45 градусов. В соответствии с этим условием, построим векторную диаграмму синхронной машины (Рис. 3).

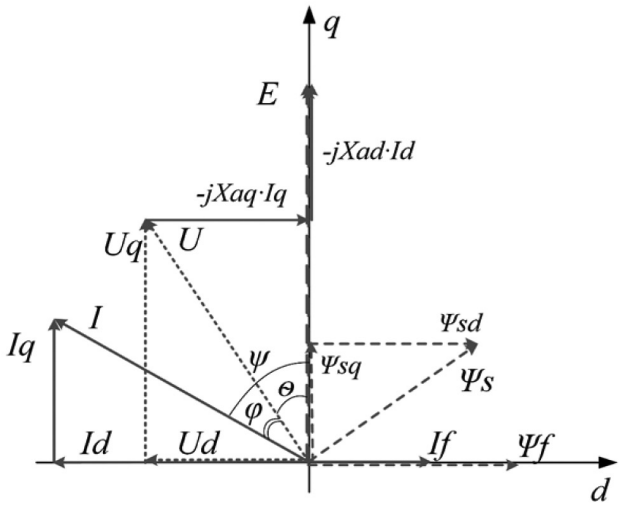


Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений и токов явнополюсной синхронной машины
Fig. 3. Vector diagram of voltages and currents of a single-pole synchronous machine

Исходя из векторной диаграммы синхронной машины (Рис. 3), выражение (2) можно представить в следующей форме:

$$P_{эл}(I,U,\varphi) = m \cdot I \cdot U \cdot \cos(\psi - \theta) \quad (3)$$

В соответствии с векторной диаграммой

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

$$\sin\theta = \frac{I \cdot x_q}{U} \cdot \cos\psi \quad \text{и} \quad \cos\theta = \frac{E - I \cdot x_d}{U} \cdot \sin\psi ;$$

следовательно, выражение (14) примет вид:

$$P_{эл}(I,U,\psi) = m \cdot I \cdot U \cdot \cos\psi \cdot \frac{E - I \cdot x_d}{U} \cdot \sin\psi + m \cdot I \cdot U \cdot \sin\psi \cdot \frac{I \cdot x_q}{U} \cdot \cos\psi ; \quad (4)$$

$$P_{эл}(I,U,\psi) = m \cdot I \cdot E \cdot \cos\psi - m \cdot I^2 \cdot E \cdot x_d \cdot \cos\psi \cdot \sin\psi + m \cdot I^2 \cdot x_q \cdot \sin\psi \cdot \cos\psi ; \quad (5)$$

$$P_{эл}(I,\psi) = m \cdot I \cdot E \cdot \cos\psi + m \cdot I^2 \cdot \sin\psi \cdot \cos\psi \cdot (x_q - x_d) ; \quad (6)$$

При $\sin(2\psi) = 2\cos\psi \sin\psi$, выражение (6), можно представить как:

$$P_{эл}(I,\psi) = m \cdot I \cdot E \cdot \cos\psi + m \cdot I^2 \cdot \sin(2\psi) \frac{(x_q - x_d)}{2} ; \quad (7)$$

Из выражения (7) получим значение момента:

$$M_{эл}(I,\psi) = \frac{p \cdot m}{\omega} \left[I \cdot E \cdot \cos\psi + I^2 \cdot \sin(2\psi) \frac{(x_q - x_d)}{2} \right]; \quad (8)$$

Электромагнитный момент двигателя, используемого в качестве электростартерного устройства, равен механической нагрузке с учетом КПД электродвигателя, в соответствии с этим, искомый момент примет вид:

$$M_{эм}(I,\psi) = \frac{p \cdot m}{\omega \cdot \eta} \left[I \cdot E \cdot \cos\psi + I^2 \cdot \sin(2\psi) \frac{(x_q - x_d)}{2} \right]; \quad (9)$$

2. Математическое моделирование системы запуска на основе трехкаскадного синхронного генератора

По полученному выражению (9) видно, что синхронная составляющая момента зависит от амплитуды и фазы тока статора, а также от ЭДС синхронной машины. Действующее значение ЭДС явнополюсной синхронной машины определяется следующим выражением:

$$E_0 = 4{,}44 \cdot f \cdot \Phi_f \cdot k_{об} \cdot w_f ; \quad (10)$$

где Φ_f – магнитный поток обмотки возбуждения основного каскада, $k_{об}$ – обмоточный коэффициент, w_f – количество витков. Магнитный поток можно выразить через потокосцепление:

$$\Phi_f = \frac{\Psi_f}{w_f \cdot k_{об}} ; \quad (11)$$

В свою очередь, потокосцепление магнитного потока с обмоткой якоря:

$$\Psi_f = M_{fd} \cdot I_f ; \quad (12)$$

где M_{fd} – взаимная индуктивность обмотки возбуждения с фазой обмотки статора. Величина M_{fd} определяется из характеристики холостого хода, как функ-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ция от ЭДС машины. Учитывая нелинейность ЭДС, взаимоиндукция также является криволинейной функцией. Рисунок 3 отображает экспериментально полученную характеристику холостого хода трехкаскадного синхронного генератора, соответствующую скорости 6000 об/мин. Взаимоиндукцию M_{fd} определим из характеристики ХХ в соответствии со следующим выражением:

$$M_{fd} = \frac{\sqrt{2}E_0}{\omega \cdot I_f} \quad . \tag{13}$$

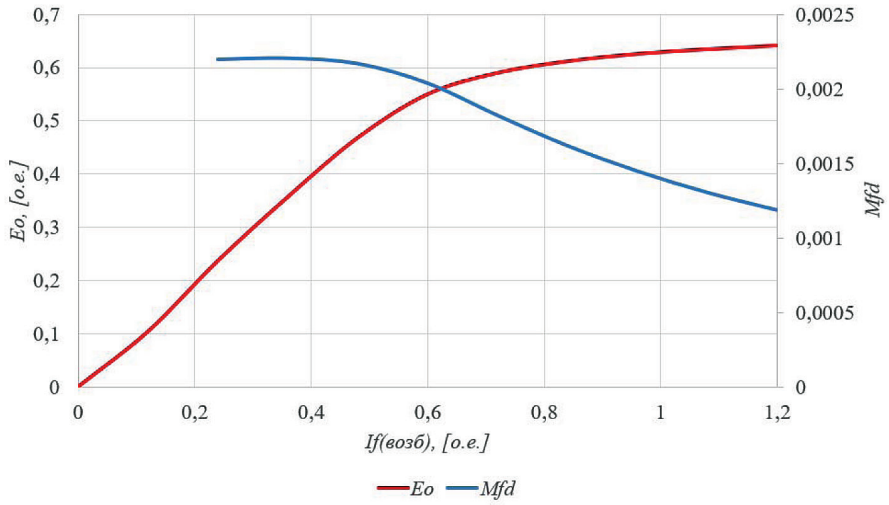


Рис. 4. Характеристика холостого хода синхронного генератора
Fig. 4. Idling characteristic of the synchronous generator

На Рисунке 4 представлена зависимость ЭДС синхронной машины от скорости вала. Функция изменения $E_0(n)$ получена двумя способами: в первом случае на основе уравнения (10), принимая тот факт что в трехкаскадном синхронном генераторе ток возбуждения основного генератора также зависит от скорости, и принимая допущение, что до скорости в 0,55 от номинальной можно пренебречь насыщением, мы получим квадратичную зависимость – $E_0(approx)$. Вторая зависимость $E_0(exp)$ на основании семейства характеристик холостого хода, при номинальном постоянном токе возбуждения.

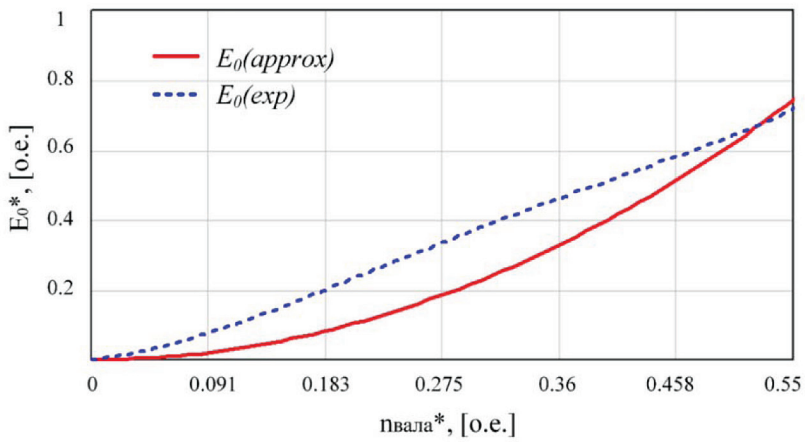


Рис. 5. Зависимость ЭДС ТСГ от скорости вращения вала
Fig. 5. Dependence of EMF TSG on the speed of rotation of the shaft

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Выражение (9) с учетом выражений (10), (11) и (12) принимает вид:

$$M_{эм}(I,\psi)=\frac{p\cdot m}{\eta}\left[I_{cm}\cdot M_{fd}\cdot I_f\cos\psi+I_{cm}{}^2\cdot\sin(2\psi)\frac{(L_q-L_d)}{2}\right]. \quad (14)$$

Таким образом, получено выражение для момента трехкаскадного синхронного генератора, зависящее от параметров, регулируемых инвертором напряжения – амплитуда и фаза тока относительно ЭДС машины, а также ток возбуждения основного генератора, который регулируется с помощью внешнего блока регулирования, защит и управления (БРЗУ). При синхронизации системы управления с вектором ЭДС машины, удобно регулировать угол ψ с помощью регулирования составляющих токов статора во вращающейся системе координат – dqdq [20], [21], [22].

Согласно полученным выражениям и зависимостям, пусковой момент при нулевой скорости будет изменяться согласно реактивной составляющей момента (Рис. 6).

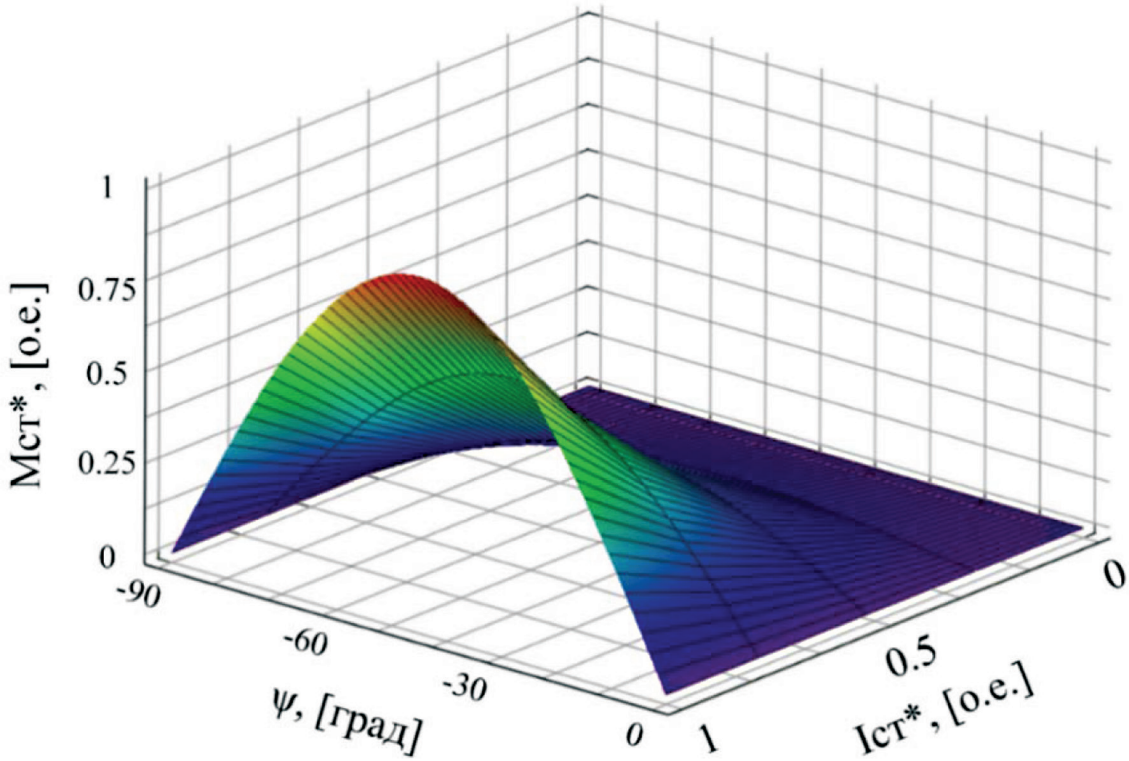


Рис. 6. Зависимость пускового момента ТСГ от значения тока статора
Fig. 6. Dependence of the starting torque TSG on the value of the stator current

После приведения вала ТСГ во вращение, появляется ЭДС на обмотке якоря возбудителя, которая в свою очередь создает ток возбуждения основного генератора. По выражению (14), принимая допущение, что зависимость тока возбуждения от скорости линейна, можно получить график изменения максимально возможного электромагнитного момента исследуемого генератора – Рисунок 7. Также при построении графика были приняты во внимание следующие условия ограничений: ток статора ограничен максимально допустимым значением, соответствующим длительному режиму работы, напряжение питания инвертора ограничено выпрямленной трехфазной сетью переменного тока бортовой сети летательного аппарата.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

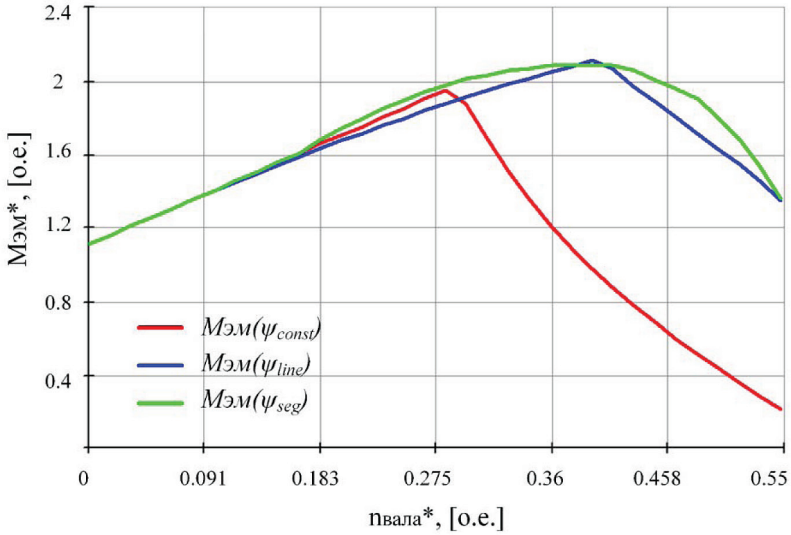


Рис. 7. Зависимость максимального электромагнитного момента от скорости вращения вала
Fig. 7. Dependence of the maximum electromagnetic torque on the speed of rotation of the shaft

Представленная на Рисунке 7 зависимость электромагнитного момента, при постоянном угле – ψ_{const}, показывает резкое уменьшение момента после точки перегиба, обусловленной достижением максимального коэффициента модуляции инвертора. По мере увеличения скорости вращения вала, постоянно присутствующая реактивная составляющая в токе статора, перестает быть основной составляющей момента, так как синхронная составляющая имеет квадратичную зависимость, в соответствии с выражением (14). При линейном изменении угла ψ_{line}, на протяжении всего этапа разгона ТСГ, момент остается больше максимального момента нагрузки на всем этапе запуска. Принимая в качестве критерия оптимального управления максимальный электромагнитный момент ТСГ, можно выделить зоны оптимального угла ψ_{seg}. На Рисунке 8 представлен график изменения угла ψ от скорости, где ψ_{const} – постоянный угол управления, равный – 45°, ψ_{line} – линейно изменяющийся угол в диапазоне от – 45° до 0°, ψ_{seg} – оптимальный угол управления.

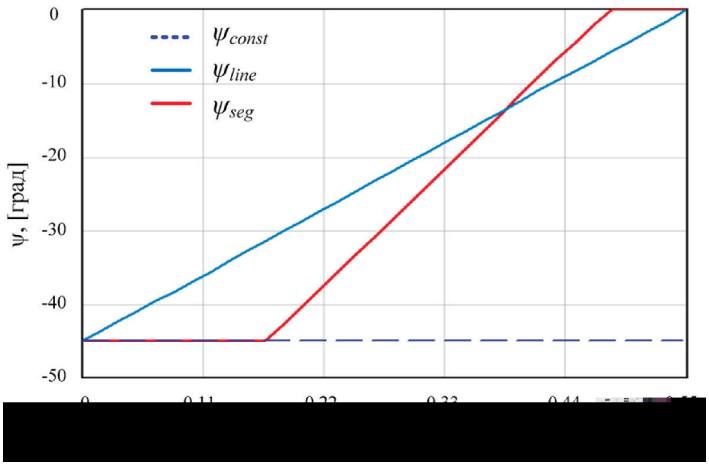


Рис. 8. Зависимость изменения угла управления от скорости
Fig. 8. The dependence of the change in the control angle on the speed

Угол нагрузки – θ, который непосредственно будет зависеть от скорости вращения вала и от угла управления, определяется выражением (15):

$$\theta(n,\psi) = \arctan\frac{U_d(n,\psi)}{U_q(n,\psi)} \; ; \qquad (15)$$

Напряжение статора по продольной оси, согласно векторной диаграмме (Рис. 2) определяется выражением:

$$U_d(n,\psi) \equiv I_a(\psi)\cdot x_a(n) \; ; \qquad (16)$$

Напряжение статора по поперечной оси:

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

3. Испытания макета преобразователя системы запуска и ТСГ с реактивным пуском на нагрузку

Целью испытаний является проверка реализации моментной характеристики, необходимой для запуска системы, представленной на Рисунке 10. Испытания проводились путем проверки статических точек из нагрузочной характеристики. Схема испытательного стенда представлена на Рисунке 11.

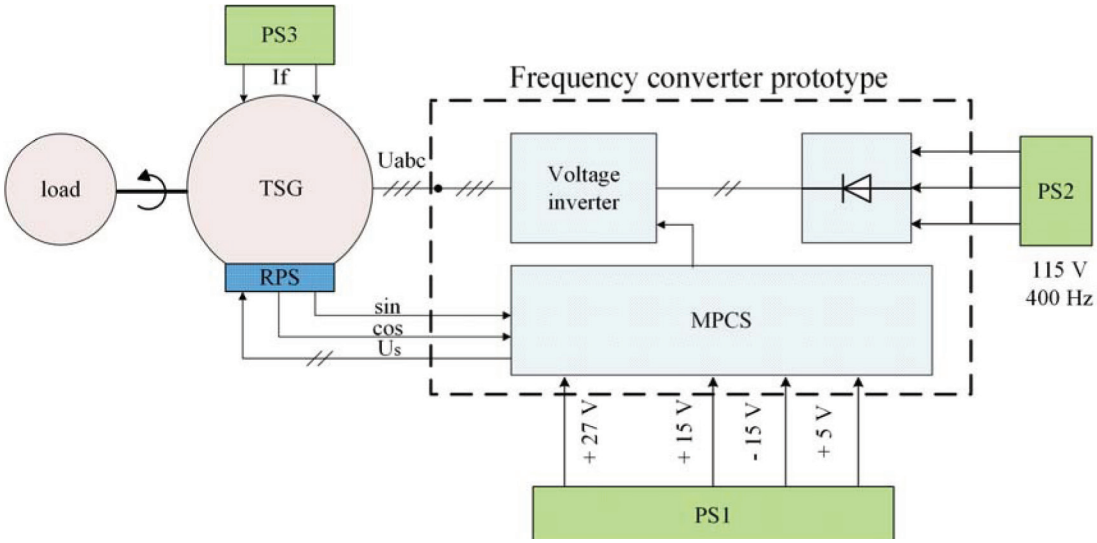


Рис. 11. Блок-схема испытательного стенда системы запуска под нагрузкой
Fig. 11. Block diagram of the test bench of the startup system under load

Момент на валу стартер-генератора измерялся с помощью балансирной машины. Вал стартер-генератора жестко связывался с валом балансирной машиной через переходной валик, обеспечивая механическую связь. Для регулирования величины момента сопротивления, на валу стартер-генератора изменялась величина тока возбуждения балансирной машины. Сопротивление нагрузки балансирной машины во время испытаний не регулировалось. Частота вращения стартер-генератора измерялась с помощью тахометра, установленного на балансирной машине.

Испытания были проведены со статической нагрузкой на определенной скорости вращения вала, при разном токе возбуждения. Значение угла между обобщенным вектором тока и вектором противо-ЭДС при старте выставлялось равным – 45° с последующим линейным уменьшением этого значения до нуля.

На Рисунке 12 приведены зависимости момента сопротивления на валу из технического задания и полученные в результате испытаний, а также действующее значение фазного тока статора генератора при минимальной мощности, потребляемой от сети.

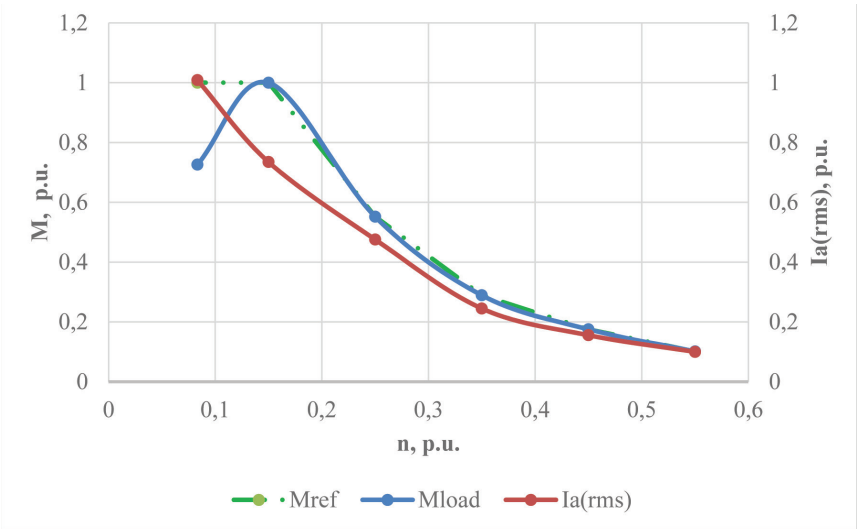


Рис. 12. Графики зависимостей момента сопротивления и тока статора от скорости
Fig. 12. Graphs of the dependence of the moment of resistance and stator current on speed

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

По результатам физических экспериментов, был проведен анализ полученных выражений для электромагнитного момента с учетом реальной характеристики изменения нагрузки. Таблица 1 содержит результаты сравнения полученных данных, из которых можно сделать вывод, что относительная погрешность – δ, на начальном этапе находится в диапазоне от 1,75 до 2,8 процентов, однако при снижении значений момента погрешность увеличивается до 9,33 процентов.

Таблица 1

Сравнение аналитических и экспериментальных результатов

Table 1

Comparison of analytical and experimental results

$n_{вала}$	**p.u.**	**0,083**	**0,150**	**0,250**	**0,350**	**0,450**	**0,550**
$M_{эм}$(эксперимент)	p.u.	0,726	1,000	0,552	0,289	0,175	0,101
$M_{эм}$(расчет)	p.u.	0,746	1,027	0,562	0,297	0,186	0,111
δ	%	2,78	2,74	1,75	2,80	6,10	9,33

Результаты сравнения полученного электромагнитного момента и расчетного момента представлены на Рисунке 13, также рисунок содержит заданный по техническому заданию момент сопротивления и скорость ротора, изменяющиеся относительно времени.

Рисунок 14 показывает, как будет изменяться электромагнитный момент ТСГ при заданном токе, пропорциональном моменту сопротивления, при изменении угла управления.

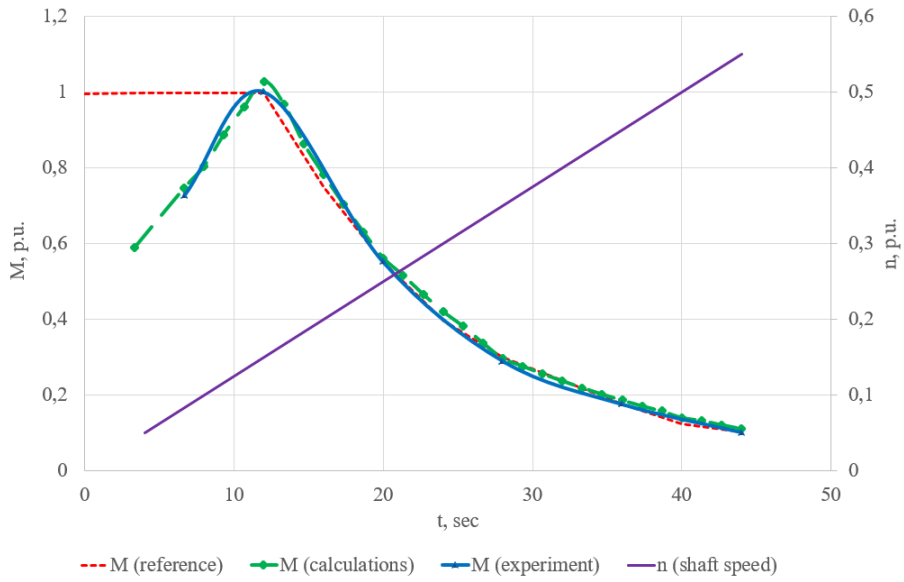


Рис. 13. Сравнение расчетного и экспериментального момента ТСГ
Fig. 13. Comparison of the calculated and experimental moment of TSG

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

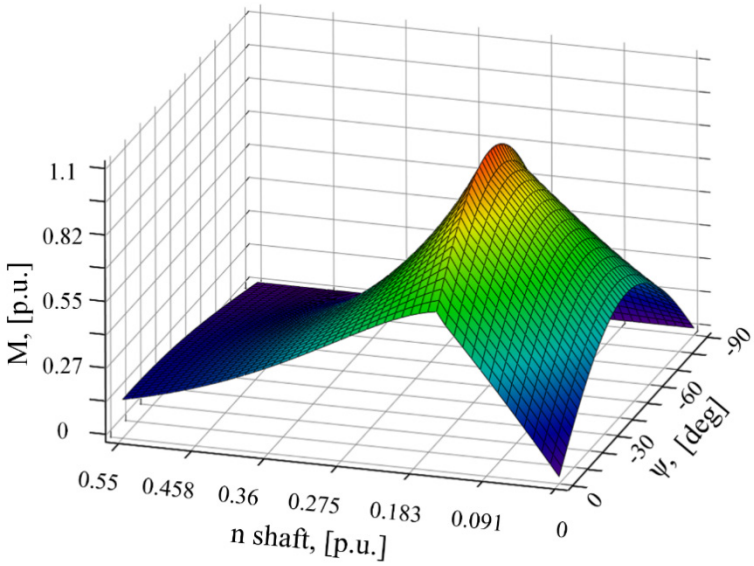


Рис. 14. Зависимость электромагнитного момента от угла управления
Fig. 14. Dependence of the electromagnetic moment on the control angle

4. Генерация электроэнергии на основе водородных топливных элементов для авиации

Резервуарные водородные системы являются наиболее активно развивающейся областью [23-30]. Известные технологии хранения водорода дополняются экзотическими [31-35]. В настоящее время в мире насчитывается 34811 пассажирских самолетов, не считая авиации общего назначения. Из них 5715 – региональные турбовинтовые самолеты, 4513 – региональные реактивные самолеты, 18126 – узкофюзеляжные и 6457 – широкофюзеляжные. Авиастроительный гигант Airbus планирует создать пассажирский самолет, работающий на водородном топливе, к 2035 году. Штутгартская компания H2Fly уже несколько лет разрабатывает водородные самолеты и хочет в скором времени превзойти лидера отрасли. В 2016 году компания из Штутгарта провела испытательный полет четырехместного самолета HY4. По данным Немецкого аэрокосмического центра (DLR), на тот момент это был самый большой самолет, работавший исключительно на водороде. Через два года такой самолет будет в десять раз больше. По словам генерального директора H2Fly Йозефа Калло, 40-местный самолет Dornier с дальностью полета 2000 км впервые будет летать исключительно на водороде, тем самым заложив основу для коммерческого применения. Необходимые для этого системы топливных элементов в настоящее время собираются в единую конструкцию. Затем система должна быть подключена на месте к резервуару с жидким водородом до конца этого года. «В 2024 году все это будет установлено на борту самолета, а также испытано на земле», – говорит Калло. «Впервые он должен полететь в 2025 году». В настоящее время мощность HY4 составляет от 120 до 150 киловатт. Следующий шаг – переход на один мегаватт. С помощью современных технологий вы можете получить около 4 мегаватт электроэнергии, чего достаточно для самолета на 60-80 мест. Чтобы ускорить развитие этих процессов, в настоящее время в аэропорту Штутгарта под эгидой H2Fly строится центр для полетов на водородно-электрическом топливе. Различные стартапы и известные производители намерены в ближайшие пять лет создать коммерческие 19-местные бизнес-джеты. В течение следующих десяти лет появится возможность выпускать региональные самолеты вместимостью до 70 мест. Производитель двигателей MTU Aero, например, планирует выпускать двигатели на топливных элементах для самолетов, способных перевозить от 50 до 100 пассажиров на расстояние более 1800 км. Этого достаточно примерно для трех четвертей всех европейских маршрутов. Airbus хочет вывести на рынок пассажирский самолет на водородном топливе к 2035 году. Вместимость такого самолета, рассчитанного на 100-200 посадочных мест, может быть примерно такой же, как у современных среднемагистральных самолетов семейства A320neo. Однако недавно компания заявила, что реализация этих планов зависит от развития необходимой инфраструктуры. На первых порах в мире будет всего несколько самолетов на водородных двигателях, и работа может быть сосредоточена на нескольких маршрутах. В первое время заправочная инфраструктура потребуется только в нескольких аэропортах, а затем ее можно будет расширить. Водород можно использовать не только в качестве энергоносителя для топливных элементов. С целью реструктуризации воздушного транспорта, не содержащего CO2, можно объединить «зеленый» во-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

дород с углекислым газом, выделяемым из атмосферы, и таким образом получить искусственный керосин. Это топливо можно было бы практически сразу использовать в современных самолетах. Однако для его производства требуется много энергии. Согласно современным исследованиям, общая потребность в энергии для полета и производства жидкого водородного топлива ниже на коротких и средних расстояниях. Синтетический керосин, напротив, имеет преимущество при полетах на большие расстояния. Однако многое еще находится в стадии разработки, поэтому только в ближайшие несколько лет станет ясно, какой энергоноситель будет доминировать.

Заключение

Представленный электромагнитный анализ момента трехкаскадного синхронного генератора позволяет сделать вывод о том, что с помощью регулирования реактивной составляющей можно реализовать электростартерный пуск авиационного двигателя. С помощью метода реактивного пуска синхронного двигателя решается основная проблема пуска ТСГ в отсутствие возбуждения на околонулевых скоростях. Аналитические расчеты показывают, что разработанная система электростартера обеспечивает максимально необходимый пусковой момент при требуемой интенсивности набора скорости авиационного газотурбинного двигателя. При проведении расчетов было учтено ограничение тока обмотки статора основного генератора ТСГ, на уровне максимально допустимого уровня нагрузочной способности. Данное решение устраняет необходимость в дополнительном пусковом устройстве и объединяет функции генерирования электроэнергии и запуска газотурбинного двигателя в одном устройстве, что соответствует концепции «более электрического самолета». По результатам теоретических исследований был спроектирован и изготовлен макетный образец преобразователя частоты, а также методики его испытаний. Проведен ряд натурных экспериментов, подтверждающих возможность реализации электростартерной системы на основе трёхкаскадного синхронного генератора с помощью создания реактивной составляющей электромагнитного момента.

References

[1]. A. Eid, H. El-Kishky, M. Abdel-Salam and M. T. El-Mohandes, «On Power Quality of Variable-Speed Constant-Frequency Aircraft Electric Power Systems,» in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 1, pp. 55-65, Jan. 2010.

[2]. V. Madonna, P. Giangrande and M. Galea, «Electrical Power Generation in Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities» in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 4, no. 3, pp. 646-659, Sept. 2018.

[3]. J. Pötter, M. Pfost and G. Schullerus. «A Novel Brushless Excitation System for Synchronous Machines with a Rotating Power Converter». 2019 IEEE 13th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Sonderborg, Denmark, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/CPE.2019.8862391.

[4]. J. Kang, Y. Liu and L. Sun. «A Primary-Side Control Method of Wireless Power Transfer for Motor Electric Excitation». 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Xi'an, China, 2019, pp. 2423-2428, doi: 10.1109/ICIEA.2019.8834016.

[5]. Y. Juan, X. Haiyi and Y. Zhangang. «An Active Control Excitation Method of Three-Stage Brushless Synchronous Starter/Generator in Electric Starting Mode for MEA», in IEEE Access, vol. 9, pp. 109763-109774, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3102049.

[6]. J. Chen, C. Wang and J. Chen, «Investigation on the Selection of Electric Power System Architecture for Future More Electric Aircraft», in IEEE Transactions on Transportation Electrification. – Vol. 4, no. 2, pp. 563-576, June 2018.

[7]. J. He, D. Zhang and D. Torrey. «Recent Advances of Power Electronics Applications in More Electric Aircrafts». – 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), 2018, pp. 1-8.

[8]. M. A. Zharkov and V. E. Sidorov. «Electric Starter System for Launching a Gas Turbine Aircraft Engine». 2019 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – 2019, pp. 700-704.

[9]. M. A. Zharkov, S. A. Kharitonov, V. E. Sidorov and R. Y. Dubkova. «The Analysis of the Reactive Launch of Three-stage Synchronous Generator for Aviation Starter-Generator Device». – 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), 2019, pp. 1-5.

[10]. J. Pötter, M. Pfost and G. Schullerus. «Design Aspects of a Novel Brushless Excitation System for Synchronous Machines». 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), San Diego, CA, USA, 2019, pp. 1228-1233, doi: 10.1109/IEMDC.2019.8785200.

[11]. S. Mao, X. Han, J. Li, Q. Zhang, Z. Hu and L. Xu. «Initial Rotor Position Estimation of Brushless Synchronous Starter/Generators Based on the Excitation System». IECON 2021 – 47th Annual

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Toronto, ON, Canada. – 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/IECON48115.2021.9590000.

[12]. Z. Zhang et al. «Research on excitation control method for the three-phase brushless asynchronous excitation system of wound-field synchronous starter/generators». 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, USA, 2017, pp. 2074-2078, doi: 10.1109/ECCE.2017.8096413.

[13]. F. Yao, Q. An, X. Gao, L. Sun and T. A. Lipo. «Principle of Operation and Performance of a Synchronous Machine Employing a New Harmonic Excitation Scheme» in IEEE Transactions on Industry Applications. – Vol. 51, no. 5, pp. 3890-3898, Sept.-Oct. 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2425363.

[14]. M. D. López, C. A. Platero, E. Rebollo and F. R. Blanquez. «Simplified model of brushless synchronous generator for real time simulation». 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). – Rome, Italy, 2015, pp. 71-76, doi: 10.1109/EEEIC.2015.7165382.

[15]. J. Wei, Y. Yang, B. Zhou and J. Xue. «The integrated method of AC excitation and high-frequency signal injection for the sensorless starting control of brushless synchronous machines». IECON 2017 – 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing, China. – 2017, pp. 4188-4193, doi: 10.1109/IECON.2017.8216718.

[16]. Волокитина Е. В. Исследования по созданию системы генерирования и запуска маршевого двигателя в концепции полностью электрифицированного самолета. Часть 1 / Е. В. Волокитина // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2011. – № 4. – С. 24-28.

[17]. Вольдек А. И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: Изд-во «Энергия», 1974.

[18]. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: Учеб. для вузов. 1. – М.: Энергия, 1980.

[19]. Балагуров В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. – М.: Высшая школа, 1990. – 272 с.

[20]. Firago B. I. Theory of electric drive. Minsk: JSC «Technoperspektiva», 2004. – P. 527.

[21]. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

[22]. Слежановский О. В. и др. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

[23]. Gusev A. L., Kazaryan M. A. Hydrogen Storage. Bayer Material Science (BMS) & The International Science and Technology Center (ISTC). Research Conference, Moscow, Russia, 2007; 40-41.

[24]. Gusev A. L., Malozemova E. P., Veziroglu T. N., Hampton M. D. LH2 ultra-long storage technology. Collection of abstracts of the IX International Student Scientific Conference «Polar Lights – 2006. Nuclear Future: Security, Economics and Law». – St. Petersburg, 2006; pp. 182-184.

[25]. Gusev A. L. Electrosorption phenomena in layers of shield-vacuum heat insulation of hydrogen reservoirs // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 4. 2007.

[26]. Gusev A. L., Kazaryan M. A. Hydrogen Storage. International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 4. 2007.

[27]. A. L. Gusev, M. A. Kazaryan. Hydrogen Storage. Bayer Matarial Science (BMS) & The International Science and Technology Center (ISTC). Research Conference, Moscow, Russia, 23-24 January 2007. 40-41.

[28]. Gusev A. L. Main environmental problems of the Nizhny Novgorod region and the transition to a hydrogen economy // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. – 2006. – No. 1. – P. 13-24.

[29]. Gusev A. L. Hydrogen for Progress. The Second International Conference Alternative sources of energy for big cities. – 2006. – P. 22.

[30]. Frederic A. Lewis. Hydrogen Economy Forum in Russia. Second International Symposium on Safety and Economy of Hydrogen Transport // Platinum Metals Reviev, 2003, 47, (4).

[31]. Yu. S. Nechaev, G. A. Filippov, A. L. Gusev. On the experimental and theoretical basis of developing a super hydrogen carbonaceous adsorbent for fuel-cell-powered vehicles // In: Book of Abstracts of &th Biennial International Workshop «Fullerenes and Atomic Clusters» (IWAFAC'2005), June 27 – July 1, 2005. – St. Peterburg, Russia, (2005) 267.

[32]. Yu. S. Nechaev, A. L. Gusev, B. K. Gupta, O. N. Srivastava, T. N. Veziroglu. On the experimental and theoretical basis developing a «super» hydrogen adsorbent // In: Transactions of International conference «Solid State Hydrogen Storage – Materials and Applications». – January 31 – February 1, 2005, Hyderabad, India (2005).

[33]. Yu. S. Nechaev, G. A. Filippov, A. L. Gusev. On the experimental and theoretical basis of developing a super hydrogen carbonaceous adsorbent for fuel-cell-powered vehicles // In: Book of Abstracts of &th Biennial International Workshop «Fullerenes and Atomic Clusters» (IWAFAC'2005), June 27 – July 1, 2005. – St. Peterburg, Russia, (2005) 267.

[34]. Yu. S. Nechaev, A. L. Gusev, B. K. Gupta, O. N. Srivastava, T. N. Veziroglu. On the experimental and theoretical basis developing a «super» hydrogen adsorbent // In: Transactions of International conference «Solid State Hydrogen Storage – Materials and Applications». – January 31 – February 1, 2005, Hyderabad, India (2005).

[35]. Yu. S. Nechaev, A. L. Gusev, B. K. Gupta, O. N. Srivastava, T. N. Veziroglu. On using graphite nanofibers for hydrogen on-board storage. // In: Transactions of International conference «Solid State Hydrogen Storage – Materials and Applications». – January 31 – February 1, 2005, Hyderabad, India (2005).

Транслитерация по BSI

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Статья поступила в редакцию 05.02.24 Ред. Рег. № 311-002-24 The article has entered in publishing office 05.02.24 Ed. Reg. No. 311-002-24

УДК 621.352

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В НЕПОСРЕДСТВЕННОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ЧАСТОТЫ С ЕСТЕСТВЕННОЙ КОММУТАЦИЕЙ В СОСТАВЕ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРНОЙ СИСТЕМЫ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Сараханова Р. Ю., Харитонов С. А., Жарков М. А., Удовиченко А. В.

Новосибирск, Россия, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ)
sarakhanova_nstu@mail.ru, kharit1@yandex.ru, maks.zharkoff@yandex.ru, uavsib@yandex.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.198-212

Заключение совета рецензентов: 14.02.24 Заключение совета экспертов: 19.02.24 Принято к публикации: 27.02.24

В статье представлена стартер-генераторная система летательного аппарата на базе непосредственного преобразователя частоты с естественной коммутацией. Особенностью системы является применение непосредственного преобразователя частоты с естественной коммутацией в качестве основного преобразователя электрической энергии в составе стартер-генераторной системы. При этом непосредственный преобразователь частоты с естественной коммутацией позволяет стартер-генераторной системе работать как в режиме генерирования электрической энергии, так и в режиме электростартерного запуска вспомогательной силовой установки или маршевого двигателя с помощь синхронного генератора.

Предложен алгоритм анализа электромагнитных процессов в непосредственном преобразователе частоты с естественной коммутацией в составе стартер-генераторной системы и детально рассмотрен в качестве примера для однофазного по выходу преобразователя. Спектральным методом расчета определены переключающие функции вентилей преобразователя, найдено выражение для тока нагрузки и определен его спектральный состав.

В статье представлен результат компьютерного моделирования исследуемой системы, позволяющий подтвердить справедливость предложенного метода анализа электромагнитных процессов системы.

Ключевые слова: стартер-генераторная система, непосредственный преобразователь частоты, синхронный генератор, противо-ЭДС, система электроснабжения, электромагнитные процессы.

Сараханова Р. Ю., Харитонов С. А., Жарков М. А., Удовиченко А. В. Электромагнитные процессы в непосредственном преобразователе частоты с естественной коммутацией в составе стартер-генераторной системы летательного аппарата // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 02 (419) 2024, с. 198-212

Sarakhanova R. Yu., Kharitonov S. A., Zharkov M. A., Udovichenko A.V. Electromagnetic processes in a direct frequency converter with natural switching as part of the starter-generator system of an aircraft // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 02 (419) 2024, pp. 198-212

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE CYCLOCONVERTER WITH NATURAL COMMUTATION AS PART OF A STARTER-GENERATOR SYSTEM OF AN AIRCRAFT

Sarakhanova R. Yu., Kharitonov S. A., Zharkov M. A., Udovichenko A. V.

Novosibirsk State Technical University 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20
sarakhanova_nstu@mail.ru, kharit1@yandex.ru, maks.zharkoff@yandex.ru, uavsib@yandex.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.02.198-212

Referred: 14.02.24 Received in revised form: 19.02.24 Accepted: 27.02.24

The article presents the starter-generator system of an aircraft based on the cycloconverter with natural commutation. A feature of the system is the use of the cycloconverter with natural commutation as the main converter of electrical energy as part of the starter-generator system. At the same time, the cycloconverter allows the starter-generator system to operate both in the mode of generating electric energy and in the mode of electric starter start of an auxiliary power plant or main engine with the help of a synchronous generator.

An algorithm for analyzing electromagnetic processes in the cycloconverter with natural commutation as part of a starter-generator system is proposed and considered in detail as an example for a single-phase converter output. The switching functions of the converter valves are determined by the spectral calculation method, an expression for the load current is found and its spectral composition is determined.

The article presents the result of computer modeling of the system under study, which allows us to confirm the validity of the proposed method of analyzing the electromagnetic processes of the system.

Keywords: starter-generator system, cycloconverter, synchronous generator, counter-EMF, power supply system, electromagnetic processes.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Жарков
Максим Андреевич
Zharkov
Maksim Andreevich

Сведения об авторе: кандидат техн. наук, доцент кафедры Электроники и Электротехники, заместитель директора Института силовой электроники НГТУ.

Область научных интересов: силовая электроника, авиационные системы генерирования, электропривод.

Опубликовано: более 50 научных работ.

Inormation about the author: candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of EE, Deputy Director of the Institute of Power Electronics of NSTU.

Research interests: power electronics, aviation generation systems, electric drive.

More than 50 scientific papers have been published.

Сараханова
Регина Юрьевна

Sarakhanova
Regina Yurievna

Сведения об авторе: младший научный сотрудник, Институт Силовой Электроники, НГТУ.

Область научных интересов: силовая электроника, авиационные системы генерирования, непосредственные преобразователи частоты.

Опубликовано: 10 научныхработ.

Inormation about the author: engineer, Institute of power electronics, NSTU.

Her research interests are currently focused on power electronics, aircraft generating systems, direct frequency converters.

She is author of 10 scientific papers.

Харитонов
Сергей Александрович

Kharitonov
Sergey Aleksandrovich

Сведения об авторе: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Электроники и Электротехники, директор Института силовой электроники Новосибирского государственного технического университета.

Область научных интересов: силовая электроника, авиационные системы генерирования, непосредственные преобразователи частоты, системы накопления электрической энергии.

Опубликовано: более 300 научных работ.

Inormation about the author: Doctor of Science, Professor, Head Department of Electronics and Electrical Engineering, Director of Institute of Power Electronics, Novosibirsk State Technical University.

His research interests are currently focused on power electronics, aircraft generating systems, direct frequency converters.

He is author of 300 scientific papers.

Удовиченко
Алексей Вячеславович

Alexey V. Udovichenko

Сведения об авторе: к.т.н., доцент, доцент кафедры «Электроники и электротехники» Новосибирского государственного технического университета.

Область научных интересов: энергоэффективные регуляторы переменного напряжения, плавный пуск двигателей, силовая электроника.

Опубликовано: более 90 научных статей и докладов на конференциях, 6 учебных и методических пособий, 12 изобретений.

Inormation about the author: Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electronics and Electrical Engineering of Novosibirsk State Technical University.

Research interests: energy-efficient AC voltage regulators, smooth start of engines, power electronics.

More than 90 scientific articles and conference reports, 6 educational and methodological manuals, 12 inventions have been published.

Таблица сокращений и обозначений

СГС	Стартер-генераторная система
ЛА	Летательный аппарат
НПЧ с ЕК	Непосредственный преобразователь частоты с естественной коммутацией
ИН	Инвертор напряжения
ПД	Первичный двигатель
АБ	Аккумуляторная батарея
СГ	Синхронный генератор
$U_{АБ}$	Напряжения аккумуляторной батареи
U_d	Входное напряжение инвертора напряжения

AC load	Нагрузка переменного тока
DC load	Нагрузка постоянного тока
I_{load} dc	Ток нагрузки в сети постоянного тока
L_{SG}	Индуктивность синхронного генератора
L_f	Индуктивность фильтра
ШИМ	Широтно-импульсная модуляция
ЭДС	Электродвижущая сила
$U_{in\min}$	Минимальное напряжение питания
U_{in}	Напряжение питания

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Введение

При построении стартер-генераторных систем (СГС) для летательных аппаратов (ЛА) важным является совмещение функций режима стартерного запуска газотурбинных двигателей и режима генерирования электрической энергии в одном агрегате. Совмещенная СГС позволяет повысить надежность, а также улучшить массогабаритные показатели авиационных систем за счет отказа от большого числа быстро изнашиваемых частей оборудования летательных аппаратов [1-2]. Эта тенденция особенно отчетливо стала проявляться в связи с реализацией концепции «полностью [более] электрического самолета», что привело к значительному увеличению мощности и функциональных возможностей генераторов и устройств преобразования параметров электрической энергии как основных, так и дополнительных каналов генерирования [3-4, 27]. В основе концепции «полностью (более) электрического самолета» лежат новые источники питания и источники электродвижения, такие как литий-ионные аккумуляторы, водородные элементы питания, источники на основе возобновляемой энергетики [44, 45].

Кроме этого, совмещенная СГС дает возможность совместить функции генерирования электрической энергии переменного и постоянного тока, а также осуществлять перетоки электрической энергии между этими системами генерирования [5-7]. В этом случае открывается возможность стартерного запуска первичного двигателя (например, газотурбинного), как от сети переменного, так и постоянного тока. Такой уровень интеграции систем генерирования и электростартерного запуска позволяет наделить систему электроснабжения функциями адаптивных систем, появляются свойства так называемых «умных» электрических сетей («smart grid») [5, 8, 9]. Адаптивный характер системы электроснабжения существенно повышает живучесть летательного аппарата [10].

В настоящее время для расширения функциональных возможностей СГС для ЛА повышается интерес к использованию в качестве преобразователя электрической энергии непосредственного преобразователя частоты с естественной коммутацией (НПЧ с ЕК), работающего в параллель с инвертором напряжения (ИН) [11-20]. Предлагаемое решение в режиме генерирования работает следующим образом. НПЧ с ЕК формирует трехфазный ток, величина основной гармоники которого определяется нагрузкой; параллельный двунаправленный ИН создает в нагрузке трехфазное переменное синусоидальное напряжение необходимой величины, а также выполняет функцию активного фильтра, формируя ток, компенсирующий высокочастотные составляющие в токе НПЧ с ЕК.

При этом, учитывая известные свойства инвертора напряжения, такая СГС обладает рядом достоинств и может выполнять следующие дополнительные функции [21-25]:

– режим электростартерного запуска первичного двигателя [ПД], как от сети переменного тока, так и от сети постоянного тока;

– передача энергии от сети постоянного тока (например, 27 В) в сеть переменного тока постоянной или переменной частоты, как в режиме генерирования, так и в режиме электростартерного запуска ПД;

– заряд аккумуляторной батареи (АБ) при генерировании переменного тока и генерирование постоянного тока в случае выхода из строя АБ;

– обеспечение более равномерного потребления электрической энергии от АБ путем частичного её отбора от сети переменного тока;

– реализация активного фильтра в цепи переменного тока повышает качество генерируемой электроэнергии при работе на несимметричную, выпрямительную и импульсную стохастическую нагрузку [28-36];

– генерирование переменного напряжения в случае выхода из строя синхронного генератора переменного тока.

В настоящей работе представлена математическая модель НПЧ с ЕК, работающего параллельно с двунаправленным ИН, входящих в состав СГС. Предложена методика анализа НПЧ с ЕК при параллельной работе с ИН на общую нагрузку. Предлагаемая математическая модель подтверждена имитационным моделированием.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Стартер-генераторная система на базе непосредственного преобразователя частоты с естественной коммутацией

Структурная схема СГС приведена на Рис. 1

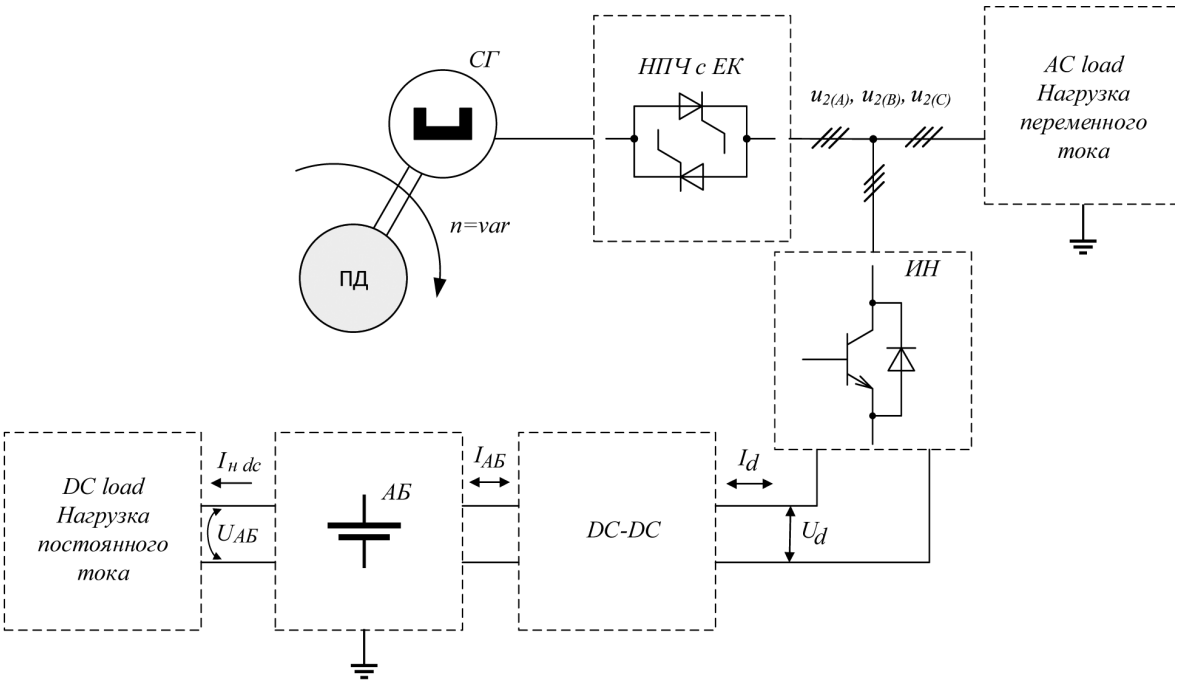


Рис. 1. Структурная схема стартер-генераторной системы на базе непосредственного преобразователя частоты с естественной коммутацией

Fig. 1. Block diagram of a starter-generator system based on the cycloconverter with natural commutation

СГС включает синхронный генератор (СГ) с возбуждением от постоянных магнитов, подключенный к валу двигателя (ПД), НПЧ с ЕК, двунаправленный инвертор напряжения, двунаправленный DC-DC преобразователь, АБ, нагрузку постоянного и переменного тока.

Существует два основных режима функционирования системы: 1) режим электростартерного запуска ПД с помощью СГ, выполняющего функцию двигателя; 2) режим генерирования электрической энергии посредством СГ с отбором мощности от вала ПД.

В режиме электростартерного запуска ПД от источника переменного тока к выходным зажимам НПЧ с ЕК подключается аэродромный источник, формирующий трёхфазное переменное напряжение. При этом СГ с помощью НПЧ с ЕК переводится в двигательный режим, преобразователь частоты работает в обращённом режиме, реализуется частотное регулирование СГ. Осуществляется по определённому алгоритму электростартерный запуск ПД.

В режиме электростартерного запуска от звена постоянного тока происходит предварительное преобразование напряжения постоянного тока АБ ($U_{АБ}$) в трёхфазный переменный ток с помощью ИН. Трёхфазное переменное напряжение $U_{2(A)}$, $U_{2(B)}$, $U_{2(C)}$, формируемое ИН, поступает на выход НПЧ с ЕК, далее процедура запуска аналогична выше рассмотренной. В данном режиме двунаправленный DC-DC преобразователь осуществляет функцию повышения напряжения АБ ($U_{АБ}$) до величины U_d, необходимой для работы ИН.

После запуска ПД система переводится в режим генерирования и работает как источник электроэнергии на борту летательного аппарата.

В режиме генерирования электрической энергии НПЧ с ЕК, формирующий трёхфазное выходное напряжение, выполняет функцию стабилизации напряжения на нагрузке по величине и частоте для потребителей переменного тока на борту летательного аппарата (*AC load*) в соответствие с ГОСТ-54073-2010 (26).

Двунаправленный инвертор напряжения работает параллельно с НПЧ с ЕК и, как уже отмечалось, выполняет функцию активного фильтра, компенсирует влияние высших гармонических составляющих в спектре выходного переменного напряжения системы. Кроме этого, он может выполнять функцию стабилизации амплитудного значения напряжения на нагрузке. В качестве дополнительных функций ИН и двунаправленный DC-DC преобразователь работают параллельно с бортовой электросетью постоянного тока 27 В (*DC load*) и осуществляют заряд аккумуля-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

торной бортовой батареи до требуемого уровня напряжения $U_{АБ}$, а в случае отказа аккумуляторной батареи обеспечивают электропитание нагрузок постоянного тока ($I_н$ dc).

Двунаправленный инвертор напряжения с высокочастотной широтно-импульсной модуляцией, выполняя функцию активного фильтра, позволяет существенно уменьшить массу выходного фильтра НПЧ с ЕК.

Электромагнитные процессы в непосредственном преобразователе частоты с естественной коммутацией в составе стартер-генераторной системы

Рассмотрим электромагнитные процессы в НПЧ с ЕК для режима генерирования электрической энергии.

При анализе системы были сделаны следующие допущения:

- Индуктивность СГ $L_{СГ}$ существенно меньше индуктивности фильтра ($L_ф$), т.к. при наличии демпферной системы в СГ сверхпереходные индуктивности малы.
- Индуктивность фильтра ($L_ф$) кроме фильтрующих свойств обеспечивает независимую коммутацию вентилей НПЧ с ЕК.
- Тиристоры идеальные, т.е. во включенном состоянии падение напряжения на тиристорах равно нулю, а при выключенном состоянии тиристор представляет собой разрыв. Включаются и выключаются тиристоры мгновенно.
- Эти допущения позволяют рассматривать процессы в каждой выходной фазе НПЧ с ЕК независимо, поэтому анализируется лишь одна фаза преобразователя.

Как отмечалось, параллельный ИН с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) позволяет генерировать стабильное по величине трёхфазное синусоидальное напряжение. Это позволяет нам при рассмотрении электрических процессов в НПЧ с ЕК сделать допущение о том, что он работает на синусоидальную по форме противо-ЭДС.

Принимая во внимание принятые допущения, будем считать, что противо-ЭДС изменяется по закону $e_c(\vartheta) = \sqrt{2}E_c \sin\vartheta$, где $E_c = U_2$ – действующее значение противо-ЭДС, равное действующему значению напряжения на нагрузке, $\vartheta = 2\pi\omega_2$, $\omega_2 = 2\pi f_2$ – циклическая частота сигнала управления НПЧ с ЕК, равная частоте основной гармоники напряжения на нагрузке, $j = 1, 2, 3$ (24).

Структурная схема шестифазного магнитоэлектрического генератора и шестифазного нулевого НПЧ с ЕК с однофазным выходом представлена на Рис. 2.

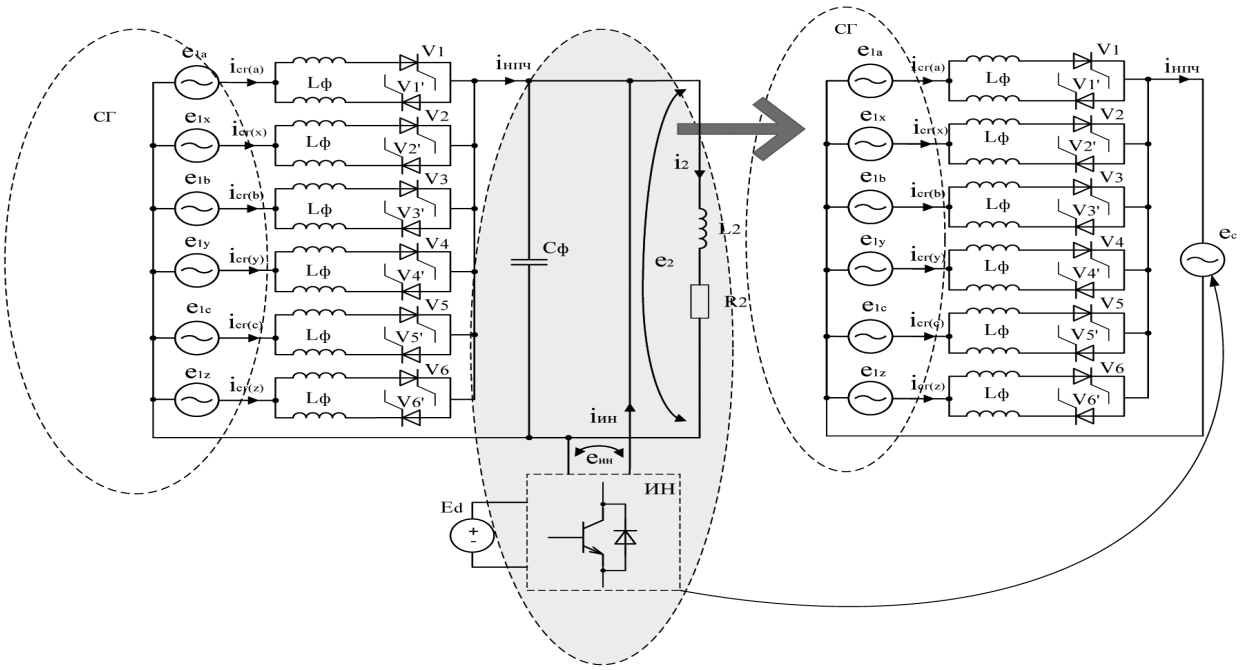


Рис. 2. Структурная схема шестифазного синхронного генератора и шестифазного нулевого непосредственного преобразователя частоты с естественной коммутацией с однофазным выходом
Fig. 2. Block diagram of a six-phase synchronous generator and a six-phase cycloconverter with natural commutation with a single-phase output

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

При анализе воспользуемся методом переключающих функций, введенных для данной схемы в работе (24). Способы управления НПЧ с ЕК рассмотрены в работах (37-43).

Закон изменения углов регулирования (или закон управления) для вентилей прямого комплекта $\alpha(\vartheta)$ и вентилей встречного комплекта $\alpha'(\vartheta)$ НПЧ имеет вид:

$$\alpha(\vartheta)=\frac{\pi}{2}f\left\{M\sin(\vartheta)\right\};$$

$$\alpha'(\vartheta)=\frac{\pi}{2}f\left\{-M\sin(\vartheta)\right\}, \quad (1)$$

где M – глубина модуляции углов управления.

Переключающие функции имеют вид:

$$F_j(\vartheta)=\frac{\lambda(\vartheta)}{2\pi}+\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\sqrt{2}}{k\pi}\cdot\sqrt{1-\cos k\cdot\lambda(\vartheta)}\cdot\sin\left[k\cdot a\cdot\vartheta+\varphi_k(\vartheta)-\varphi_{k(1)}(\vartheta)-\varphi_{kj(2)}\right]; \quad (2)$$

$$F_j'(\vartheta)=\frac{\lambda'(\vartheta)}{2\pi}+\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\sqrt{2}}{k\pi}\cdot\sqrt{1-\cos k\cdot\lambda'(\vartheta)}\cdot\sin\left[k\cdot a\cdot\vartheta+\varphi_k'(\vartheta)-\varphi_{k(1)}'(\vartheta)-\varphi_{kj(2)}-k\pi\right];$$

$$j=1,2,...,m,$$

где k – номер гармоники; $a=\frac{\omega_1}{\omega_2}$ – кратность частот; $\omega_1=2\pi f_1$ – циклическая частота напряжения СГ; $\lambda(\vartheta)$ – длительность протекания тока через вентиль прямого комплекта на интервале $0<\vartheta\le\pi$; $\lambda'(\vartheta)$ – длительность протекания тока через вентиль встречного комплекта на интервале $\pi<\vartheta\le 2\pi$. Функции $\lambda(\vartheta)$ и $\lambda'(\vartheta)$ определяются следующим образом:

$$\cos\left[\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{m}+\alpha(\vartheta)\right]-\cos\left[\lambda(\vartheta)+\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{m}+\alpha(\vartheta)\right]-\lambda(\vartheta)\frac{e_{\tilde{n}}(\vartheta)}{n}=0;$$

$$\cos\left[\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{m}+\alpha'(\vartheta)\right]-\cos\left[\lambda'(\vartheta)+\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{m}+\alpha'(\vartheta)\right]-\lambda'(\vartheta)\frac{e_{\tilde{n}}(\vartheta)}{n}=0; \quad (3)$$

$$\varphi_k(\vartheta)=arctg\left[\frac{\sin k\lambda(\vartheta)}{1-\cos k\lambda(\vartheta)}\right];$$

$$\varphi_k'(\vartheta)=arctg\left[\frac{\sin k\lambda'(\vartheta)}{1-\cos k\lambda'(\vartheta)}\right]$$

– фазовый сдвиг вентилей прямого и встречного комплектов соответственно;

$$\varphi_{k(1)}(\vartheta)=k\left(\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{m}+\alpha(\vartheta)\right);$$

$$\varphi_{k(1)}'(\vartheta)=k\left(\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{m}+\alpha'(\vartheta)\right)$$

– фазовый сдвиг от точек естественной коммутации тиристоров прямого и встречного комплектов соответственно;

$$\varphi_{kj(2)}=k\frac{2\pi}{3}(j-1)\ -$$

фазовый сдвиг для j-й фазы;

$$n=\frac{60\omega_1}{2\pi p}$$ – частота вращения вала СГ,

где ρ – число пар полюсов СГ.

Переключающие функции для каждой пары встречно-параллельных включенных вентилей определяются, как:

$$F_{Fj}(\vartheta)=F_j(\vartheta)\cdot F_k(\vartheta)+F_j'(\vartheta)\cdot F_k'(\vartheta), \quad (4)$$

где

$$F_k(\vartheta)=\frac{1}{2}\left[1+sgn\left(e_c(\vartheta)\right)\right]\ -$$

переключающая функция вентилей прямого комплекта;

$$F_k'(\vartheta)=1-F_k(\vartheta)=\frac{1}{2}\left[1-sgn\left(e_c(\vartheta)\right)\right]$$

– переключающая функция вентилей встречного комплекта.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Гладкая составляющая выходного тока исследуемой схемы НПЧ имеет вид:

$$i_{\tilde{a}\ddot{e}}(\vartheta)=\frac{\sqrt{2}E_1}{2\pi f_1 L_{\hat{o}}}\cdot\frac{m}{2\pi}\left\{-\lambda(\vartheta)\sin\left[\alpha(\vartheta)-\frac{\pi}{m}\right]+\cos\left[\alpha(\vartheta)-\frac{\pi}{m}\right]-\right.$$
$$\left.-\cos\left[\alpha(\vartheta)+\lambda(\vartheta)-\frac{\pi}{m}\right]-\frac{\lambda(\vartheta)^2\sin(\vartheta)}{2n^*}\right\}, \quad (5)$$

где E_1 – действующее значение ЭДС СГ; f_1 – частота ЭДС СГ; L_{ϕ} – индуктивность дросселя, включённая последовательно с тиристором;

$n^*=\dfrac{n}{n_{\min}}$ – относительная частота вращения вала СГ.

На Рис. 3 представлена гладкая составляющая выходного тока НПЧ с ЕК при следующих параметрах расчета: действующее значение напряжения СГ E_1 = 270 В; частота напряжения СГ f_1 = 5200 Гц; количество фаз синхронного генератора m = 6; действующее значение напряжения противо-ЭДС E_c = 115 В; частота выходного напряжения f_2 = 400 Гц; индуктивность входного фильтра L_{ϕ} = 20 мкГн; глубина модуляции M = 0,95.

Для определения вклада высших гармоник в спектр выходного тока НПЧ с ЕК найдем входное напряжение НПЧ с ЕК для вентилей прямого комплекта $E(\vartheta)$ и вентилей встречного комплекта $E'(\vartheta)$:

$$E(\vartheta)=\left[n\cdot\sin\left(a\cdot\vartheta-\frac{2\pi}{3}(j-1)\right)-\sin(\vartheta)\right]\cdot F_{Fj}(\vartheta);$$
$$E'(\vartheta)=\left[n\cdot\sin\left(a\cdot\vartheta-\frac{2\pi}{3}(j-1)-\pi\right)-\sin(\vartheta)\right]\cdot F_{Fj}(\vartheta). \quad (6)$$

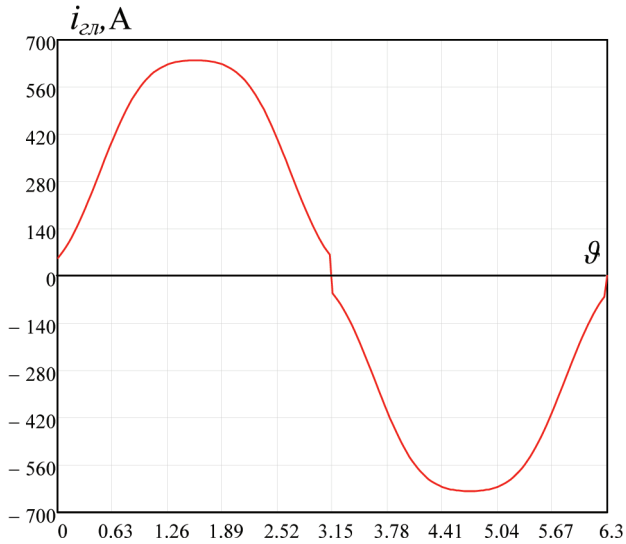


Рис. 3. Гладкая составляющая выходного тока исследуемого непосредственного преобразователя частоты с естественной коммутацией

Fig. 3. The smooth component of the output current of the investigated cycloconverter

Тогда производная тока СГ:

$$\frac{di_{\tilde{N}\tilde{A}j}}{d\vartheta}=\frac{a\cdot\left(E(\vartheta)\cdot F_j(\vartheta)+E'(\vartheta)\cdot F_j'(\vartheta)\right)}{n^*\cdot L_f}=\frac{a}{n^*\cdot L_f}\left(e_{1j}(\vartheta)-e_c(\vartheta)\right)\cdot \mathrm{F}_{Fj}(\vartheta), \quad (7)$$

где $e_{1j}(\vartheta)$ – напряжение СГ.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Полный ток НПЧ с ЕК будет определяться:

$$i_{\acute{I}\,\ddot{I}\times} = \sum_{j=1}^{m} i_{\tilde{N}\tilde{A}j},$$

$$\frac{di_{\acute{I}\,\ddot{I}\times}}{d\vartheta} = \frac{a}{n^{*}\cdot L_{f}} \sum_{j=1}^{m} \left(\left(e_{1j}\left(\vartheta\right) - e_{c}\left(\vartheta\right) \right) \cdot \mathrm{F}_{Fj}\left(\vartheta\right) \right). \quad (8)$$

Используя для проведения операции интегрирования соотношения (8) быстрое преобразование Фурье, получим спектральный состав высокочастотных гармонических составляющих выходного тока НПЧ с ЕК.

На Рис. 4 представлен график выходного тока НПЧ с ЕК с учётом гладкой и высокочастотных составляющих при параметрах, представленных ранее. Спектр данного тока приведен на Рис. 5. Где $I_{НПЧ(k)}$ – амплитудное значение гармоники с номером «k».

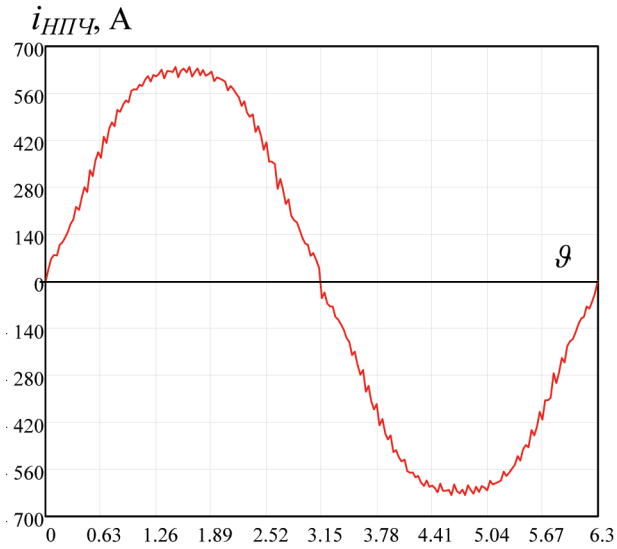


Рис. 4. Выходной ток непосредственного преобразователя частоты с естественной коммутацией с учётом гладкой и высокочастотных составляющих

Fig. 4. The output current of the cycloconverter taking into account smooth and high-frequency components

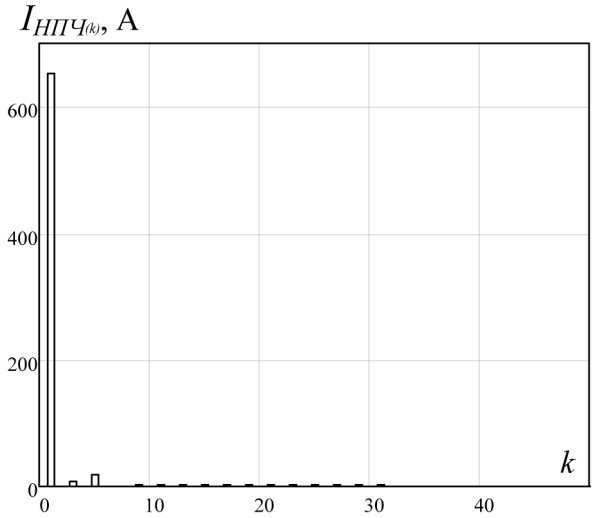


Рис. 5. Спектр выходного тока непосредственного преобразователя частоты с естественной коммутацией

Fig. 5. The spectrum of the output current of the cycloconverter

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Из Рис. 3 и Рис. 4 действующее значение выходного тока НПЧ с ЕК составляет $I_{НПЧ} = 460,77$ А. Из Рис. 5 видно, что основной вклад в спектр вносит 1 гармоника, а также гармоники с номерами 3 и 5. Действующее значение тока основной гармоники $I_{НПЧ(1)} = 460,38$ А. Тогда действующее значение всех высших гармоник сигнала $I_{НПЧ(ВГ)} = 19,1$ А.

Для подтверждения справедливости предложенного метода расчета НПЧ с ЕК было проведено имитационное моделирование исследуемой схемы с помощью пакета программ PSIM. На Рис. 6 представлено мгновенное значение выходного тока НПЧ с ЕК. Спектр выходного тока, полученный в результате моделирования исследуемой системы, представлен на Рис. 7.

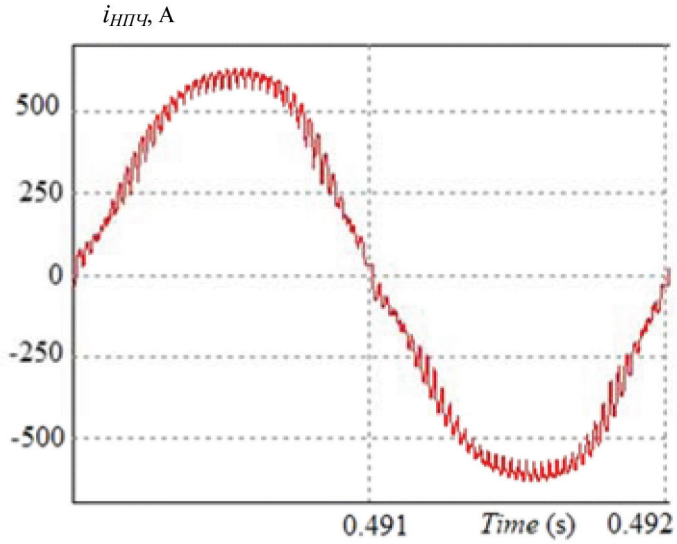


Рис. 6. Мгновенное значение выходного тока непосредственного преобразователя частоты с естественной коммутацией, полученное с помощью пакета программ PSIM

Fig. 6. The instantaneous value of the output current of cycloconverter, obtained using the PSIM software package

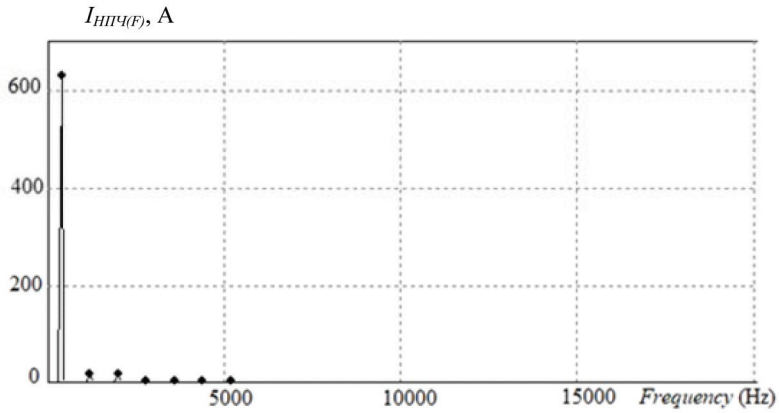


Рис. 7. Спектр выходного тока непосредственного преобразователя частоты с естественной коммутацией, полученный с помощью пакета программ PSIM

Fig. 7. The spectrum of the output current of the cycloconverter, obtained using the PSIM software package

Из Рис. 6 действующее значение выходного тока составило $I_{НПЧ} = 445,88$ А. Из Рис. 7 вклад первой гармоники по действующему значению составил $I_{НПЧ(1)} = 445,04$ А. Тогда действующее значение всех высших гармоник сигнала в представленной модели $I_{НПЧ(ВГ)} = 27,3$ А.

При сравнении данных аналитической модели и имитационного моделирования, можно сделать вывод, что предложенные алгоритмы расчета подтверждаются моделью, но не соответствуют полностью. Так, величина погрешности для действующего значения выходного тока составила 3 %, что удовлетворяет требованиям ГОСТ-54073-2010. Тогда как величина погрешности для высших гармоник выходного тока

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

составила 30 %. Имеющиеся расхождения связаны с допущениями, принятыми на начальном этапе исследования системы. Также в аналитической модели расчет тока нагрузки производился только до 50 гармоники включительно, что значительно снижает пульсации тока и искажает результат по сравнению с моделированием.

Заключение

Таким образом, показана возможность аналитического расчета электромагнитных процессов для НПЧ с ЕК, входящего в состав СГС, работающего в режиме генерирования электрической энергии при допущении, что инвертор напряжения с конденсатором выходного фильтра представлены в виде эквивалентной противо-ЭДС.

Получены основные соотношения, определяющие как мгновенные значения электрических координат исследуемой системы, так и интегральные характеристики.

Алгоритмы расчета справедливы и подтверждены имитационным моделированием системы. Погрешность расчётов для действующего значения выходного тока НПС с ЕК не превысила 3 %.

Полученные результаты позволяют оценить установленную мощность инвертора напряжения как активного фильтра и конденсатора выходного фильтра НПЧ с ЕК.

Благодарность

Авторы выражают свою благодарность кафедре электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета и лично заведующему кафедрой, профессору, доктору технических наук Харитонову Сергею Александровичу за помощь в проведении данного исследования.

Список литературы

[1]. Zharkov, M. A. Experiment results of the laboratory tests of electrical starting system powered by an AC source / M. A. Zharkov, P. A. Bachurin, S. A. Kharitonov, A. V. Sapsalev, R. Yu. Sarakhanova, A. D. Kupriyanov // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2016). – Novosibirsk: NSTU, 2016. – pp. 448-451.

[2]. Zharkov, M. A. Experiment results of the laboratory tests of electrical starting system powered by a DC source / M. A. Zharkov, P. A. Bachurin, S. A. Kharitonov, D. V. Korobkov, R.Yu. Sarakhanova, V.S. Simin // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2016). – Novosibirsk: NSTU, 2016. – pp. 623-627.

[3]. Давидов, А. О. Энергетическая установка полностью электрического самолета / А. О. Давидов, Б. В. Жмуров // Электропитание. – 2016. – № 2. – С. 7-11.

[4]. Лёвин, А. В. Тенденции и перспективы развития авиационного электрооборудования / А. В. Лёвин, С. П. Халютин, Б. В. Жмуров // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2015. – № 213 (3). – С. 50-57.

[5]. Грузков, С. А. Электрооборудование летательных аппаратов: в 2-х томах. Том 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов. Учебник для ВУЗов. – Москва: МЭИ, 2005. – С. 13-44.

[6]. Zharkov, M. A. Mathematical Model of the Starter System Based on a Three-Stage Synchronous Generator with Damping Cage / M. A. Zharkov, S. A. Kharitonov, V. S. Simin, D. V. Korobkov, A. G. Volkov, I. O Bessonov // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Novosibirsk: NSTU, 2015. – pp. 422-426.

[7]. Zharkov, M. A. Starting Mode of Three-Stage Brushless Generator Operation / S. A. Kharitonov, A.V. Sapsalev, A.S. Kharitonov // 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED). – Ekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 2018.

[8]. Стартер-генераторная система для вспомогательной силовой установки / Лёвин А. В., Халютин С. П., Давидов А. О. [и др.] // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2017. – № 5. – С. 55-66.

[9]. Власов, А. И. Магнитоэлектрический стартер-генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения: автореферат диссертации …к-та. техн. наук: 05.09.01 / Власов Андрей Иванович. – Чебоксары, 2010. – 20 с.

[10]. Адаптивная стартер-генераторная система для летательных аппаратов: пат. 2713390 Росс. Федерация: 05.02.2020.

[11]. Sidorov, V. E. Applying the estimation system for synchronization of thyristor rectifier operating from the permanent magnet synchronous machine / V. E. Sidorov, M. A. Zharkov, D. V. Korobkov, M. V. Balagurov, A.G. Volkov // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Novosibirsk: NSTU, 2017. – pp. 579-583.

[12]. Bose, B. K. Power Electronics And Motor

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Drives: Advances and Trends / B. K. Bose. – United States: Academic Press, Cop 2020. – 1108 p.

[13]. Yazhou Liu The Power Quality Impact of Cycloconverter Control Strategies / Yazhou Liu, Gerald Thomas Heydt, Ron F. Chu // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – № 2. – pp. 1711-1718.

[14]. Maamoun, A. Development of cycloconverters / A. Maamoun // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a Caring and Humane Technology. – Montreal, Canada: IEEE, 2003. – pp. 521-524.

[15]. Nelson, R. Power circuit analysis of a cycloconverter-induction motor drive system / R. H. Nelson // Power Processing and Electronics Specialists Conference. – Atlantic City, USA: IEEE, 1972. – pp. 71-80.

[16]. Belousov, E. V. Evaluation of limit regulation values for positional electric drive in a system equipped with cycloconverters / E. V. Belousov, A. M. Zhuravlev // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. – St. Petersburg, Russia: IEEE, 2017.

[17]. Cycloconverter Based Three Phase Induction Motor to Replace Flywheel of the Process Machine / M. V. Palandurkar, M. A. Chaudhari, J. P. Modak, S. G. Tarnekar // 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. – Bangkok, Thailand: IEEE, 2007. – pp. 1559-1562.

[18]. Balog, R. S. Commutation technique for high-frequency link cycloconverter based on state-Machine control / R. S. Balog, P. T. Krein // IEEE Power Electronics Letters. – 2005. – № 3. – pp. 101-104.

[19]. A new single-phase to three-phase cycloconverter for low cost AC motor drives / Xiaofeng Yang; Ruixiang Hao; Xiaojie You; Trillion Q. Zheng // 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. – Singapore: IEEE, 2008. – pp. 1752-1756. (19)

[20]. Klug, R. -D. High power medium voltage drives - innovations, portfolio, trends / R. -D. Klug; N. Klaassen // European Conference on Power Electronics and Applications. – Dresden, Germany: IEEE, 2005. – pp. 1-10.

[21]. Зиновьев, Г. С. Основы силовой электроники: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – С. 471-477.

[22]. Sarakhanova, R. Yu. Cycloconverter based on bridge circuit for power supply system of autonomous objects / S. A. Kharitonov // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – pp. 472-476.

[23]. Kharitonov, S. A. An analytical analysis of a wind power generation system including synchronous generator with permanent magnets, active rectifier and voltage source inverter // Wind power. – Rijeka, Croatia: INTECH, 2010, – pp. 23-72.

[24]. Харитонов, С. А. Электромагнитные процессы в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов: Монография. Новосибирск: НГТУ, 2011. – 533 с.

[25]. Dubkova, R. Yu. Calculation of the voltage inverter parameters in the starter-generator system of the aircraft / I. S. Dubkov, M. A. Zharkov, S. V. Klassen // 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Novosibirsk: NSTU, 2018. – pp. 511-514.

[26]. ГОСТ 54073-2010. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. – 2011.

[27]. Лёвин, А. В. Электрический самолёт: от идеи до реализации: Монография / А. В. Лёвин, И. И. Алексеев, С. А. Харитонов, Л. К. Ковалёв // М.: Машиностроение, 2010. – 288 с.

[28]. Jia Wang, Jian Zheng, «Operational Scenarios Oriented Aircraft Emergency Power Supply System Design and Integration», in 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Chongqing, China, 2021 year, pp. 1628-1632.

[29]. Jiemin Zhou. Aircraft electrical system. Beijing: Science Press, 2010, pp 40-60. (29)

[30]. A. Chekin, Ya. Moroshkin, K. Gubernatorov and M. Kiselev, «Impact of reliability of state-of-the-art electrical units on architecture of power supply system of modern aircraft», in International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russia, 2019 year.

[31]. Moir I., Seabridge A. and Jukes M. «Civil Avionics Systems,» – 2nd Edition. John Wiley & Sons, Ltd. Published, 2013. 602 p.

[32]. Alessandro Birolini, Springer-Verlag, «Quality and Reliability of Technical Systems», Berlin Heidelberg, 1994.

[33]. V. Madonna, P. Giangrande and M. Galea. «Electrical Power Generation in Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities», in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 4, no. 3, pp. 646-659, Sept. 2018.

[34]. J. Falck, C. Felgemacher, A. Rojko, M. Liserre, P. Zacharias. «Reliability of Power Electronic Systems: An Industry Perspective», IEEE Industrial Electronics Magazine. 2018. Vol. 12. No. 2, pp. 24-35.

[35]. A. Efimov, S. Melnikov, A. Garganeev. «Simulation of Aircraft Electrical Power Supply System», in IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), Moscow, Russia, 2018 year.

[36]. Левин, А. В. Проектирование генератора с редкоземельными магнитами в системе электроснабжения летательных аппаратов / А. В. Левин, Д. В. Левин, Э. Я. Лившиц, Б. С. Зечихин // Электричество. – 2009. – № 10. – С. 41-47.

[37]. R. T. Schreiner, A. A. Efimov, G. S. Zinoviev, K. N. Koryukov, I. A. Muhamatshin, A. I. Kalygin.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

«Predictive Ladder Vector Control Frequency Converters Active in the AC Drive Systems», Electrical Engineering, 2004, no. 10, pp. 43-50.

[38]. Ефимов, А. А. Управление активными преобразователями в системах электроснабжения и электропривода /А. А. Ефимов, И. А. Мухаматшин. // Известия Российской Академии Наук. Энергетик. – 2005. – № 4. – С. 91-112.

[39]. Ефимов, А. А. Регулировочные характеристики активных однофазных преобразователей тока А. А. / А. А. Ефимов, С. Ю. Мельников // Завалишинские чтения 16. Сборник докладов. – Санкт-Петербург, 2017. – С. 157-162.

[40]. G. Odnokopylov, A. Bragin. «Algorithms of fault tolerant control of induction motor electric drive in phase loss operate mode» in International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)», Omsk, Russia, 2015 year.

[41]. Солодовников, В. В. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления // М.: Машиностроение, 1976. – С. 735.

[42]. R. Sarakhanova, S. Kharitonov, M. Zharkov, P. Bachurin. «Evaluation of the Steepness of the Transfer Characteristic by Current of the Cycloconverter», in IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Novosibirsk, Russian Federation, 2023 year, pp. 1100-1103.

[43]. S. Kharitonov, A. Kharitonov, A. Khristolyubova, E. Bukina, I. Bakhovtsev. «Zero Sequence Astatic Control of Three-Phase Four-Leg Voltage Source Inverter of Power Supply System», in 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, Russia, 2020 year, pp. 136-144.

[44]. J. Chen, C. Wang and J. Chen. «Investigation on the Selection of Electric Power System Architecture for Future More Electric Aircraft», in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 4, no. 2, pp. 563-576, June 2018.

[45]. J. Pötter, M. Pfost and G. Schullerus. «Design Aspects of a Novel Brushless Excitation System for Synchronous Machines», 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), San Diego, CA, USA, 2019, pp. 1228-1233, doi: 10.1109/IEMDC.2019.8785200.

Referenses

[1]. Zharkov, M. A. Experiment results of the laboratory tests of electrical starting system powered by an AC source / M. A. Zharkov, P. A. Bachurin, S. A. Kharitonov, A. V. Sapsalev, R. Yu. Sarakhanova, A. D. Kupriyanov // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2016). – Novosibirsk: NSTU, 2016. – pp. 448-451.

[2]. Zharkov, M. A. Experiment results of the laboratory tests of electrical starting system powered by a DC source / M. A. Zharkov, P. A. Bachurin, S. A. Kharitonov, D. V. Korobkov, R. Yu. Sarakhanova, V.S. Simin // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2016). – Novosibirsk: NSTU, 2016. – pp. 623-627.

[3]. Davidov, A. O. Power plant of a fully electric aircraft / A. O. Davidov, B. V. Zhmurov // Power supply. – 2016. – No. 2. – P. 7-11.

[4]. Levin, A. V. Trends and prospects for the development of aviation electrical equipment / A. V. Levin, S. P. Khalyutin, B. V. Zhmurov // Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. – 2015. – No. 213 (3). – P. 50-57.

[5]. Gruzkov, S. A. Electrical equipment of aircraft: in 2 volumes. – Volume 1. Aircraft power supply systems. Textbook for universities. – Moscow: MPEI, 2005. – P. 13-44.

[6]. Zharkov, M. A. Mathematical Model of the Starter System Based on a Three-Stage Synchronous Generator with Damping Cage / M. A. Zharkov, S. A. Kharitonov, V. S. Simin, D. V. Korobkov, A. G. Volkov, I. O Bessonov // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Novosibirsk: NSTU, 2015. – pp. 422-426.

[7]. Zharkov, M. A. Starting Mode of Three-Stage Brushless Generator Operation / S. A. Kharitonov, A. V. Sapsalev, A. S. Kharitonov // 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED). – Ekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 2018.

[8]. Starter-generator system for an auxiliary power unit / Levin A.V., Khalyutin S. P., Davidov A. O. [and others] // Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. – 2017. – No. 5. – P. 55-66.

[9]. Vlasov, A. I. Magnetoelectric starter-generator in the power supply system of new generation aircraft: abstract of the dissertation...to-ta. tech. Sciences: 05.09.01 / Vlasov Andrey Ivanovich. – Cheboksary, 2010. – 20 p.

[10]. Adaptive starter-generator system for aircraft: Pat. 2713390 Ross. Federation: 02/05/2020.

[11]. Sidorov, V. E. Applying the estimation system for synchronization of thyristor rectifier operating from the permanent magnet synchronous machine / V. E. Sidorov, M. A. Zharkov, D. V. Korobkov, M. V. Balagurov, A. G. Volkov // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Novosibirsk: NSTU, 2017. – pp. 579-583.

[12]. Bose, B. K. Power Electronics And Motor Drives: Advances and Trends / B. K. Bose. – United States: Academic Press, Cop 2020. – 1108 p.

[13]. Yazhou Liu The Power Quality Impact of Cycloconverter Control Strategies / Yazhou Liu, Gerald

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Thomas Heydt, Ron F. Chu // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – No. 2. – pp. 1711-1718.

[14]. Maamoun, A. Development of cycloconverters / A. Maamoun // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a Caring and Humane Technology. – Montreal, Canada: IEEE, 2003. – pp. 521-524.

[15]. Nelson, R. Power circuit analysis of a cycloconverter-induction motor drive system / R. H. Nelson // Power Processing and Electronics Specialists Conference. - Atlantic City, USA: IEEE, 1972. – pp. 71-80.

[16]. Belousov, E. V. Evaluation of limit regulation values for positional electric drive in a system equipped with cycloconverters / E. V. Belousov, A. M. Zhuravlev // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. – St. Petersburg, Russia: IEEE, 2017.

[17]. Cycloconverter Based Three Phase Induction Motor to Replace Flywheel of the Process Machine / M. V. Palandurkar, M. A. Chaudhari, J. P. Modak, S. G. Tarnekar // 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. – Bangkok, Thailand: IEEE, 2007. – pp. 1559-1562.

[18]. Balog, R. S. Commutation technique for high-frequency link cycloconverter based on state-Machine control / R. S. Balog, P. T. Krein // IEEE Power Electronics Letters. – 2005. – No. 3. – pp. 101-104.

[19]. A new single-phase to three-phase cycloconverter for low cost AC motor drives / Xiaofeng Yang; Ruixiang Hao; Xiaojie You; Trillion Q. Zheng // 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. – Singapore: IEEE, 2008. – pp. 1752-1756.

[20]. Klug, R. -D. High power medium voltage drives-innovations, portfolio, trends / R. -D. Klug; N. Klaassen // European Conference on Power Electronics and Applications. – Dresden, Germany: IEEE, 2005. – pp. 1-10.

[21]. Zinoviev, G. S. Fundamentals of power electronics: Textbook. – Novosibirsk: NSTU Publishing House, 1999. – P. 471-477.

[22]. Sarakhanova, R. Yu. Cycloconverter based on bridge circuit for power supply system of autonomous objects / S. A. Kharitonov // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – pp. 472-476.

[23]. Kharitonov, S. A. An analytical analysis of a wind power generation system including synchronous generator with permanent magnets, active rectifier and voltage source inverter // Wind power. – Rijeka, Croatia: INTECH, 2010, – pp. 23-72.

[24]. Kharitonov, S. A. Electromagnetic processes in electrical energy generation systems for autonomous objects: Monograph. Novosibirsk: NSTU, 2011. – 533 p.

[25]. Dubkova, R. Yu. Calculation of the voltage inverter parameters in the starter-generator system of the aircraft / I. S. Dubkov, M. A. Zharkov, S. V. Klassen // 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Novosibirsk: NSTU, 2018. – pp. 511-514.

[26]. GOST 54073-2010. Power supply systems for aircraft and helicopters. General requirements and standards for power quality. – 2011.

[27]. Levin, A. V. Electric aircraft: from idea to implementation: Monograph / A. V. Levin, I. I. Alekseev, S. A. Kharitonov, L. K. Kovalev // M.: Mashinostroenie, 2010. – 288 p.

[28]. Jia Wang, Jian Zheng. «Operational Scenarios Oriented Aircraft Emergency Power Supply System Design and Integration», in 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Chongqing, China, 2021 year, pp. 1628-1632.

[29]. Jiemin Zhou. Aircraft electrical system. Beijing: Science Press, 2010, pp 40-60. (29)

[30]. A. Chekin, Ya. Moroshkin, K. Gubernatorov and M. Kiselev. «Impact of reliability of state-of-the-art electrical units on architecture of power supply system of modern aircraft», in International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russia, 2019 year.

[31]. Moir I., Seabridge A. and Jukes M. «Civil Avionics Systems», – 2nd Edition. John Wiley & Sons, Ltd. Published, 2013. 602 p.

[32]. Alessandro Birolini, Springer-Verlag. «Quality and Reliability of Technical Systems», Berlin Heidelberg, 1994.

[33]. V. Madonna, P. Giangrande and M. Galea. «Electrical Power Generation in Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities», in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 4, no. 3, pp. 646-659, Sept. 2018.

[34]. J. Falck, C. Felgemacher, A. Rojko, M. Liserre, P. Zacharias. «Reliability of Power Electronic Systems: An Industry Perspective», IEEE Industrial Electronics Magazine. – 2018. – Vol. 12. – No. 2, pp. 24-35.

[35]. A. Efimov, S. Melnikov, A. Garganeev. «Simulation of Aircraft Electrical Power Supply System», in IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), Moscow, Russia, 2018 year.

[36]. A. V. Levin, D. V. Levin, E. Ya. Livshits, B. S. Zechikhin. «Designing a generator with rare-earth magnets in the aircraft power supply system», Electricity, 2009, no. 10, pp. 41-47 (In Russian).

[37]. R. T. Schreiner, A. A. Efimov, G. S. Zinoviev, K. N. Koryukov, I. A. Muhamatshin, A. I. Kalygin. «Predictive Ladder Vector Control Frequency Converters Active in the AC Drive Systems», Electrical Engineering, 2004, no. 10, pp. 43-50.

[38]. A. A. Efimov, I. A. Muhamatshin. «Control Active Converters in Energy Supply Systems and Electric Drive», Izvestiya RAN. Energetika, 2005, № 4. – pp. 91-112 (In Russian).

[39]. A. A. Efimov, S. Y. Melnikov. «Control Active

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Single-Phase Rectifier», Zavalishin Reading. Saint-Petersburg. GUAP Publ., 2017, pp. 157-162 (In Russian).

[40]. G. Odnokopylov, A. Bragin. «Algorithms of fault tolerant control of induction motor electric drive in phase loss operate mode» in International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)», Omsk, Russia, 2015 year.

[41]. V. Solodovnikov. «Devices and elements of automatic control and control systems [Ustroystva i elementy sistem regulirovaniya i upravleniya]», «Mechanical engineering» Published, Moscow [izdatel'stvo «Mashinostroyeniye», Moskva], 735 p., 1976 year (in Russian).

[42]. R. Sarakhanova, S. Kharitonov, M. Zharkov, P. Bachurin. «Evaluation of the Steepness of the Transfer Characteristic by Current of the Cycloconverter», in IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Novosibirsk, Russian Federation, 2023 year, pp. 1100-1103.

[43]. S. Kharitonov, A. Kharitonov, A. Khristolyubova, E. Bukina, I. Bakhovtsev. «Zero Sequence Astatic Control of Three-Phase Four-Leg Voltage Source Inverter of Power Supply System», in 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, Russia, 2020 year, pp. 136-144.

[44]. J. Chen, C. Wang and J. Chen. «Investigation on the Selection of Electric Power System Architecture for Future More Electric Aircraft», in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 4, no. 2, pp. 563-576, June 2018.

[45]. J. Pötter, M. Pfost and G. Schullerus. «Design Aspects of a Novel Brushless Excitation System for Synchronous Machines», 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), San Diego, CA, USA, 2019, pp. 1228-1233, doi: 10.1109/IEMDC.2019.8785200.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

РЕКЛАМНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ,
ИНВЕСТИЦИОННЫХ ФИРМ И ФИРМ-ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

ADVERTISING MATTERS OF INVESTMENT
COMPANIES AND MANUFACTURERS

В России создадут первую в мире газотурбинную установку на метано-водородном топливе

Самарский университет совместно с компанией «Силовые машины» займется разработкой технологий для первой отечественной газотурбинной установки на метано-водородном топливе.

Как рассказал генеральный конструктор компании Павел Чупин, работа сейчас ведется над двухвальным газогенератором для двигателей следующего поколения. Как рассказали в пресс-службе университета, предварительные исследования показали, что использование метано-водородной смеси с долей водорода 40-50 %, увеличит мощность газотурбинной установки примерно на 10 %.

Экспериментальную модельную камеру сгорания изготовят на 3D-принтере в лаборатории аддитивных технологий. В будущем новый двигатель может использоваться для перспективных самолетов дальней и военно-транспортной авиации.

Где можно будет использовать двигатель и электроустановки:

- в перспективных самолетах,
- дальней и военно-транспортной авиации,
- на крупных промышленных предприятиях,
- для тепло- и электроснабжения малых городов или жилых районов мегаполисов.

Проект по перспективному газогенератору сейчас рассчитан до конца 2022 г. Разработку технического проекта камеры сгорания газотурбинной установки предполагается завершить в 2023 г., после чего на промышленном предприятии будет изготовлен опытный образец.

hightech.fm

SUNRUN

Sunrun (RUN, $57,58) уже была крупнейшей в стране компанией сектора солнечной энергетики для жилых домов, прежде чем она согласилась купить своего конкурента Vivint Solar через сделку стоимостью 1,5 млрд долларов. По сообщениям Bloomberg, в результате приобретения, которое закончилось в октябре, был создан гигант сферы производства кровельных солнечных панелей, который обеспечивает 75 % новых арендаторов каждый квартал.

Аналитик Roth Capital Филип Шен говорит, что Sunrun «*является крупнейшим игроком отрасли с преимуществами дифференцированного масштабирования, лидерством в области сетевых услуг и так далее*». Он видит больше возможностей для роста акций на основе веры в то, чем может стать Sunrun: энергетическая компания будущего.

Акции RUN также получат поддержку от расширения налогового кредита на инвестиции в солнечную энергетику в размере 26 % для объектов жилой и коммерческой недвижимости.

Филип Шен также отмечает, что руководство Sunrun ожидает в 2021 году более быстрого роста, чем прогнозируется по отрасли (15 % в годовом исчислении). При этом он ожидает, что Sunrun найдёт правильный баланс между маржой и ростом.

Эти акции не подходят для слабонервных. Они подскочили на 317 % в начале декабря, а за последние три года выросли более чем на 900 %.

Шен ставит акциям, как и всей отрасли «*зелёной энергетики*», оценку Buy, в соответствии со средней рекомендацией 11 других аналитиков, которые рассматривали Sunrun.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Uponor поддерживает тренд на модульное строительство

Модульное строительство уже достаточно плотно вошло в современную практику. Оно позволяет значительно сократить время, затраченное на монтаж, обеспечить удобство при транспортировке, а также снизить риски. Компания Uponor, как один из ведущих мировых поставщиков инженерных решений, следует тренду и на протяжении многих лет предлагает готовые продукты для систем радиаторного и напольного отопления, охлаждения и питьевого горячего водоснабжения, придерживаясь концепции изделий заводской готовности. Таким образом, основной объём работ выполняется в условиях цехового производства, а при монтаже остаётся только выполнить подключение изделий.

UponorComfortPort – готовые к подключению, полностью собранные и протестированные в заводских условиях коллекторные узлы для напольного и радиаторного отопления. Установка предварительно собранного коллекторного узла заменяет 30 отдельных комплектующих, а также сводит количество операций при монтаже с 250 до минимума. Благодаря тому, что системы распределения, регулирования и управления разработаны одним производителем, а также выполнены из соответствующих друг другу компонентов, они полностью совместимы между собой, просты в установке и эксплуатации.

При монтаже данные свойства позволяют почти вдвое сэкономить время, требующееся на проведение работ, снизить риски за счет надежного выбора необходимых компонентов и избежать возможных ошибок при сборке системы. ComfortPort также представляются рациональным решением: компания оказывает поддержку в расчете и проектировании систем, предоставляя 3D-модели и BIM-библиотеку для своих решений. Коллекторные узлы UponorComfortPort предлагаются в исполнении для встроенного и настенного монтажа, что позволяет размещать их в помещении любой площади и назначения без ущерба для дизайна. Безопасную и легкую установку шкафов обеспечивают встроенный пузырьковый уровень и влагозащищенная накладная розетка. Каждый коллекторный узел поставляется в защитной индивидуальной упаковке и маркируется с указанием точной информации о месте установки на строительном объекте. Более того, коллекторные узлы для напольного и радиаторного отопления могут быть с легкостью сконфигурированы на сайте компании в соответствии с требованиями заказчика. Данное решение отлично подходит для многоквартирных домов, медицинских учреждений, гостиниц, офисных и промышленных зданий, спортивных учреждений и баз отдыха. К примеру, система ComfortPort уже введена в эксплуатацию в первом умном ЖК «Дом мечты» в Нижнем Новгороде, где благодаря этой инновационной технологии у жильцов есть возможность воспользоваться преимуществом водяного напольного отопления с индивидуальным регулированием температуры в каждой комнате.

КТП UponorCombiPort представляет собой полностью собранную станцию, которая подходит для распределения тепла в системе радиаторного или напольного отопления, или для комбинированной установки из обеих систем. К основным преимуществам можно отнести экономию энергии до 40 % благодаря отсутствию стояков и магистралей ГВС, подогрев горячей воды только по индивидуальной необходимости, отсутствие застоя воды в трубах, что позволяет ей всегда оставаться гигиенически чистой. Специалистам строительной отрасли данная система придаёт уверенности в работе, поскольку все пункты собраны и протестированы в надёжных заводских условиях, позволяет сэкономить до 30 % времени на монтаж, а также даёт возможность использовать минимум комплектующих при установке.

Компания Uponor, как один из международных лидеров отрасли, планирует и дальше внедрять инновационные технологии, отвечающие последним тенденциям рынка, и обеспечивающие при этом максимальное удобство и комфорт для своих клиентов.

О компании Uponor

Uponor является ведущим международным производителем систем и решений для безопасного водоснабжения, энергоэффективного отопления и охлаждения и надежной инфраструктуры. Компания предлагает решения для различных сфер, включая жилищное, коммерческое, промышленное и гражданское строительство. Штат сотрудников корпорации Uponor около 4 000 человек в 26 странах мира, в основном в Европе и Северной Америке. В 2019 году чистый объем продаж Uponor составил около 1,1 млрд евро. Штаб-квартира Uponor находится в Финляндии и зарегистрирована на Nasdaq, Хельсинки.http://www.uponor.ru

За дополнительной информацией обращайтесь в пресс-службу компании Uponor по тел.:
+7 (495) 641-22-09, e-mail: uponor@pr-consulta.ru

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Перспективы и недостатки водородной энергетики

Вадим Кизимов,частный инвестор

Для хранения и выработки энергии от водорода используются топливные элементы. Первый водородный топливный элемент был сконструирован английским ученым Уильямом Гроувом в 30-х годах 19 века. Гроув и работавший параллельно с ним Кристиан Шенбейн, продемонстрировали возможность производства энергии в водородно-кислородном топливном элементе с использованием кислотного электролита.

В 1959 году Фрэнсис Т. Бэкон из Кембриджа добавил в водородный топливный элемент ионообменную мембрану для облегчения транспорта гидроксид-ионов. Изобретением Бэкона сразу заинтересовались правительство США и NASA, обновленный топливный элемент стал использоваться на космических аппаратах «Аполлон» в качестве главного источника энергии во время их полетов.

В отличие от кислорода, водород практически не встречается на земле в чистом виде и поэтому извлекается из других соединений с помощью различных химических методов.

По этим способам его разделяют на цветовые градации.

Зеленый – производится из возобновляемых источников энергии методом электролиза воды. Все, что необходимо для этого: вода, электролизер и большое снабжение электроэнергией.

Голубой – производится из природного газа, а вредные отходы улавливаются для вторичного использования. Тем не менее, идеально чистым этот метод не назовешь.

Розовый или красный – производится при помощи атомной энергии.

Серый водород получают путем конверсии метана. При его производстве вредные отходы выбрасываются в атмосферу.

Коричневый водород получают в результате газификации угля. Этот метод также после себя оставляет парниковые газы.

Еще существуют технологии получения биоводорода из мусора и этанола, но их доля чрезвычайно мала.

Себестоимость производства по видам водорода, доллар за килограмм

Зеленый	10 $
Голубой	2 $
Красный	2 $
Серый	2-2,5 $
Коричневый	2-2,5 $

Водородная энергетика

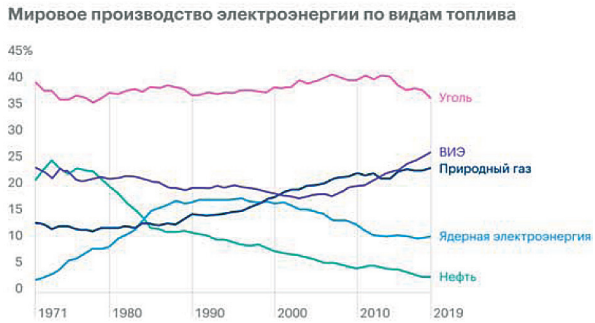
На переработку угля приходится 18 % производства водорода, 4 % обеспечивается за счет зеленого водорода и 78 % – переработкой природного газа и нефти. Методы производства, основанные на ископа-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

емом топливе, приводят к образованию 830 млн тонн выбросов CO_2 каждый год, что равно выбросам Великобритании и Индонезии, вместе взятым. И, тем не менее, водород – это более чистая альтернатива традиционному топливу.

В мире три основных источника выбросов, способствующих потеплению климата: транспорт, производство электроэнергии и промышленность. Водород может использоваться во всех трех областях. При использовании в топливных элементах водородная энергия оставляет минимальные потери, а после использования в качестве побочного продукта остается только вода, из которой снова можно добывать водород.



Перспективы отрасли

Согласно докладу МЭА, к 2050 году мировой спрос на водород должен достичь 528 млн тонн – против 87 млн в 2020, а его доля в мировом потреблении составит 18 %, из них 10 % будет приходиться на зеленый водород.

К 2050 году МЭА планирует снизить затраты на производство этого экологически чистого вида топлива до 2 $ за килограмм, что существенно ниже нынешних 10 $. Это произойдет благодаря развитию технологий ВИЭ и удешевлению производства энергии ветра и солнца.

В июне 2020 года Германия объявила о реализации национальной водородной стратегии с инвестициями в 7 млрд евро, чтобы стать лидером в этой области.

Япония, Франция, Южная Корея, Австралия, Нидерланды и Норвегия начали свой курс на водород раньше Германии, а Япония сделала это раньше всех – в декабре 2017 года.

В июле 2020 года Минэнерго подготовило план развития в РФ водородной энергетики на период 2020-2024 годов. Производить водород собираются «Росатом», «Газпром» и «Новатэк». В дорожной карте предусмотрены следующие меры:

- поддержка пилотных проектов по производству водорода;
- стимулы для экспортеров и покупателей на внутреннем рынке;
- первые водородные установки запустят в 2024 году на атомных электростанциях, объектах добычи газа и переработки ископаемых.

В 2021 году Hydrogen One Capital – первый в мире инвестиционный фонд, ориентированный на зеленый водород, заявил о листинге на Лондонской бирже. Фонд инвестирует в проекты мощностью 20-100 МВт с возможностью их расширения до 500 МВт.

Преимущества водородной энергетики

Высокая применимость. Электрификация транспорта поможет снизить выбросы в атмосферу, но авиацию, морские и грузовые перевозки на дальние расстояния трудно перевести на использование электроэнергии, потому что для этих секторов требуется топливо с высокой плотностью энергии. Зеленый водород может удовлетворить эти потребности. Например, Airbus представил концепции самолетов с водородным двигателем и надеется ввести его в эксплуатацию к 2035 году.

Nikola строит полуприцепы, работающие как на аккумуляторных батареях, так и на водороде. Компания заявляет, что ее топливные элементы могут работать при более низких температурах, чем батареи. И они легче, что делает их более практичными для грузовиков и другой тяжелой техники. Nikola также утверждает, что дальность хода такого грузовика составит 900 миль на баке с водородом. Для сравнения: у Tesla Semi с батарейным питанием, которое может быть запущено в производство в конце этого года или в 2022 году, заявленная дальность – 200-300 миль.

Также свои аналогичные модели транспорта представили компании Toyota, Honda и BMW.

Время заправки электромобиля на топливных элементах в среднем составляет менее четырех минут. При этом в отличие от батарей, они не нуждаются в перезарядке. Поскольку они могут работать независимо от сети, то могут использоваться как запасные генераторы электричества или тепла.

Важный элемент перехода на водород – его применение в ЖКХ. Кроме пилотных проектов в Великобритании, Лидс станет первым городом, энергоснабжение которого будет полностью водородным. Согласно плану, все газовые сети и транспортное оборудование переведут на него.

Запасы водорода практически безграничны. Так как он встречается почти всюду, его можно использовать там, где он производится. В отличие от батарей, которые не могут хранить большое количество электроэнергии в течение продолжительного времени, водород можно производить из избыточной возобновляемой энергии и хранить в больших количествах.

Энергоэффективность. Водород содержит по-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

чти в три раза больше энергии, чем ископаемое топливо, поэтому для выполнения какой-либо работы его требуется гораздо меньше. Например, по сравнению с электростанцией, работающей на сжигании топлива с КПД от 33 до 35 %, водородные топливные элементы выполнят ту же функцию с КПД до 65 %. Для примера, у солнечных элементов – КПД 20 %, а у ветряных – 40 %.

Весной 2020 года в городе Фукусима была запущена самая крупная в мире электростанция, работающая на водороде. Для питания электролизных установок на ней размещены солнечные батареи общей мощностью 20 МВт. Всего станция вырабатывает 1,2 тысячи кубических метров водорода в час.

В автомобилях топливные элементы используют 40-60 % энергии топлива, а также обеспечивают сокращение его расхода на 50 %.

Зеленый водород – отличная среда для хранения энергии. Например, у Германии существует проблема с энергосистемой. В ясные и ветреные дни солнечные экраны и ветряные турбины на севере производят больше электроэнергии, чем может потребить эта часть страны. Из-за этого Германия вынуждена продавать излишки электроэнергии соседним странам себе в убыток. Избыток электроэнергии из ВИЭ можно хранить в виде водорода, а затем сжигать для выработки электроэнергии, когда это необходимо.

Недостатки водородной энергетики

Стоимость зеленого водорода. Как уже говорилось выше, именно стоимость добычи самого чистого вида водорода ставит наиболее сильные препятствия в его развитии. По словам и прогнозам Минэнерго РФ, перспективы водородной энергетики связаны с удешевлением стоимости водорода, производимого электролизом воды. В качестве основных факторов обеспечения конкурентоспособности зеленого водорода рассматривается перспективное снижение капитальных затрат на электролизеры, а также стоимости электроэнергии из ВИЭ.

При масштабировании производства электролизеров их стоимость может снизиться с текущих 1000 до 200 $/кВт к 2050 году, по оценке J. P. Morgan – даже до 100 $/кВт. При реализации такого сценария к 2050 году стоимость электролизеров может снизиться до уровня менее 2 $/кг. Но с учетом применения различных программ государственного субсидирования водородной энергетики эти сроки могут быть сокращены.

Стоимость производства зеленого водорода по странам к 2050 году, евро за 1 кг

Аргентина	1,5
Австралия	1,25
Бразилия	1,25
Канада	1,5
Чили	1,25
Китай	1,25
Франция	2
Германия	2,25
Индия	1,25
Япония	2,75
Марокко	1,25
Польша	2,5
Россия	1,5

Источник: Statista

Горючесть. По сравнению с бензином, природным газом и пропаном, водород огнеопаснее в воздухе, малейшие трещины в баке могут привести к трагедии. Но некоторые критики заблуждаются, когда говорят, что с развитием водородной энергетики «мир сядет на огромную пороховую бочку». Поскольку водород очень легкий – примерно в 57 раз легче, чем пары бензина, – он может быстро рассеиваться в атмосфере, и это положительный для безопасности фактор.

Хранение и транспортировка. Так как водород – самый легкий среди химических элементов, в заданном объеме его помещается значительно меньше, чем других видов топлива. Например, потребуется гораздо больший баллон с газообразным водородом, чтобы проехать заданное расстояние на автомобиле. Существующие бензобаки при этом слишком малы, чтобы вмещать количество водорода, которое необходимо для расстояния, которое покроет полный бензобак. Для решения этой проблемы сейчас модернизируют способы перевода водорода в жидкое или газообразное состояние. Его необходимо либо охладить до –253 °С, чтобы сжижать, либо сжать до давления, в 700 раз превышающего атмосферное, чтобы его можно было доставить в виде сжатого газа.

В настоящее время водород транспортируется по специальным трубопроводам, в автоцистернах для низкотемпературных жидкостей, в трубчатых прицепах, перевозящих газообразный водород, по железной дороге или на баржах.

В свою очередь, правительства стран уже сейчас «бронируют» будущие объемы водородного сырья, проводя переговоры и подписывая соответствующие международные соглашения. В качестве примеров

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

можно привести германо-марокканское Соглашение о сотрудничестве в сфере зеленого водорода в июне 2020 года, японо-австралийское Совместное заявление о сотрудничестве в сфере водорода и топливных ячеек в январе 2020 года и российско-германскую Декларацию о намерениях по сотрудничеству в сфере устойчивой энергетики.

Производство

В водородной энергетике большой выбор компаний. Крупнейшие представители – это производители водорода, которые в основном используют самый дешевый метод производства – паровой риформинг. Небольшие компании сосредоточены исключительно на конкретных аспектах использования водорода. Их в основном можно разделить на производителей электролизеров и производителей топливных элементов. Некоторые компании работают над тем, чтобы стать полностью вертикально интегрированным поставщиком водородной энергетики. Разберем каждую категорию отдельно.

Производители водорода

Air Products. Основное направление деятельности компании Air Products – производство атмосферных и технологических газов и сопутствующего оборудования для различных отраслей, включая нефтепереработку, нефтехимию и металлургию.

Компания в 2020 году объявила о планах строительства завода по производству экологически чистого водорода в Саудовской Аравии, работающего на ветряной и солнечной энергии мощностью 4 ГВт, – сейчас это крупнейший в мире проект. Завершенный завод будет производить 650 тонн зеленого водорода ежедневно, чего достаточно для работы около 20 тысяч автобусов.

Linde – одна из крупнейших в мире компаний, специализирующихся в области промышленных технологий по подготовке, разделению и сжижению природного газа. В 2021 году компания объявила, что подписала долгосрочное соглашение с Infineon Technologies о производстве и хранении экологически чистого водорода. Linde будет строить, владеть и эксплуатировать двухмегаваттный электролизный завод в Австрии. Завод будет производить зеленый водород с использованием технологии протонообменной мембраны (PEM) от ITM Power.

Cummins представила водородную стратегию в ноябре 2020 года. В 2019 году компания приобрела Hydrogenics, в результате чего получила технологию производства топливных элементов и электролизеры.

Все это большие компании с большим опытом в области промышленного газа. Их основное внимание сегодня уделяется серому водороду, но они также переходят на более чистые решения. Акции этих компаний привычно растут вместе с рынком, и можно говорить, что среди остальных представителей они разумно оценены.

Сравнительные показатели компаний, млрд долларов

	Рыночная капитализация	Выручка в 2020 году	P / E	P / S
Air Products (APD)	61,68	8,86	29,59	6,97
Linde (LIN)	132,41	27,05	52,72	4,69
Cummins (CMI)	36,49	19,56	21,59	1,88

Источник: отчеты компаний

Компании по производству топливных элементов

Ballard Power Systems специализируется на интеграции топливных элементов в автобусы и грузовики. Ballard предоставляет системы топливных элементов для других компаний, которые интегрируют их в свои автомобили.

Bloom Energy производит сервера на топливных элементах, они представляют собой стационарные энергосистемы, в основном предназначенные для резервного питания. Предприятие также производит электролизеры и представило водородную стратегию в июле 2020 года.

FuelCell Energy работает в том же секторе, что и Bloom Energy. Производит электростанции на базе стационарных топливных элементов.

Plug Power стремится стать крупным производителем экологически чистого водорода. Компания приобрела предприятия по производству собственных электролизеров и водородных заправочных станций. Plug Power работает с производителями экологически чистой энергии Brookfield Renewable Partners (BEP) и Apex Clean Energy над строительством водородных заводов. Компания строит общенациональную сеть экологически чистого водорода.

PowerCell Sweden производит топливные элементы в основном для транспортных систем. У компании заключена сделка с Bosch. Bosch может производить и продавать топливные элементы на основе дизайна PowerCell Sweden.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Сравнительные показатели компаний, млн долларов

	Рыночная капитализация	Выручка в 2020 году	P / S
Ballard Power Systems (BLDP)	10 430	117,65	72,10
Bloom Energy (BE)	6400	758,40	6,44
FuelCell Energy (FCEL)	5820	70,87	56,53
Plug Power (PLUG)	28 760	307,54	66,94
PowerCell Sweden (PCELF)	2750	10,31	266,12

Компании-производители электролизеров

Мы не будем подробно разбирать каждую из компаний, поскольку все они торгуются пока на внебиржевом рынке. Эти компании убыточны, поэтому сюда не включен коэффициент P / E.

Сравнительные показатели компаний, млн долларов

	Рыночная капитализация	Выручка в 2020 году	P / S
McPhy Energy (MPHYF)	1170	13,96	55,49
Nel ASA	5570	55,35	92,24
ITM Power (ITMPF)	450	6,31	594,46

Заключение

В 2020 году возобновляемые источники энергии пережили необычный бум популярности. Этому способствовали и год окончания правления республиканцев в США, и привлекательность ESG-инвестиций, а также мягкая кредитная политика. Все это создало экономически привлекательную среду для многих компаний в этой сфере.

Хотя существует множество вариантов инвестирования в экономику экологически чистого водорода, пока входить в рынок рискованно. Эти компании все еще растут, и им необходимо достичь больших масштабов, чтобы получать прибыль в будущем. Сегодня для инвестирования в водород важна хорошая база для выбора, основанная на деятельности, оценках, партнерах и менеджменте.

journal.tinkoff.ru

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

В России сделан прогноз о будущем мировой энергетики

Мировое потребление нефти к 2050 году снизится почти на 40 %, до 2,6 млрд тонн, а природного газа, наоборот, вырастет на 26 %, до 3,7 млрд тонн нефтяного эквивалента (ТНЭ). Такие данные приводятся Российским энергетическим агентством (РЭА) Минэнерго России в прогнозе развития мировой энергетики до 2050 года в сценарии «Рациональный технологический выбор» (РТВ). В РЭА этот сценарий считают базовым и наиболее вероятным.

Егор Алеев/ТАСС

Прогноз РЭА – первый отечественный глобальный прогноз развития мировой энергетики, сделанный не нефтяной компанией (был прогноз «Лукойла») после 2013 года. До этого был «Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года», выпущенный Институтом энергетических исследований РАН и Аналитическим центром при Правительстве РФ. Но он был сделан, как уточняет доцент Финансового университета при Правительстве РФ Валерий Андрианов, до начала агрессивного влияния на энергетику западной климатической повестки.

В 2013 году точкой отсчета для исследователей был глобальный спрос на энергоресурсы с учетом роста экономики и увеличения населения планеты. Именно эти показатели были одновременно и драйверами роста, и ограничителями спроса на энергоресурсы. Сегодня главный целевой показатель – объем выбросов от энергетики, приводящих к потеплению климата. И его приходится учитывать при составлении любых прогнозов развития мировой энергетики, поясняет эксперт.

Инфографика «РГ» / Александр Чистов / Сергей Тихонов

В базовом сценарии РЭА «ограничителем сверху» (то есть верхней планкой допустимого производства углеводородов) служат цели Парижского соглашения, а ограничителем снизу (нижней планкой) – доля инвестиций, которые мир может позволить себе направить на развитие альтернативной энергетики, чтобы заменить ископаемое топливо, отмечает Андрианов.

rg.ru

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

«ЕЭС-Гарант» и «Хевел» заключают первые крупные сделки по приобретению зеленых сертификатов в национальной системе

Энергосбытовая компания «ЕЭС-Гарант» заключает ряд сделок на приобретение для клиентов зеленых сертификатов на объем 220 млн кВтч, выработанных солнечными электростанциями «Хевел». Это может стать первой сделкой на рынке зеленых атрибутов с момента вступления в силу новых законодательных норм.

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

В Египте построят солнечную электростанцию 1 ГВт для алюминиевого завода

Египетская компания Egyptalum, крупнейший производитель алюминия в стране, подписала соглашение с норвежской энергетической компанией Scatec о создании солнечной электростанции мощностью 1 ГВт в целях производства электроэнергии для промышленного комплекса в Наг-Хаммади. Согласно договору, станция будет построена в две очереди, мощностью 500 МВт каждая.

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

Италия ввела в эксплуатацию более 5 ГВт мощностей солнечной энергетики в 2023 г.

Согласно информации итальянской ассоциации солнечной энергетики Italia Solare, в 2023 году в Италии было введено в строй 5,23 гигаватт (ГВт) фотоэлектрических солнечных электростанций. Это значительное увеличение по сравнению с предыдущими годами: например, в 2022 году прирост составил 2,48 гигаватт, а в 2021 году только 0,94 гигаватт.

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

Крупнейшие производители ветряных турбин в Китае в 2023 году

Исследовательская компания Bloomberg NEF (BNEF) опубликовала информацию о крупнейших производителях ветряных турбин в Китае, поставивших на внутренний рынок наибольшее количество установок в 2023 г. По данным BNEF, в прошлом году в Китае были установлены ветряные турбины общей мощностью 77,1 ГВт, на 58 % больше, чем 2022 году.

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

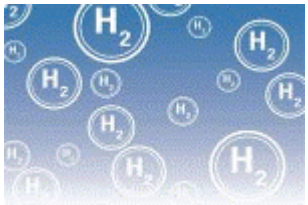
Aiko Solar объявила о новом рекорде эффективности солнечного модуля – 25,15 %

Китайская компания Aiko Solar совершила крупный прорыв в солнечной индустрии, достигнув рекордной эффективности своих фотоэлектрических панелей с «полным обратным контактом» (All Back Contact – ABC) в 25,15 %. Результат подтверждён немецким TÜV SÜD. Менее, чем год назад, в мае 2023 года, компания впервые продемонстрировала эффективность серийной солнечной панели в 24 %.

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Геологи сигнализируют о начале «золотой лихорадки» в добыче водорода из недр



Геологи сигнализируют о начале новой энергетической «золотой лихорадки». Пока все занимаются построением «водородной экономики», создавая капиталоемкие мощности по производству «зеленого» (электролиз) или «синего» (риформинг с CCS) водорода, ученые внезапно стали говорить, что водород вполне можно добывать из недр. Об этом пишет Файненшнл Таймс со ссылкой на американских геологов.

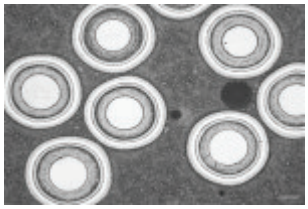
https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

Солнце, ветер, накопители – 94 % новых мощностей энергетики США, запланированных на 2024 год

Управление энергетической информации США (EIA) опубликовало прогноз ввода новых мощностей электроэнергетики на текущий год на основе планов энергетических компаний. В 2024 году в энергосистему США планируется добавить 62,8 гигаватт (ГВт) новых электрогенерирующих мощностей, на 55 % больше, чем в прошлом году, что указывает на «продолжающийся рост активности в отрасли».

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

Ученые Росатома завершили важный этап испытаний топлива высокотемпературного газоохлаждаемого реактора



Ученые Росатома успешно завершили очередной этап реакторных испытаний лабораторных образцов топлива для высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР).

https://www.in-power.ru/news/aes/

Производственные мощности завода «Хевел» будут увеличены почти вдвое

В ходе рабочей встречи глава Чувашии Олег Николаев и руководство компании «Хевел» обсудили итоги работы предприятия в 2023 году и результаты очередного этапа модернизации производства.

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

Построить на Дальнем Востоке 2 ГВт солнечной и ветровой генерации – «экономическое решение»

На форуме «Электроэнергетика России» в рамках Недели российского бизнеса РСПП выступил Федор Опадчий, председатель правления АО «СО ЕЭС» (Системного оператора Единой энергосистемы России). В своей презентации он среди прочего остановился на вопросах развития энергетики Дальнего Востока.

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Минприроды России: на Завитинское месторождение лития в Забайкалье пройдёт аукцион

Опубликовано распоряжение правительства России о проведении аукциона на месторождение лития Завитинское в Забайкальском крае. Стартовый платёж за пользование недрами – 1,059 миллиарда рублей. Сроки приёма заявок и дата аукциона будут прописаны в приказе Роснедр, который ведомство утвердит в ближайшее время. Месторождение известно ещё с 19 века.

https://www.in-power.ru/news/elektrotehnika/

Первая ветряная электростанция Республики Узбекистан производит электроэнергию, равную ежемесячному потреблению в 155 тыс. домохозяйств

Ветряная электростанция мощностью 500 МВт строится компанией из Объединённых Арабских Эмиратов «Masdar» в Томдинском районе Навоийской области. Как сообщалось ранее, первые 100 МВт этой электростанции были введены в эксплуатацию в декабре. Ветроэлектростанция за короткий период: выработано 31 млн 181 тыс.

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

В Индии введена в эксплуатацию первая очередь ветро-солнечного парка на 30 ГВт

В июле прошлого года председатель индийской AdaniGroup миллиардер Гаутам Адани (Gautam Adani) в своем выступлении на ежегодном общем собрании заявил, что группа планирует построить крупнейший в мире «энергетический парк, работающий на возобновляемых источниках энергии», в Хавде в индийском штате Гуджарат. Его мощность составит 20 гигаватт (ГВт).

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

В 2023 году Якутия увеличила выработку электроэнергии на 10,8 %

В 2023 году в Якутии выработано 11,8 млрд кВт ч электроэнергии, что на 10,8 % больше, чем в предыдущем году. При этом возобновляемыми источниками энергии выработано 0,5 млн кВт ч, что в 1,75 раза больше, чем в 2022 году – за счет введенных эксплуатацию 5 автоматизированных энергокомплексов в Верхоянском и Момском районах, в составе которых есть солнечные электростанции.

https://www.in-power.ru/news/novostitek/

Установлены 73 турбины на 2 строящихся ветряных электростанциях в Бухарской области

Компанией «ACWA Power» из Саудовской Аравии реализуются проекты по строительству 2-х ветряных электростанций мощностью по 500 МВт каждая (всего 1000 МВт) в Пешкунском и Гиждуванском районах Бухарской области. В рамках данного проекта устанавливаются ветряные турбины компании «Envision» (Китай), мощностью 6,5 МВт каждая. На сегодняшний день установлены 73 турбины общей мощностью 474,5 МВт.

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Водородные проекты нефтяных монархий: план и факт

Интересный материал о водородных планах стран Ближнего Востока опубликовало издание Hydrogen Insight. Многие из государств региона, которые заработали свое состояние на нефти и газе, рассчитывают, что смогут продолжать снабжать своих клиентов в Европе и Азии, которые обязались сократить выбросы парниковых газов, заменив поставки традиционных сырьевых ресурсов водородом.

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

Крупнейшие поставщики солнечных панелей в мире в 2023 году

Компания InfoLink опубликовала рейтинг крупнейших производителей (поставщиков) солнечных модулей в 2023 году. Общий объем поставок участников рейтинга вырос на 78 % по сравнению с 2022 годом. «Большая четверка» поставщиков осталось прежней и упрочила свои позиции. Каждая из этих компаний реализовала не менее 60 ГВт солнечных модулей.

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

В США ввели в эксплуатацию крупнейший накопитель энергии емкостью 3287 МВт*ч

В конце прошлого месяца в США ввели в эксплуатацию крупнейшую систему накопления энергии (СНЭ), проект Edwards & Sanborn (E&S), емкостью 3287 МВт*ч. На объекте использованы литий-ионные батареи производства LG Chem, Samsung и BYD.

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

Камчатскэнерго ведет разработку новых производственных скважин для Мутновских ГеоЭС

В районе Мутновских ГеоЭС филиала «Возобновляемая энергетика» ПАО «Камчатскэнерго» (входит в Группу РусГидро) ведутся работы по бурению новой скважины ГЕО-10. Предполагается, что летом новая добычная скважина будет готова к эксплуатации, после чего начнется разработка скважины ГЕО-11. В настоящее время пробурено 250 м, предполагаемая глубина добычной скважины составит около 2000 м.

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

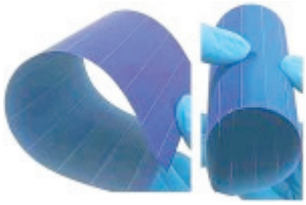
АО «Узбекгидроэнерго» объявляет тендер на строительство 5 новых гидроэлектростанций общей мощностью 46,6 МВт

В целях покрытия растущего спроса на электроэнергию в Республике Узбекистан реализуется масштабная стратегия использования возобновляемых источников энергии с целью налаживания экономичного и экологически чистого производства.

https://www.in-power.ru/news/ges/

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Китайцы разработали гетероструктурный солнечный элемент, который тоньше листа бумаги



Специалисты из китайского Университета науки и технологий Цзянсу, компании Longi Green Energy Technology и Университета Кертина в Австралии создали сверхтонкий фотоэлектрический гетероструктурный (HJT) элемент (ячейку) с высокими показателями эффективности и отношения мощности к массе.

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

В КНР планируется производство тандемных солнечных элементов годовой мощностью 7 ГВт

Китайская компания Hiking PV (Shenzhen Heijing Optoelectronic Technology Co., Ltd) подписала соглашение о реализации проекта по производству тандемных солнечных элементов из кремния и перовскита мощностью 7 ГВт.

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

Участок под «ВЭС Свирица» приобретет статус земель под промышленную застройку

17 января 2024 года состоялась встреча руководства ООО «Ветропарк» с губернатором Ленинградской области А. Ю. Дрозденко. По итогам встречи принято решение о запуске процедур перевода земельного участка, отведённого для реализации проекта «ВЭС Свирица», в категорию земель промышленного назначения.

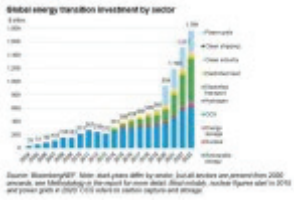
https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

Установленная мощность солнечной энергетики Китая достигнет 780 ГВт к концу 2024 г.

Согласно информации, опубликованной Электроэнергетическим Советом Китая (CEC), установленная мощность солнечной энергетики КНР в 2024 году достигнет 780 гигаватт (ГВт), а ветроэнергетики 530 ГВт. Общая установленная мощность электроэнергетики Китая увеличится за год на 12 % и достигнет примерно 3250 ГВт.

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

Инвестиции в энергетический переход достигли рекордного уровня в 2023 году

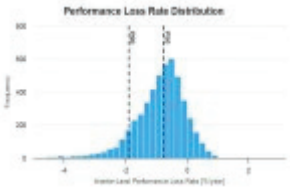


Исследовательская компания Bloomberg NEF (BNEF) опубликовала очередной выпуск своего ежегодного доклада об инвестициях в «новую энергетику» «Energy Transition Investment Trends». Согласно новому отчету, глобальные инвестиции в «низкоуглеродный энергетический переход» в 2023 году составили 1,77 трлн долларов США. Это новый рекорд, который на 17 % превышает показатель 2022 года.

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

К вопросу деградации солнечных панелей



Исследовательская группа из Национальной лаборатории возобновляемых источников энергии (NREL) при Министерстве энергетики США изучила деградацию модулей на крупномасштабных фотоэлектрических солнечных электростанциях по всей территории Соединенных Штатов в период с 2008 по 2022 год.

https://www.in-power.ru/news/alternativnayaenergetika/

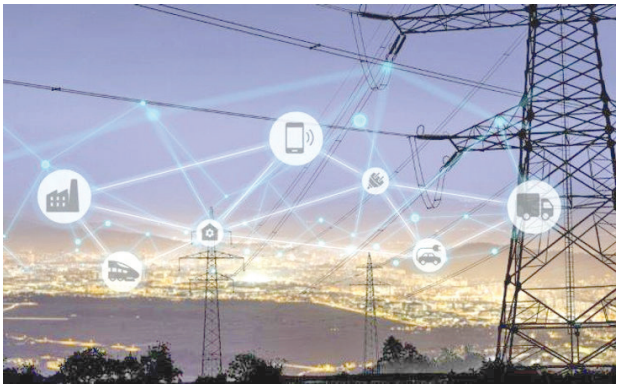
Сделка с солнцем: в Эстонии впустую потратили деньги на альтернативную энергетику

Эстония, как и другие страны Евросоюза, привержена к проведению «зеленой» политики. Однако не везде она успешна: в Йыхвиской волости снесли простаивавший два года солнечный парк.

Латвия, Литва и Эстония постепенно заменяют традиционные источники электроэнергии на альтернативные – ресурсы, которые получают благодаря использованию гидроэнергии, энергии ветра и солнца, геотермальной энергии. Такова директива ЕС.

baltnews.com

Прорывные бестопливные энерготехнологии и ИИ – будущее энергетики



Вопрос о влиянии жизнедеятельности человека на процесс глобального потепления вызывает серьёзные дискуссии в научной среде, но какие бы причины не вызывали повышение среднегодовой температуры, эти процессы могут привести к непоправимым последствиям. Именно поэтому любые мероприятия по сокращению выбросов парниковых газов в атмосферу, безусловно, имеют положительное значение.

Ежегодно растущий спрос на электроэнергию и размещение объектов солнечной и ветрогенерации в основном в наиболее оптимальных для этого местах, из-за зависимости генерируемой мощности от погодных условий требует реконструкции и строительства новых сетей распределения электроэнергии.

Согласно расчетам норвежской консалтинговой компании Rystad Energy для ограничения глобального потепления на 1,8 градуса Цельсия потребуется инвестировать в сетевые распределительные мощности в мире 3,1 триллиона USD до 2030 года. Устаревшие сети распределения, не отвечающие современным требованиям, могут оказаться серьёзным препятствием на пути энергетического перехода.

www.neutrino-energy.info

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Ежемесячный рецензируемый и реферируемый ПОЛНОЦВЕТНЫЙ международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE)

ПУБЛИКАЦИИ ОСУЩЕСТВЛЯЮТСЯ НА БЕСПЛАТНОЙ ОСНОВЕ

Правила публикации и порядок прохождения процедуры рецензирования, реферирования, экспертизы и публикации (2016-2023 годы)

Утверждено 25.11.2016 г.
Редакция № 2

Утверждено 20.03.2023 г.
Редакция № 3

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

СПРАВКА О ЖУРНАЛЕ

Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISSN 1608-8298, Российская Федерация, Башкортостан) – один из крупнейших в мире научных журналов в области альтернативной энергетики и экологии, *орган* Международной ассоциации водородной энергетики (IAHE) и Международной ассоциации альтернативной энергетики и экологии (IAAEE).

Учредителем журнала является Научно-технический центр «TATA» по лицензионному договору с основателем журнала академиком Королевской академии наук и искусств Сербии Гусевым Александром Леонидовичем.

Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» издаётся с 2000 года; в 2015 году отпраздновал своё пятнадцатилетие.

За короткий срок достигнуты высокие результаты. Опубликовано более 400 выпусков журнала, содержащих около 5000 статей известных учёных из более, чем 50 стран мира.

Журнал публикует рукописи на русском и английском языках (на языке оригинала). Все статьи публикуются в переводной (ISJAEE) и английской версии журналов: International Journal of Hydrogen Energy (IJHE) и Solar Energy (Elsevier).

На страницах журнала печатаются сообщения об оригинальных и ранее не опубликованных исследованиях в области физико-математических, технических и химических наук по группам специальностей: физика, кинетика и катализ, экология (по отраслям: технические и химические науки), авиационная и ракетно-космическая техника, энергетика, авторами которых являются члены Российской академии наук, а также члены других академий и видные учёные зарубежных стран.

Кроме того, в работе журнала принимают участие научные работники учебных институтов, университетов и научно-исследовательских институтов страны. Рассчитан на специалистов в области физико-математических наук, технических и химических наук.

В 2000 году редколлегия журнала выступила инициатором создания Национальной ассоциации водородной энергетики (NHEA RF) и в 2003 году принимала активное участие в её создании. С тех пор редколлегия журнала активно взаимодействует с Национальной ассоциацией водородной энергетики РФ и её органами управления.

Журнал является организатором серии Международных и Российских научных форумов, таких как международные конгрессы: WCAEE-2023, WCAEE-2022, WCAEE-2020, WCAEE-2006 (около 1000 участников из 18 стран мира); международные симпозиумы: IFSSEHT-2022, IFSSEHT-2020, IFSSEHT-2000, IFSSEHT-2003 (собравший 350 участников из 12 стран), IFSSEHT-2006; международные конференции: ICHRSE-2006, ISHSR-2006, ICEEC-2020, ICEEC-2022, International Conference on Methane and Carbon Dioxide Capture Technologies-

WCAEE-MCDCT-2020, International Conference on Methane and Carbon Dioxide Capture Technologies-WCAEE-MCDCT-2023, Innovative Technologies of Hydrogen Production, Storage and Application – WCAEE-HPSA-2023, International Conference «Bioprocesses: Biohydrogen, Biomethane, Methanol-2023-WCAEE-BBBM-2023» и др.

Журнал выходит в свет один раз в месяц. Журнал переводится на английский язык под названиями:

- International Journal of Hydrogen Energy (IJHE);
- Solar Energy;
- International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE).

Английская версия нашего журнала IJHE имеет высокие наукометрические показатели глобальных индексов цитирования: Journal Metrics: Source Normalized Impact per Paper (SNIP): 1.424; SCImago Journal Rank (SJR): 1.338; Impact Factor: 2.930 (Thomson Reuters Journal Citation Reports 2014); 5-Year Impact Factor: 3.448 (Thomson Reuters Journal Citation Reports 2014).

Лучшие работы, опубликованные в Международном научном журнале «Альтернативная энергетика и экология» в области энергетики, публикуются в International Journal of Hydrogen Energy, а работы, представляющие интерес для Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» в переводном варианте публикуются из International Journal of Hydrogen Energy.

После того как английская версия статьи из ISJAEE (In Russian) опубликована в IJHE (In English), она автоматически включается в SCOPUS и Web of Science наряду со всеми статьями IJHE, а также в следующие системы индексации:

Indexed/Abstracted in:

- Chemical Abstracts (Online),
- Chemical Engineering and Biotechnology Abstracts (Online),
- Chimica,
- Compendex,
- Currents Abstracts,
- Current Contents,
- EnCompassLit,
- Energy * Power Abstracts,
- Inspec, PubMed,
- Referativnyi Zhurnal,
- Russian Academy of Sciences Bibliographies,
- Science Citation Index Expanded,
- TEMA-Technology and Management,
- Web of Science,
- The abstract and citation database SCOPUS.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Редакционная коллегия

Главный редактор:	Почетный главный редактор:
Главный редактор (Россия), академик Королевской Сербской академии наук и искусств Гусев Александр Леонидович, Научно-технический центр «ТАТА» Генеральный директор, Тел.: +7 (499) 113-67-99 Факс: +7(831-30)90708 e-mail: gusev@hydrogen.ru	Почетный главный редактор (США), Заместитель главного редактора, Академик, доктор Т. Н. Везироглу Международная ассоциация водородной энергетики 5794 SW 40 St. #303 Miami, FL 33155, USA info@iahe.org

Почетный главный редактор (Россия): Заместитель главного редактора, академик РАН, д.ф.-.м.н. Трутнев Юрий Алексеевич, ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ Тел.: +7(831-30)4-15-59 Факс: +7(831-30)4-57-72 e-mail: trutnev@vniief.ru	Почетный главный редактор (Россия): Заместитель главного редактора, Президент РАН академик РАН д.ф.-м.н. Фортов Владимир Евгеньевич Тел.: +7(499)938-0309 Факс: +7(495)954-3320 e-mail: fortov@ras.ru
Зам. главного редактора: Заместитель главного редактора (Франция) Профессор, доктор П. Сан-Грегуар Университет Тулон-Вара, Франция Phone : +33(0)6 75 64 02 29 e-mail: pstgregoire@gmail.com	Заместитель главного редактора (Россия): Академик РАН Алдошин Сергей Михайлович ИПХФ РАН Тел.: +7(495)9935707, +7(49652)21930 e-mail: sma@icp.ac.ru
Ответственный секретарь: к.ф.м.н. В.В. Назаров	

В редколлегию журнала входит около 300 человек из 50 стран мира.

Редакционная коллегия:

академик В. Е. Фортов, академик Ю. А. Трутнев, академик РАН Ю. А. Рыжов, академик В. Е. Накоряков, академик Н. Н. Пономарев-Степной, проф. Т. Н. Везироглу (США), д.т.н. В. В. Елистратов, д.т.н. О. С. Попель, академик А. С. Коротеев, академик С. М. Алдошин, профессор М. А. Прелас (США), проф. Е. Осава (Япония), академик Ж. -П. Концен (Бельгия), д.т.н. А. Я. Столяревский, проф. П. Сан-Грегуар (Франция), проф. Г. И. Исаков (Азербайджан), проф. О. Саламов (Азербайджан), д.х.н. проф. А. А. Гарибов (Азербайджан), проф. Э. Лунарска (Польша), проф. Ю. Шунман (Голандия), проф. Я. Клеперис (Латвия), проф. В. Ф. Гременок (Белоруссия), проф. В. А. Гольцов (Украина), чл.-корр. РАН Е. А. Гудилин, проф. О. Н. Сривастава (Индия), проф. А. Ю. Мэйланд (Норвегия), проф. Т. Гертиг (Германия), проф. И. Динсер (Саудовская Аравия), проф. А. Штейнфелд (Швейцария), проф. С. З. Ильяс (Пакистан), проф. С. А. Шатворян (Армения), проф. О. Л. Фиговский (Израиль), проф. Чезаре Марчетти (Италия), проф. Дж. Бокрис (США), академик НАН Армении В. М. Арутюнян, академик РАН А. Ю. Цивадзе, академик РАН В.В. Лунин, академик РАН В.Н. Пармон, проф. Д. Спаззафумо (Италия), академик М. Лутовац (Сербия), проф. доктор М.Д. Хэмптон (США), А. Р. Щекин (Украина), чл.-корр НАН В. Ф. Резцов (Украина), д.т.н. С. О. Кудря (Украина), д.х.н. Ю.П. Зайков, к.х.н. О.Н. Ефимов и другие.

Редакция:

Зав. редакцией – президент Международной ассоциации альтернативной энергетики и экологии, гл. редактор АЭЭ/ISJAEE Александр Леонидович Гусев; академик РАН Юрий Алексеевич Трутнев, проф., д.ф.м.н. Сергей Евгеньевич Щеклеин, проф., д.ф.м.н. Юрий Егорович Калинин; Президент МАВЭ проф., д-р Турхан Нейжат Везироглу, проф., д-р Емре А. Везироглу, д.т.н. Анатолий Яковлевич Столяревский; проф. Майкл Даглас Хэмптон, д.т.н. Виктор Васильевич Елистратов; д.т.н. Олег Сергеевич Попель; академик НАН Мишик Айразатович Казарян; Андрей Ростиславович Шекин; д.т.н. Олег Львович Фиговский, к.ф.м.н. Ольга Борисовна Баклицкая-Каменева, Алевтина Сергеевна Хазиева, Виктор Иванович Немышев, Александр Рудольфович Володько, к.х.н. Вера Владимировна Куршева, Наталья Николаевна Семенова, Ирина Борисовна Меркулова.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» включен в базы данных и индексируется в:

- Ulrich's Periodicals Directory (http://ulrichsweb.serialssolutions.com/login)
- Высшая аттестационная комиссия Министерства образования и науки РФ в Информации об изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования (по состоянию на 17 февраля 2016 года) (http://vak.ed.gov.ru/documents)
- Chemical Abstracts (Online)
(http://cassi.cas.org/)
- Научная электронная библиотека (http://elibrary.ru/)
- Российский индекс научного цитирования (ИМПАКТ-ФАКТОР В РИНЦ) (РИНЦ – 4830)
- SCIENCE INDEX - Интегральный показатель журнала в системе Science Index
- Электронный Каталог РГБ
(http://aleph.rsl.ru)
- Российская государственная библиотека (http://eds.b.ebscohost.com)

- ВИНИТИ-VINITI – Russian Academy of Science
- Электронный каталог научно-технической литературы ВИНИТИ (http://catalog.viniti.ru)
- The European Library
- WorldCat Identities Network (http://www.worldcat.org/)
- Google Scholar – (GS – 18000) – Академия GOOGLE (https://scholar.google.ru)
- Open Archives (http://www.openarchives.org/)
- Research Bible (http://www.researchbib.com/)
- Academic Keys (http://www.academickeys.com)
- Российский импакт-фактор (РИФ) (http://impact-factor.ru/katalog-zhurnalov/item/571-mezhdunarodnyj-nauchnyj-zhurnal-alternativnaya-energetika-i-ekologiya.html)
- International Scientific Journal «Life and Ecology». (РЕФЕРАТИВНЫЙ ЖУРНАЛ). Серия 50.
- Альтернативная энергетика и экология (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=50709)
- CROSS REF (DOI) (http://search.crossref.org/?q=1608-8298) (с 2014 г.)
- Киоскер (http://kiosker.ru)
- ЭБС IPRbooks (iprbookshop.ru)

Журнал зарегистрирован Международным центром ЮНЕСКО в 2000 г. (название: «Al'ternativnaâ ènergetika i ècologiâ», краткое название: «Al'tern. ènerg. ècol.»), ISSN 1608-8298.

Тематика журнала одобрена Международной ассоциацией водородной энергетики (МАВЭ) и Международным центром развития водородной энергетики Департамента по вопросам промышленного развития ООН (UNIDO-ICHET).

Текущие показатели журнала по данным Elibrary.ru:

http://elibrary.ru/titles_compare.asp?titleid=8395&ratingyear=2015&sortorder=0&order=0&pagenum=1

http://elibrary.ru/titles_compare.asp?rubriccode=440000&ratingyear=2014&sortorder=0&order=0&titleid=8395&pagenum=1

http://elibrary.ru/titles_compare.asp?rubriccode=870000&ratingyear=2014&sortorder=0&order=0&titleid=8395&pagenum=1

Данные по состоянию на 12.12.2016. Импакт-фактор РИНЦ с учётом переводной версии (2015) – 5,694; двухлетний импакт-фактор РИНЦ (2015) – 5,694. Индекс Хирша за 10 лет – 11; индекс Херфиндаля по организациям авторов – 261. Переводная версия журнала International Journal of Hydrogen Energy входит в Scopus и Web of Science, а также в международные базы данных. Транслитерация списка литературы по ISO 9:1995. Показатель Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» в рейтинге SCIENCE INDEX за 2015 – 10,254. Место Международного научного журнала АЭЭ в рейтинге SCIENCE INDEX за 2015 г. по тематике «Охрана окружающей среды. Экология человека» – 1. Место Международного научного журнала АЭЭ в рейтинге SCIENCE INDEX за 2015 г. по тематике «Энергетика» – 1. Место Международного научного журнала АЭЭ в общем рейтинге SCIENCE INDEX за 2015 г. – 7.

Время полужизни статей из журнала, процитированных в текущем году, составляет 3,1 года.

Журнал включен в каталоги: «Роспечать» (индекс 20487), Объединенный каталог «Пресса России. Российские и зарубежные газеты и журналы» (индекс 41935), Информнаука, МК-Переодика, «Урал-Пресс». Полные электронные версии статей представлены на сайте Научной электронной библиотеки http://e-library.ru, на сайте Международного научного журнала АЭЭ http://isjaee.com, а также на сайте Международного научного и образовательного портала «Водород» http://www.hydrogen.ru.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № ФС77-21881) от 14 сентября 2005 г.

Место Международного научного журнала АЭЭ в общем рейтинге SCIENCE INDEX за 2015 г. – 7; по тематике «Охрана окружающей среды. Экология человека» – 1; по тематике «Энергетика» – 1.

Транслитерация списка литературы осуществляется по ISO 9:1995.

Ссылки на данное издание приведены в журналах США, Китая, стран Европейского Союза. Практикуется публикация специальных выпусков и обзоров, посвященных отдельным научно-техническим проблемам в тематической области.

В области возобновляемой энергетики журнал является основным российским научным изданием, в котором публикуются статьи соискателей ученых степеней по техническим наукам.

Полные тексты в электронной версии можно приобрести в электронных библиотеках по адресам: Киоскер (http://kiosker.ru), Научная электронная библиотека (http://elibrary.ru/), ЭБС IPRbooks (iprbookshop.ru).

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Тематика Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» одобрена Международной ассоциацией водородной энергетики, редколлегией International Journal of Hydrogen Energy, а также UNIDO-ICHET.

Оригинальная тематика Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» полностью пересекается с тематикой International Journal of Hydrogen Energy и включает в себя: проблемы возобновляемой энергетики, невозобновляемой энергетики, экологически чистых энергетических технологий.

В сфере возобновляемой энергетики в журнале (ISJAEE) широко представлены: солнечная энергетика, в том числе, солнечно-водородная энергетика, ветроэнергетика, ветро-водородная энергетика, морская энергетика (энергия морских волн и морских течений), геотермальная энергетика, энергетика биомассы, малая энергетика, нетрадиционные источники возобновляемой энергии, энергокомплексы на основе возобновляемых источников энергии.

В сфере невозобновляемой энергетики в журнале (ISJAEE) широко представлены: атомная энергетика, в том числе атомно-водородная энергетика; взрывная энергетика; термоядерная энергетика.

Отдельным большим разделом представлены технологии водородной экономики.

Представлены проблемы конструкционных материалов для альтернативной энергетики, в том числе для водородной энергетики.

Рассматриваются термодинамические основы альтернативной энергетики, в том числе водородной энергетики.

В журнале большое внимание уделяется экологическим и экономическим аспектам энергетики.

Представлены проблемы создания новых транспортных экологических средств, энергосбережения, а также проблемы нефтегазового комплекса в свете внедрения новейших экологически чистых технологий, в том числе, водородных технологий.

В журнале представлены проблемы агропромышленного комплекса, в том числе, проблемы сохранения почв, водных ресурсов, воздушной среды за счет широкого внедрения экологически чистых энергетических технологий, водородных энергетических технологий.

Краткие сообщения по каждой статье, опубликованной в базовом журнале, публикуются в Международном научном журнале «Письма в «Альтернативную энергетику и экологию» (на русском языке) (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=9987) и на английском языке в LETTERS IN INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL FOR ALTERNATIVE ENERGY AND ECOLOGY.

Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» одобрен ООН. Главный редактор включен в числе двух представителей от России в Центр развития водородных технологий при департаменте промышленного развития ООН.

Журнал четырежды удостоен денежной премии Президента Международной ассоциации водородной энергетики (IAHE) профессора Т. Н. Везироглу в 2000 г., 2003 г., 2014 г., 2016 г. В 2016 году журнал награжден высшей международной наградой IAHE – Международной Премией IAHE Jules Verne Award http://www.iahe.org/awards.asp

Деятельность Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» отмечена многими международными научными наградами, в том числе, Серебряной медалью Рентгена (2007 г.), Дипломом Фонда им. В. И. Вернадского и Комитета по экологии Государственной Думы ФС РФ (2007 г.), Премией Российский Энергетический Олимп (2008 г.) и другими международными научными наградами.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

I. Общие положения

Цели и задачи

Целью журнала является разработка, формирование, развитие и корректировка основных научных перспективных тематических направлений, тематических разделов, тематических секций журнала; обеспечение условий формирования оптимального целевого научного потока рукописей научных статей и научных обзоров, имеющих максимальную актуальность и соответствующих тематике журнала; публикация научных статей, научных обзоров, информационных сообщений, научных заметок, кратких писем о крупных научных исследованиях и инновациях в сфере экологически чистой энергетики и экологии; обеспечение партнерства ученых Востока (русскоязычная научная аудитория) и Запада (англоязычная научная аудитория) в области физико-математических, технических и химических наук по группам специальностей: физика, кинетика и катализ, экология (по отраслям: технические и химические науки), авиационная и ракетно-космическая техника, энергетика, авторами которых являются члены Российской академии наук, а также члены других академий и видные ученые зарубежных стран.

Основное назначение журнала заключается, прежде всего, в публикации сообщений о крупных научных исследованиях и инновациях в сфере экологически чистой энергетики и экологии, имеющих приоритетный характер.

Важнейшей задачей журнала является освещение приоритетов государственной политики: формирование межотраслевой информационной площадки для популяризации опыта создания как экологически безопасных регионов, так и отдельных предприятий с экологически безопасным производством.

Рецензирование

Все научные статьи, поступившие в редакцию журнала Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), проходят обязательное двойное слепое рецензирование (рецензент не знает авторов рукописи, авторы рукописи не знают рецензентов).

Каждая рукопись подвергается обязательному рецензированию одного рецензента из числа рецензентов Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» и одного рецензента из числа приглашенных редколлегией.

Каждая статья проходит этап предварительного рецензирования и итогового рецензирования.

В случае возникновения спорных ситуаций по научным вопросам рукопись передается на рассмотрение в Совет рецензентов Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология». В случае возникновения спорных ситуаций по возможности технического воплощения идеи, изложенной в рукописи, последняя передается в Совет экспертов Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология».

Рецензирование статей осуществляется членами редакционного совета и редакционной коллегии, а также приглашенными рецензентами – ведущими специалистами в соответствующей отрасли России и других стран. Решение о выборе того или иного рецензента для проведения экспертизы статьи принимает главный редактор, заместитель главного редактора, научный редактор, заведующий редакцией. Срок рецензирования составляет 5–6 месяцев, но по просьбе рецензента он может быть продлен. Срок прохождения рецензирования, экспертизы и публикации рукописи не может превышать 12 месяцев. По письменной рекомендации одного из членов научного совета срок рецензирования и публикации рукописи может быть сокращен до 4 месяцев. Срок рассмотрения статей тех авторов, которые оформили годовую подписку на журнал, сокращается до 3-х месяцев (но не менее 1-го месяца).

Срок публикации рукописей, направленных на конкурс, проводимый Редколлегией, не превышает 3 месяцев. Срок публикации заказных научных обзоров не превышает 3 месяцев.

Каждый рецензент имеет право отказаться от рецензии в случае наличия явного конфликта интересов, отражающегося на восприятии и интерпретации материалов рукописи.

По итогам рассмотрения рукописи рецензент даёт рекомендации о дальнейшей судьбе статьи (каждое решение рецензента обосновывается):

– статья рекомендуется к публикации в настоящем виде;
– статья рекомендуется к публикации после исправления отмеченных рецензентом недостатков;
– статья нуждается в дополнительном рецензировании другим специалистом;
– статья не может быть опубликована в журнале.

Если в рецензии содержатся рекомендации по исправлению и доработке статьи, редакция журнала направляет автору текст рецензии с предложением учесть их при подготовке нового варианта статьи или аргументировано (частично или полностью) их опровергнуть. Доработка статьи не должна занимать более 2 месяцев с момента отправки электронного сообщения авторам о необходимости внесения изменений. Доработанная автором статья повторно направляется на рецензирование.

В случае отказа авторов от доработки материалов они должны в письменной или устной форме уведомить редакцию о своем отказе от публикации статьи. Если авторы не возвращают доработанный вариант по истечении 3 месяцев со дня отправки рецензии, даже при отсутствии сведений от авторов с отказом от доработки статьи, редакция снимает её с учета. В подобных ситуациях авторам направляется соответствующее уведомление о снятии рукописи с регистрации в связи с истечением срока, отведенного на доработку.

Если у автора и рецензентов возникли неразрешимые противоречия относительно рукописи, редколлегия вправе направить рукопись на дополнительное рецензирование. В конфликтных ситуациях решение принимает главный редактор на заседании редакционной коллегии или в дистанционном режиме.

Решение об отказе в публикации рукописи принимается на заседании редакционной коллегии в соответствии с рекомендациями рецензентов. Статья, не рекомендованная решением редакционной коллегии к публикации, к повторному рассмотрению не принимается. Сообщение об отказе в публикации направляется автору по электронной почте.

После принятия редколлегией журнала решения о допуске статьи к публикации редакция информирует об этом автора и указывает сроки публикации.

Наличие положительной рецензии не является достаточным основанием для публикации статьи. Окончательное решение о публикации принимается редакционной коллегией. В конфликтных ситуациях решение принимает главный редактор.

Итоговое рецензирование

После этапа предварительного рецензирования (см. далее) материалы рукописи выкладываются на закрытом электронном ресурсе с правом доступа ограниченного круга лиц из числа Международного научного совета или ограниченный круг лиц из числа Международного научного совета извещается специальным бюллетенем о

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

материалах рукописей, принятых к публикации и получивших оценки рецензентов и экспертов. На этапе итогового рецензирования (срок до 30 дней) результаты предварительного рецензирования могут быть пересмотрены Международным научным советом, о чем в течение 15 дней извещается автор-корреспондент.

Оригиналы рецензий хранятся в редакции журнала в течение 3 лет.

Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» получает гораздо больше статей, чем может опубликовать. Поэтому мы просим рецензентов учитывать, что каждая принятая статья означает, что другая хорошая статья может быть отвергнута. Для того чтобы появиться на страницах Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология», статья должна отвечать четырем основным условиям:

- Иметь убедительные доказательства, подтверждающие умозаключения автора.
- Обладать новизной.
- Представлять интерес для ученых данной области.
- В идеале представлять интерес для исследователей других родственных дисциплин.

Редколлегия изучает все полученные рукописи. Для того чтобы сэкономить время авторов и рецензентов, на рецензирование направляются только те статьи, которые отвечают редакционным критериям. Те статьи, которые, по мнению редакторов, не представляют интереса или не подходят по другим причинам, отсеиваются без проведения рецензирования (эти решения могут основываться на неформальном совете от специалистов в данной области).

Выбор рецензентов

Выбор рецензентов очень важен для процесса публикации, и мы делаем выбор, основываясь на многих факторах, таких как экспертиза, репутация, особые рекомендации и собственный опыт работы с редактором. Например, мы стараемся не обращаться к людям, которые медленно работают, не уделяют должного внимания работе или не обосновывают свои взгляды. Мы проверяем потенциальных рецензентов перед отправкой рукописей на рецензирование. Рецензенты должны понимать, что данные сообщения содержат конфиденциальную информацию и относиться к ней соответственно.

Написание рецензии

Основная цель рецензирования – представить редактору объективную информацию для принятия решения. Рецензия также должна содержать рекомендации авторам по улучшению статьи для публикации. Негативная рецензия должна в максимальной степени указывать авторам на слабые места рукописи, чтобы авторы, чьи работы были отвергнуты, понимали, на чем было основано решение, и увидели, что можно сделать, чтобы улучшить рукопись. Эта функция второстепенна, поэтому рецензенты не обязаны предоставлять авторам, чьи статьи не отвечают условиям журнала, детальное, конструктивное обоснование. Если рецензент считает, что рукопись не годится для публикации, его/ее ответ автору должен быть такого объема, чтобы автор понял причину отказа.

Плата за публикацию

Публикация в журнале для авторов бесплатна. Редакция не взимает плату с авторов за рецензирование, размещение и печать научных материалов.

Политика размещения препринтов и постпринтов

В процессе подачи статьи автору необходимо подтвердить, что статья не была опубликована или не была принята к публикации в другом научном журнале. При ссылке в Интернете на опубликованную в журнале Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE) статью издательство просит размещать ссылку (полный URL материала) на официальный сайт журнала.

К рассмотрению допускаются статьи, размещенные ранее авторами на личных или публичных сайтах, не относящихся к другим издательствам.

Помощь авторам

1) Коррекция английской версии и перевод статей с русского языка на английский:

профессиональный переводчик, аттестованный Объединенной редакцией Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» и International Journal of Hydrogen Energy (IJHE),

Назаров Кирилл Вадимович

Сертификат № ISJAEE-100-001-15 (утвержден почетным гл. редактором International Journal of Hydrogen Energy (IJHE) и гл. редактором Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология»); электронная почта: 274427@mail.ru;

2) Создание схем и рисунков: художник-дизайнер

Немышев Виктор Иванович; электронная почта: vinsar36@mail.ru;

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

3) Полная переработка русскоязычного текста:
редактор:
Хазиева Алевтина Сергеевна; электронная почта: alevtinakhazieva@yandex.ru

Обеспечение принципа международного представительства *(расширение географии и представительства государств и организаций в работе журнала и международного разнообразия)*

Организация может представить не более 15 публикаций в год, но если среди авторского коллектива будут представлены другие организации, то количество публикаций может быть увеличено для каждой организации дополнительно по числу партнерских российских и зарубежных организаций, представленных в авторском коллективе.

Гарантии Редакции

Автор или авторский коллектив (независимо от того, являются ли они подписчиками или нет) публикуются в нашем журнале с бесплатным оказанием услуг по рецензированию и публикации русскоязычной версии.

1. Статья публикуется в полноцветном варианте.

2. По просьбе авторов (автора) может быть осуществлено переиздание статьи на английском языке в случае одобрения совместной редакционной группой *партнерских переводных журналов IJHE (США), Solar Energy (США), Возобновляемая энергетика (Украина) и других родственных по тематике зарубежных журналов:*

- *в IJHE (США) (для статей по водородной энергетике);*
- *в Solar Energy (США) (для статей по солнечной энергетике);*
- *в «Возобновляемой энергетике» (Украина) (для статей по возобновляемой энергетике);*
- *в Applied Solar Energy (ASE, Uzbekistan) (для статей по солнечной энергетике).*

3. В случае принятия авторской статьи совместной редакционной группой *партнерских переводных журналов: International Journal of Hydrogen Energy (IJHE, USA) [Elsevier], Solar Energy (SE, Canada) [Elsevier], Возобновляемая энергетика (Украина), Applied Solar Energy (ASE, Uzbekistan) [Springer]и других родственных по тематике зарубежных журналов в течение недели после передачи для рассмотрения будет выдана Справка о приеме статьи для рассмотрения публикации в переводных журналах, утвержденная объединенной Рабочей группой.*

4. В случае одобрения авторской статьи совместной редакционной группой *партнерских переводных журналов International Journal of Hydrogen Energy (IJHE, USA) [Elsevier], Solar Energy (SE, Canada) [Elsevier], Возобновляемая энергетика (Украина), Applied Solar Energy (ASE, Uzbekistan) [Springer]и других родственных по тематике зарубежных журналов в течение недели после одобрения статьи будет выдана Справка о приеме статьи для публикации в партнерском переводном журнале.*

5. Может быть осуществлена отправка в адрес Заказчика выпуска Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» с опубликованной статьей в количестве 2-х и более экземпляров по желанию авторов (экземпляры оплачиваются автором или авторским коллективом по сниженной на 50 % стоимости).

6. Редакция также берет на себя обязательства по выполнению следующих работ и услуг: рецензированию, экспертизе, реферированию в International Scientific Journal «Letters in ISJAEE» (на русском и на английском языках); реферированию в реферативном журнале InternationalScientific Journal «Life and Ecology»; индексированию в системе авторского индекса и тематики в завершающем год номере Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология»; предпечатной подготовке; изданию, распространению информации на русском и английском языке; присвоению Международного цифрового идентификатора (DOI); отправке печатных и электронных версий номера в организации учета, индексирования, реферирования информации в ВИНИТИ; реферирования информации в других реферативных изданиях; по отправке обязательных экземпляров журнала в Российскую книжную палату; отправке в национальные библиотеки (с которыми заключен Договор); распространению обязательного подписного печатного и электронного тиража подписчикам журнала.

Раздел 1. Порядок предварительного рецензирования

Каждая рукопись регистрируется ответственным секретарем редколлегии в реестре учета поступающих рукописей с присвоением четырехзначного номера, например, рег. № 0687 от 23 августа 2009 года (теперь регистрация проходит и через Интернет: http://www.isjaee.com/jour/user/register. В этом случае автору направляется письмо-уведомление). После регистрации рукописи в адрес автора-корреспондента направляется Приоритетная справка по форме Form 16 ISJAEE. Приоритетная справка уведомляет авторский коллектив о регистрации ру-

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

кописи. После рассмотрения рукописи главным редактором и редакцией сопроводительные материалы и рукопись передаются для проведения формальной экспертизы в соответствующее подразделение редакции Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология». В дальнейшей переписке авторы и редакция ссылаются на регистрационный номер.

Далее авторские материалы рукописи передаются в Совет рецензентов и Экспертный совет.

По завершении процедуры экстренного рецензирования и получения положительного решения Совета рецензентов и Экспертного совета статья будет опубликована в журнале.

Журнал публикует исключительно оригинальные статьи. Автор несет полную ответственность за соблюдение этого требования.

Раздел 2. Порядок представления рукописей

Для своевременного выхода журнала убедительно просим соблюдать следующие правила оформления рукописей:

1. Рукопись представляется только в электронном виде через сайт: http://www.isjaee.com/

Для тех авторов, кто представляет пакет документов по рукописи и саму рукопись впервые через сайт, необходимо зарегистрироваться на http://www.isjaee.com/jour/user/register

Логин и пароль необходимо сохранить для последующих действий при работе с рукописью в Личном рабочем кабинете автора (авторского коллектива).

После регистрации можно направить рукопись в электронном виде в редакцию через сайт по адресу: http://www.isjaee.com/jour/login?source=%2Fjour%2Fauthor%2Fsubmit

Для входа в свой рабочий Личный кабинет необходимо набрать логин и пароль со строгим соблюдением всех регистров и раскладок клавиатуры, которые были выбраны при регистрации. Система очень строго реагирует на любые ошибки при наборе, поэтому при воспроизведении логина и пароля должна соблюдаться строгая идентичность набора последовательности и конфигурации печатных знаков, которые определены Вами при регистрации.

Сканированная копия рукописи в PDF-форматее обязательно содержит подписи авторов.

2. Объем рукописей:
- краткие сообщения – до 3 страниц (1 страница = 1800 печатных знаков);
- объем статей, как правило, не должен превышать 5-7 страниц;
- письма в редакцию – до 4 страниц;
- объем научных обзоров – не более 15-18 страниц.

3. Рукопись сопровождается:

- сопроводительным письмом руководителя организации, представляющей рукопись; оформленным экспертным заключением или другим документом, разрешающим опубликование в открытой печати (1 экз.), утвержденным руководителем организации и заверенным гербовой печатью; экспертное разрешение представляют только авторы из России.

4. Текст аннотации (не менее 250 слов) на русском и английском языках печатается шрифтом Times New Roman (12 кегль) в одном файле в следующем порядке: наименование статьи, авторы, наименование организации, аннотация на русском языке; далее, через 2 строки, в той же последовательности – на английском языке. Аннотация излагается в индикативной форме, в состав аннотации в обязательном порядке должны входить: область исследования, теоретические положения, экспериментальные исследования, основные результаты работы, предполагаемые потребители результата.

5. Текст авторского резюме на русском и английском языках печатается шрифтом Times New Roman (10 кегль) и должен содержать: место работы, должность, образование, научное звание, ученая степень, награды и научные премии, профессиональный опыт, основной круг научных интересов, количество публикаций каждого из авторов. Желательно включить: ORCID, индекс Хирша, Research ID, SPIN и другие наукометрические показатели. Редакционная коллегия обращает внимание на важность представления в резюме ссылок на личные странички авторов в Research Gate, Mendeley и других социальных сетях данных ученых.

6. Фотографии авторов для резюме в формате TIFF или JPEG . Фотографии авторов представляются в обязательном порядке в цветном варианте.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

*Фото **обязательно** (лицо крупным планом) ФИО (полное на английском и русском)*	**Сведения об авторе:** степень, должность, место работы. **Образование:** вуз, год окончания. **Область научных интересов:** связь с тематикой журнала. **Публикации:** количество	**Information about the author: Education: Research area: Publications:**

7. Текст реферата (одна страница) для опубликования в реферативных журналах (РЖ) ВИНИТИ, «Письма в журнал «Альтернативная энергетика и экология» (на английском языке).

Параметры страницы:

- **формат** А4 (210х297 мм);
- **межстрочный интервал** полуторный;
- **шрифт** Times New Roman, (12 кегль) в одном файле в следующем порядке: наименование статьи, авторы, наименование организации, реферат на русском языке; далее, через 2 строки, в той же последовательности – на английском языке.

8. Интернет-сообщение для размещения сигнальной информации на сайтах Информационного портала «Водород» и на сайтах информационной сети, посвященной энергетике и экологии. Сообщение размером не более одной страницы излагается в произвольной форме:

- **формат** А4 (210х297 мм);
- **межстрочный интервал** полуторный;
- **шрифт** Times New Roman (12 кегль).

Сообщение может включать фотографии и графики.

Раздел 3. Оформление рукописи:

▪ редколлегия рекомендует авторам обзоров и статей структурировать представляемый материал, используя подзаголовки (например: ВВЕДЕНИЕ, ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ, МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ, ЗАКЛЮЧЕНИЕ, СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ).

▪ текст материала для публикации должен быть тщательно отредактирован автором, следует избегать повторов, не следует без необходимости подробно описывать иллюстративный материал;

▪ текст должен быть напечатан на белой бумаге:

- **формат** А4 (210х297 мм);
- **межстрочный интервал** полуторный;
- **шрифт** Times New Roman (12 кегль).

Рукопись может включать фотографии и графики.

Текст рукописей оформляется в следующей последовательности:

- **индекс универсальной десятичной классификации (УДК или PACS);**
- **название статьи на русском и на английском языке** (прописными буквами без кавычек, кегль 14 полужирный, выравнивание по центру; переносы не допускаются, точка в конце строки не ставится, подчеркивание не используется);
- **авторы** (инициалы, фамилия, кегль 14 полужирный курсив, выравнивание по центру, точка в конце строки не ставится)
- **название организации, адрес, город, страна, индекс, телефон, факс, e-mail** (кегль 12, выравнивание по центру. Если авторы представители различных организаций, то используется метод надстрочных ссылок, например: А. В. Иванов, Ю. С. Седов*);
- **заголовок раздела** (кегль 14, выравнивание по левому краю, точка не ставится);
- **текст статьи:** шрифт 12, абзацный отступ 0,5 см, выравнивание по формату;
- **подзаголовок** (шрифт курсивный, кегль 14, выравнивание по левому краю);
- **список литературы** (шрифт обычный, кегль 14, выравнивание по центру).

В списке литературы должны быть даны ссылки на работы отечественных и зарубежных авторов (как правило, на статьи из журналов, входящих в глобальные индексы научного цитирования), патенты – не менее 20 ссылок.

При написании статьи используются общепринятые термины, единицы измерения и условные обозначения, единообразные по всей статье. **Расшифровка всех (!) используемых авторами обозначений дается в таблице (список обозначений) в алфавитном порядке.**

При наборе статьи на компьютере все латинские обозначения физических величин (*A, I, d*, *h* и т. п.) набираются курсивом, греческие обозначения, названия функций (β, sin, exp, lim), химических элементов

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

(H_2O) и единиц измерения (МВт/см^2) – прямым (обычным) шрифтом. Символы (R, ℘, ⊗, ∈ и т. п.) оговариваются на полях рукописи.

Каждая рукопись в обязательном порядке должна содержать ***Список обозначений***.

Образец представления таблицы обозначений на русском языке

Список обозначений	
Буквы латинского алфавита	
G	Геометрия водопроводящего тракта
H	Напор ГЭС
ΔH	Потери напора
i	Расчётный час
Буквы греческого алфавита	
η	КПД гидроагрегата
φ	Потери энергии за счёт взаимовлияния ВЭУдруг на друга
Буквы русского алфавита	
Э	Выработка
Δ Э	Потери энергии
Нижние индексы	
ВЭС	Ветроэлектростанция

Таблицы, рисунки, фотографии (только цветные!!!) размещаются внутри текста и имеют сквозную нумерацию по статье (не по разделам!) и собственные заголовки. Буквенно-цифровая нумерация (1а, 2б) нежелательна. **Названия всех рисунков, фотографий и таблиц приводятся на русском и на английском языках!!!**

Нумерация обозначений на рисунках дается по порядку номеров по (против) часовой стрелки (для чертежей) или сверху вниз (снизу вверх). Файлы иллюстраций предоставляются в формате TIFF или BMP (максимальное качество) с разрешением не менее 300 dpi.

Формулы создаются с помощью встроенного редактора формул (Math Type, Microsoft Equation) с нумерацией в круглых скобках (2), выравниваются по центру; **расшифровка всех обозначений (букв) в формулах дается в порядке упоминания в формуле.**

Формулы должны быть аккуратно набраны на компьютере.

Во избежание недоразумений и ошибок редакция рекомендует авторам использовать в формулах буквы латинского, греческого и других (не русских) алфавитов.

Образец представления рисунков в рукописи

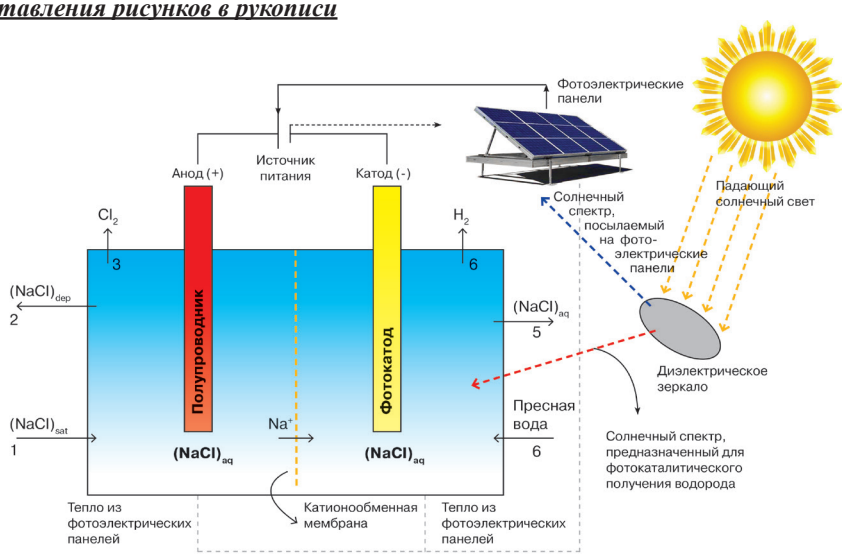


Рис. 1. Схематическое изображение комбинированного фотоэлектрохимического реактора непрерывного типа
Fig. 1. Schematic of the continuous hybrid photoelectrochemical reactor

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Образец преставления графиков в рукописи

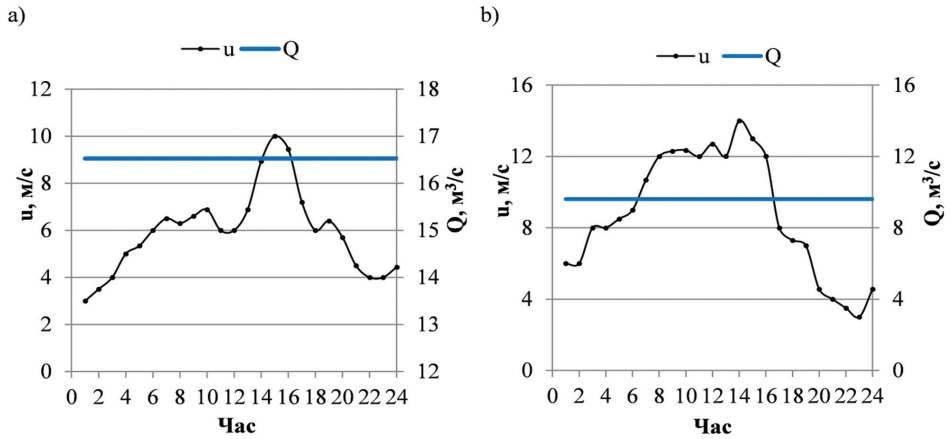


Рис. 1. Суточный ход скорости ветра и расходов реки: a – июнь, b – декабрь
Fig. 1. Wind speed and river flow daily variation: a – June; b – December

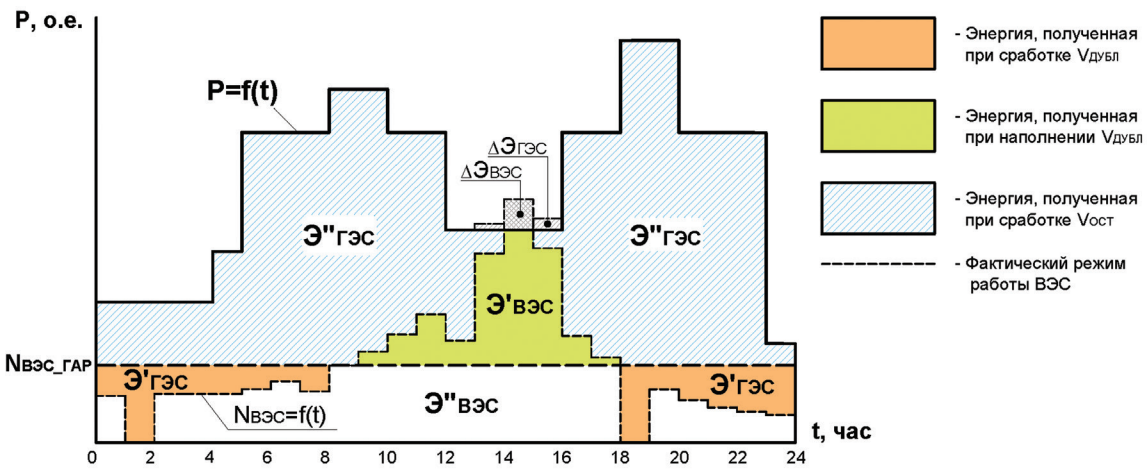


Рис. 1. Суточный график нагрузки и выработки энергии энергетическим комплексом ВЭС-ГЭС
Fig. 1. WPP/HPP power system daily-load and output curve

Образец представления формул в рукописи

$$\begin{cases} Э'_{ГЭС_i} = \dfrac{Э_{ВЭС_k}}{24} - Э_{ВЭС_i}, \text{ при } Э_{ВЭС_i} \le \dfrac{Э_{ВЭС_k}}{24}, \\ Э'_{ВЭС_i} = Э_{ВЭС_i} - \dfrac{Э_{ВЭС_k}}{24}, \text{ при } \dfrac{Э_{ВЭС_k}}{24} \le Э_{ВЭС_i}, \\ \sum\limits_{i=1}^{24} Э'_{ГЭС_i} = \sum\limits_{i=1}^{24} Э'_{ВЭС_i}, \end{cases} \quad (1)$$

(1)

где $Э_{ВЭС_k}$ – суточная выработка энергии ВЭС за расчётные сутки k.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Образец представления схем в рукописи

Рис. 1. Схема работы комбинированного реактора
Fig. 1. Schematic description of the hybrid reactor operating mechanism

Образец представления таблиц в рукописи

Таблица 4

Удельный массовый расход и концентрация растворов

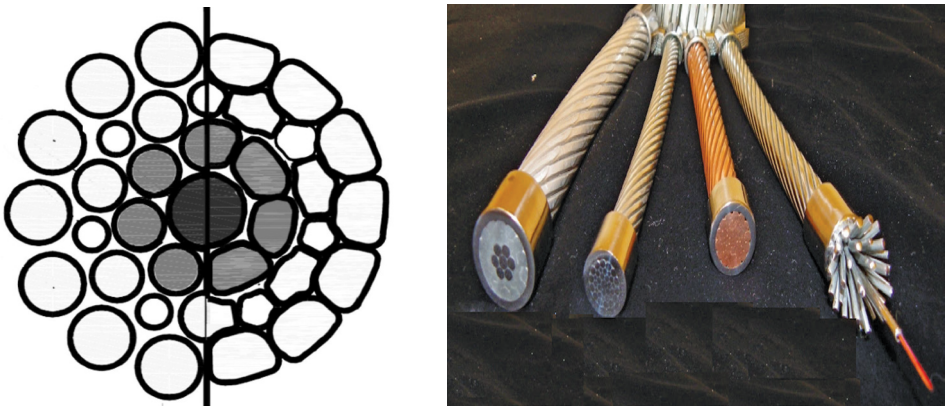
Table 4

Definitions, mass flow rates and solute concentrations

Поток	Описание	Удельный массовый расход (кг/с)	Концентрация (кг вещества/кг раствора)
1	Насыщенный раствор NaCl на входе	$\dot{m}_1$: входной, известен	x_{s1}: насыщенный раствор, известна
2	Раствор NaCl на выходе	$\dot{m}_2 = \frac{(1-x_{S1})}{(1-x_{S2})}\dot{m}_1$	x_{s2}
3	Хлоргаз на выходе	$\dot{m}_3 = 0,61\frac{(x_{S1}-x_{S2})}{(1-x_{S2})}\dot{m}_1$	
4	Пресная вода на входе	$\dot{m}_4 = \frac{0,68-0,35x_{S5}}{x_{S5}}\frac{(x_{S1}-x_{S2})}{(1-x_{S2})}\dot{m}_1$	
5	Раствор NaOH на выходе	$\dot{m}_5 = \frac{0,68}{x_{S5}}\frac{(x_{S1}-x_{S2})}{(1-x_{S2})}\dot{m}_1$	x_{s5}
6	Водород на выходе	$\dot{m}_6 = 0,02\frac{(x_{S1}-x_{S2})}{(1-x_{S2})}\dot{m}_1$	

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Образец оформления фотографий и элементов графики в рукописи



a *b*

Рис. 1. Внешний вид тросов. Разрез несущих тросов: *a*) круглой и *b*) компактированной формы
Fig. 1. Types of catenary wires: *a*) round and *b*) compacted

Оформление литературных ссылок (списка литературы):

Библиографические ссылки в списке литературы располагаются в той последовательности, в какой упоминаются в тексте [3], и оформляются по следующим правилам:

I. Описание книг

1. Книги одного, двух или трех авторов описываются под фамилией первого автора:

• книга одного автора:

Чадаева, Л.А. Квантовая механика: учебник для бакалавров / Л.А. Чадаева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2011. – 300 с.

• книга двух авторов:

Нехаев, Г.А. Металлические конструкции / Г.А. Нехаев, И.А. Захарова. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2010. – 140 с.

2. Книги четырех и более авторов указываются под заглавием (названием) книги. После названия книги, за косой чертой пишется фамилия одного автора и вместо следующих фамилий слово – [и др.].

3. Книги с коллективом авторов, или в которых не указан автор, указываются под заглавием (названием) книги. За косой чертой пишется фамилия редактора, составителя или другого ответственного лица.

Анализ и диагностика финансово-хозяйственной деятельности предприятия: учебник / под ред. В. Я. Позднякова. – М.: Инфра-М, 2010. – 617 с.

II. Описание статьи из журнала

При описании статей из журналов указываются автор статьи, ее название, затем за двумя косыми чертами указывается название журнала, в котором она опубликована, год, номер, страницы, на которых помещена статья.

• статья одного автора:

1. Панцхава, Е.С. Биогазовые технологии − радикальное решение проблем экологии, энергетики и агрохимии / Е.С. Панцхава // Теплоэнергетика. − 1994. − № 11. − С. 36–42.

• статья двух авторов:

2. Гелетуха, Г.Г. Обзор технологий газификации биомассы [Текст] / Г.Г. Гелетуха, Т.А. Железная // Экотехнологии и ресурсосбережение. − 1998. − № 2. − С. 21–29.

• статья четырех и более авторов:

3. Батенин, В.М. Пиролитическая конверсия биомассы в газообразное топливо / В.М. Батенин [и др.] // Доклады Академии наук. − 2012. − Т. 446. − № 2. − С. 179–182.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

III. Описание статьи из книг и сборников

• статья из книги одного автора:

Катуев, В.Д. Возобновляемая энергетика / В.Д. Катуев // Альтернативная энергетика: учебно-справочное пособие /В.Д. Катуев. – М., 2001. – С. 207–451.

• статья из книги двух авторов:

Безуглов, А.А. Президент Российской Федерации / А.А. Безуглов // Безуглов А.А. Конституционное право России: учебник для юридических вузов (полный курс): в 3-х т. / А.А. Безуглов, С.А. Солдатов. – М., 2001. – Т. 1. – С. 137–370.

• статья из книги трех и более авторов:

Григорович Ф.В. Солнечная энергетика / Ф.В. Григорьев // Григорьев Ф.В. Управление муниципальной недвижимостью: учебно-практическое пособие / Ф.В. Григорьев, М.А. Багун, Л.И. Михайлов. – М., 2003. – С. 200–302.

Программа водородной энергетики // Перспективы водородной энергетики / В.Г. Польман [и др.]; под ред. В.Г. Польмана. – М., 2005. – Гл. 3. – С. 56–130: табл.

IV. Описание официальных изданий

Конституция Российской Федерации: принята всенародным голосованием 12 декабря 1993 года. – М.: Эксмо, 2013. – 63 с.

Уголовный кодекс Российской Федерации. Официальный текст: текст Кодекса приводится по состоянию на 23 сентября2013 г. – М.: Омега-Л, 2013. – 193 с.

О проведении в Российской Федерации года молодежи: указ Президента Российской Федерации от 18.09.2008. № 1383 // Вестник образования России. – 2008. – № 20 (окт.). – С. 13–14.

V. Описание нормативно-технических и технических документов

ГОСТ Р 517721–2001. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Входные и выходные параметры и типы соединений. Технические требования. – Введ. 2002-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 27 с.

или

Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Входные и выходные параметры и типы соединения. Технические требования: ГОСТ Р 517721–2001. – Введ. 2002-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 27 с.

Пат. 2187888 Российская Федерация, МПК7 H 04 B 1/38, H 04 J 13/00. Приемопередающее устройство / Чугаева В. И.;заявитель и патентообладатель Воронеж. науч.-исслед. ин-т связи. – № 2000131736/09; заявл. 18.12.00; опубл. 20.08.02, Бюл. № 23 (II ч.). – 3 с.

VI. Описание электронных ресурсов

• диск

Даль, В. И. Толковый словарь живого великого языка Владимира Даля [Электронный ресурс] / В. И. Даль; подгот. по 2-му печ. изд. 1880–1882 гг. – Электрон. дан. – М.: АСТ, 1998. – 1 электрон. опт. Диск (CD-ROM).

• электронный журнал

Краснов, И.С. Методологические аспекты здорового образа жизни россиян [Электронный ресурс] / И. С. Краснов // Физическая культура: науч.-метод. журн. – 2013. – № 2. – Режим доступа: http://sportedu.ru. – (Дата обращения: 05.02.2014).

• сайт

Защита персональных данных пользователей и сотрудников библиотеки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.nbrkomi.ru. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 14.04.2014).

• Конструкции стальные строительные. Общие технические требования [Электронный ресурс]: ГОСТ 23118–2012. – Введ.2013-07-01. – Режим доступа: Система Кодекс-клиент.

• Об утверждении образца формы уведомления об обработке персональных данных [Электронный ресурс]: приказ Федеральной службы по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций от 17 июля 2008 г. № 08 (ред. от 18 февраля 2009 г. № 42). – Режим доступа: Система Гарант

Описание диссертаций и авторефератов диссертаций

• кроме фамилии автора и его инициалов следует указать название диссертации, степень, место защиты (город) и год; для препринтов – название, место издания, год, номер

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Горшкова Т. И. Термодинамические свойства и применение некоторых сплавов церия: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. М., 1976

Раздел 4. Правила представления электронной версии материалов

Автор (корреспондент) должен направить в адрес главного редактора (e-mail: gusev@hydrogen.ru) обязательный пакет электронных файлов.

Перечень обязательного пакета электронных файлов:

1. **Рукопись**.
Файл обозначается следующим образом (пример): **Article#1.Gusev AL. Hydrogen detectors. (1300)**
Где:
Article#1 – обозначает номер рукописи, присвоенный автором (рукописей может быть несколько на электронном носителе)
Gusev AL – фамилия первого автора и инициалы
Hydrogen detectors – первые два слова из названия рукописи
(1300) – номер тематического направления или тематической секции из **Тематики журнала** (приведена в конце каждого номера журнала).

2. **Аннотация.**
Файл обозначается следующим образом: **Summary#1.Gusev AL. Hydrogen detectors. (1300)**
Где:
Summary#1 – обозначает принадлежность аннотации к конкретной рукописи с номером
далее см. п. 1.

3. Реферат.
Файл обозначается следующим образом: **Abstract#1.Gusev AL. Hydrogen detectors. (1300)**
Где:
Abstract#1 – обозначает принадлежность реферата к конкретной рукописи с номером
далее см. п. 1.

4. Резюме.
Файл обозначается следующим образом: **Resume#1.Gusev AL. Hydrogen detectors. (1300)**
Где:
Resume#1 – обозначает принадлежность резюме к конкретной рукописи с номером
далее см. п. 1.

5. Рисунки.
Файл обозначается следующим образом: **Pictures#1.Gusev AL. Hydrogen detectors. (1300)**
Где:
Pictures #1 – обозначает принадлежность фотографий и рисунков к конкретной рукописи с номером
далее см. п. 1.

6. **Разрешение.**
Файл обозначается следующим образом: **Sanction#1.Gusev AL. Hydrogen detectors. (1300)**
Где:
Sanction#1 – обозначает принадлежность разрешения на право открытой публикации рукописи к конкретной рукописи с номером
далее см. п. 1.

7. **Интернет-сообщение.**
Файл обозначается следующим образом: **Internet#1.Gusev AL. Hydrogen detectors. (1300)**
Где:
Internet#1 – обозначает принадлежность **Интернет-сообщения** к конкретной рукописи с номером
далее см. п. 1.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

8. Соглашение

Файл обозначается следующим образом: **Agreement#1.Gusev AL. Hydrogen detectors. (1300)**

Где:

Agreement#1 – обозначает принадлежность PDF-версии Соглашения к конкретной рукописи с номером

далее см. п. 1.

9. Форма передачи рукописи и материалов для публикации – Form#1

Файл обозначается следующим образом: **Form#1.Gusev AL. Hydrogen detectors. (1300)**

Где:

Form#1 **– обозначает принадлежность PDF-версии Формы передачи рукописи и материалов для публикации (MANUSKRIPT TRANSMITTAL FORM) к конкретной рукописи с номером**

10. Фотографии

Файл обозначается следующим образом: **Fotos#1.Gusev AL. Hydrogen detectors. (1300)**

Где:

Fotos#1 – обозначает принадлежность фотографий к конкретной рукописи с номером

далее см. п. 1.

11. **Отзыв сторонней организации.**

В основном для демонстрации значимости работы и характера выполненных предварительных улучшающих изменений в соответствии с рекомендациями.

Файл обозначается следующим образом: **Reviews#1.Gusev AL. Hydrogen detectors. (1300)**

Где:

Reviews#1 – обозначает принадлежность PDF-версии рецензии к конкретной рукописи с номером, присвоенным автором (рукописей может быть несколько на электронном носителе),

далее см. п. 1.

12. **Ключевые слова**

Файл обозначается следующим образом: **Keywords#1.Gusev AL. Hydrogen detectors. (1300)**

Где:

Keywords#1 – обозначает принадлежность **списка ключевых слов** к конкретной рукописи с номером

далее см. п. 1.

13. **Сопроводительное письмо руководителя организации (или письмо автора, если автор – частное лицо).**

Файл обозначается следующим образом: **Letter#1.Gusev AL. Hydrogen detectors. (1300)**

Где:

Letter#1 – обозначает принадлежность PDF-версии письма руководителя организации к конкретной рукописи с номером

далее см. п. 1.

Внимание!!!

Достаточно электронной версии всех перечисленных документов, твердая копия документов не требуется. Редколлегия обращает внимание авторов на то, что несоблюдение приведенных выше правил может задержать публикацию материала и привести к отклонению рукописи от процесса дальнейшего рассмотрения!!! Отклоненные редколлегией рукописи авторам не возвращаются.

В случае отклонения рукописи автор может в течение трех месяцев направить в редакцию уведомление и исправленный вариант в соответствии с требованиями редакции (при этом за рукописью сохраняется регистрационный номер), а также восстанавливается очередь публикации.

Раздел 5. Обязательства Редакции перед Высшей аттестационной комиссией

Редакция обязуется обеспечивать:

1. Наличие института рецензирования (для экспертной оценки рукописей). Обязательное предоставление редакцией рецензий по запросам авторам рукописей и экспертным советам в Высшую аттестационную комиссию Российской академии наук.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

2. *Информационную открытость издания*.

Наличие и развитие сетевой версии журнала в Интернете по адресу http://isjaee.com. Аннотации статей, ключевые слова, информация об авторах должны находиться в свободном доступе в Интернете на русском и английском языках, полнотекстовые версии статей должны быть в свободном доступе или доступными только для подписчиков, но не ранее чем через год после выхода материала.

3. Регулярное предоставление информации об опубликованных статьях по установленной форме в систему *Российского индекса научного цитирования*.

4. Обязательное указание состава редакционной коллегии или совета с указанием учёной степени и учёного звания на сайте научного периодического издания.

5. Обязательное указание *мест работы всех авторов* и *контактной информации для переписки*.

6. *Строгую периодичность*.

7. Наличие *пристатейных библиографических списков* у всех статей в формате, установленном журналом из числа предусмотренных действующим ГОСТом.

8. Наличие *ключевых слов* на русском и на английском языках для каждой публикации.

9. *Наличие и строгое соблюдение опубликованных правил предоставления рукописей авторами*.

10. *В случае отказа в публикации статьи уведомление автора в виде мотивированного отказа*.

11. Наличие *ISSN 1608-8298*.

12. Наличие подписного индекса: ОАО «Роспечать» 20487, Объединенного каталога «Пресса России» 41935, Каталога российской прессы «Почта России».

13. Развивать специализацию в следующих областях:

– физико-математических наук;
– технических наук;
– химических наук;

по группам специальностей:

– физика;
– кинетика и катализ;
– экология (по отраслям: технические и химические науки);
– авиационная и ракетно-космическая техника;
– энергетика.

Просьба к авторам!

В целях ускорения согласования гранок обращаемся к авторам с просьбой предоставлять максимально возможные каналы связи с автором и авторским коллективом (мобильный телефон, скайп, факс, электронную почту и т.д.). Если у автора-корреспондента предвидятся командировки, отпуск и другие неотложные дела, просьба своевременно в письменном виде уведомить Редакцию о назначении ответственного лица для согласования гранок статей.

Приложение № 1.

Правила этики публикаций научной и научно-технической периодики редколлегии Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» (Редакция № 1)

Утверждены Международным комитетом по этике публикаций научной и научно-технической периодики 20 июня 2014 года.

Этика научных публикаций

Этический кодекс Международного научного журнала **«Альтернативная энергетика и экология»** – это свод правил, который устанавливает основные принципы и задаёт ценностные ориентиры для всех участников научно-публикационного процесса. С его помощью регулируются поведение и взаимоотношения авторов, редакторов, рецензентов, издателей и читателей нашего журнала.

Соблюдение этих правил носит обязывающий характер, так как способствует повышению качества издания, поддерживает доверие к нему научного сообщества и общества в целом.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Редакция Международного научного журнала **«Альтернативная энергетика и экология»** не только проводит соответствующую политику, но и признает необходимость отслеживания всех случаев нарушения этических принципов как членами редакции, так и авторами нашего журнала. Нарушение этих принципов может иметь негативные последствия для всех участников научно-публикационного процесса: нарушитель может подвергнуться санкциям со стороны коллег, его репутации будет нанесён существенный урон, а его деятельность может породить цепь ошибок, которые нанесут вред не только науке, но и обществу.

Общими принципами, на которых базируется деятельность редакции журнала **«Альтернативная энергетика и экология»** являются:

– честность;
– вежливость;
– добросовестность;
– объективность;
– конфиденциальность;
– здоровый скептицизм;
– компетентность;
– профессионализм.

Эти принципы имеют свои особенности и специфически реализуются каждой стороной научно-публикационного процесса: авторами, редакторами, рецензентами, издателями и читателями.

Редакция международного научного журнала **«Альтернативная энергетика и экология»** при составлении этического кодекса учитывала рекомендации Комитета по этике публикаций – Committee on Publication Ethics (COPE), Кодекс этики научных публикаций Комитета по этике научных публикаций и этические кодексы других изданий.

Нарушения правил этики научных публикаций

- Фабрикации и фальсификации данных: выдуманные данные.
- Плагиат: использование чужих идей и работ (копирование хотя бы одного предложения из рукописи другого учёного или даже своей собственной ранее опубликованной рукописи без оформления цитаты считается плагиатом).
- Подача рукописи в несколько журналов.
- Дублирующие публикации похожих рукописей, основанных на одном эксперименте.
- Неправильное определение авторства: необходимо указать каждого, кто сделал значительный научный вклад, включая студентов и лаборантов.

Редакционная коллегия журнала Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)» при рассмотрении статьи может произвести проверку материала с помощью системы Антиплагиат. В случае обнаружения многочисленных заимствований редакция действует в соответствии с правилами COPE.

Политика раскрытия и конфликты интересов

Неопубликованные данные, полученные из представленных к рассмотрению рукописей, нельзя использовать в личных исследованиях без письменного согласия Автора. Информация или идеи, полученные в ходе рецензирования и связанные с возможными преимуществами, должны сохраняться конфиденциальными и не использоваться с целью получения личной выгоды.

Рецензенты не должны участвовать в рассмотрении рукописей в случае наличия конфликтов интересов вследствие конкурентных, совместных и других взаимодействий и отношений с любым из Авторов, компаниями или другими организациями, связанными с представленной работой.

Приложение № 2.

Редакционная политика

Международный состав редколлегии и редакции Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» осознают насущность проблем, связанных с энергетическим и экологическим кризисами, которые наиболее полно отразили трагическое противостояние природы и человека. Переход на альтернативные источники энергии – возобновляемые и практически неисчерпаемые – может если не устранить, то хотя бы смягчить остроту этого конфликта. Редакция нашего журнала занимает социально ответственную позицию,

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

присоединяясь к усилиям международного сообщества по решению проблем дефицита ресурсов и сохранения окружающей среды и стремясь внести свой вклад в развитие данной отрасли знания и производства.

Основными целями нашего журнала в качестве издания, посвящённого вопросам экологии, является содействие сохранению окружающей среды, в качестве научного издания – достижение истины и приращение научного знания.

В связи с этим редакционная политика журнала, посвященного исследованиям в области альтернативной энергетики и экологии, направлена на решение следующих задач:

– привлекать внимание общества в лице читателей журнала к наиболее актуальным и перспективным направлениям альтернативной энергетики и экологии;

– публиковать материалы по соответствующей тематике не только теоретического, но и прикладного характера;

– предоставлять учёным всего мира возможность сообщать о результатах своих исследований;

– отбирать посредством механизма рецензирования наиболее ценные работы;

– повышать количество качественных научных публикаций;

– способствовать расширению международного научного сотрудничества и поддержанию научной коммуникации;

– развивать взаимное сотрудничество авторов, издателей и читателей;

– непрерывно совершенствовать журнал.

Редакция Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» проводит независимую редакционную политику, опирающуюся на Правила публикации и Этический кодекс журнала, которые призваны сделать совместное участие в научно-публикационном процессе авторов, редакторов, рецензентов, издателей и читателей более эффективным, прозрачным и соответствующим нравственным нормам, установленным в научном сообществе. Редакция признаёт требования соблюдать этику научных публикаций и делает всё возможное для того, чтобы предотвратить их нарушения.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»

Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» издается с 2000 г., выходит ежемесячно и распространяется по подписке через агентства «Роспечать», «Пресса России. Российские и зарубежные газеты и журналы», «Интерпочта-2003», «Артос-ГАЛ», «Деловая пресса», «ЕРМАК-ПРЕСС», а также через редакцию журнала.

Журнал включен в состав Международной научно-образовательной системы «Водород» (http://www.hydrogen.ru).

Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» зарегистрирован в правительстве России в качестве СМИ, одобрен Организацией Объединенных Наций, включен в перечень ВАК, награжден Европейской Академией Естественных Наук медалью Рентгена, в 2000 и 2003 гг. награжден Президентом Международной ассоциации водородной энергетики (МАВЭ) академиком Т.Н. Везироглу денежной премией за достигнутые успехи, в 2008 году журнал награжден Премией «Российский Энергетический Олимп-2008».

Под эгидой журнала проведен ряд научных форумов:

- Первый Международный симпозиум «Безопасность и экономика водородного транспорта» IFSSEHT-2000.
- Второй Международный симпозиум «Безопасность и экономика водородного транспорта» IFSSEHT-2003.
- Первый Всемирный конгресс «Альтернативная энергетика и экология» WCAEE-2006.
- Первая Международная конференция «Водород и возобновляемые источники энергии» ICHRSE-2006.
- Третий Международный симпозиум «Безопасность и экономика водородного транспорта» IFSSEHT-2006.
- Первый Международный симпозиум «Водородные сенсоры и рекомбинаторы» ISHSR-2006.
- Национальный Российский семинар «Получение альтернативных энергоносителей с помощью атомно-водородного цикла» АВЭ-2007.

Материалы всех мероприятий опубликованы в Международном научном журнале «Альтернативная энергетика и экология».

Все статьи, поступающие в журнал, рецензируются, реферируются, в кратчайшие сроки согласуются с авторами и публикуются в журнале. Авторские коллективы лучших научных работ участвуют в конкурсах редколлегии и награждаются почетными дипломами, грамотами, призами и наградами, учрежденными Международной редколлегией журнала и одобренными ООН.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Редколлегия Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» (http://isjaee.hydrogen.ru/) приглашает руководителей и исполнителей проектов к публикации рукописей по результатам проведенных исследований и выполненных научно-технических работ по следующим основным направлениям:

1. Технологии мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы.
2. Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии.
3. Технологии новых и возобновляемых источников энергии.
4. Технологии создания и обработки полимеров и эластомеров.
5. Технологии создания и обработки композиционных и керамических материалов.
6. Технологии производства топлив и энергии из органического сырья.
7. Технологии атомной энергетики, ядерного топливного цикла, безопасного обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом.
8. Технологии снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф.
9. Технологии создания мембран и каталитических систем.
10. Технологии водородной энергетики.
11. Нанотехнологии и наноматериалы.
12. Технологии создания энергоэффективных двигателей и движителей для транспортных систем.
13. Базовые и критические специальные и промышленные технологии.
14. Технологии обеспечения защиты и жизнедеятельности населения и опасных объектов при угрозах террористических проявлений.
15. Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Анонсы и Интернет-версии статей публикуются на сайте Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» (http://isjaee.hydrogen.ru/) в разделе «Новости».

Электронные версии статей публикуются на сайте журнала с некоторой задержкой по времени (36 месяцев). Ежемесячно сайт журнала посещают читатели из 205 стран мира. Общее число посещений достигает 1 000 000 в год.

Авторские коллективы, выполнившие наиболее значимые работы, могут номинироваться на награждение высшей Международной наградой редколлегии журнала (орденом или медалью) по представлению руководителя головной организации-исполнителя работ.

Награды присуждаются в соответствии с решением Международной наградной комиссии Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология».

Редколлегия оказывает содействие своим авторам в получении финансовой поддержки ведущих международных научных фондов, компаний и институтов, для чего публикует на страницах журнала краткое предложение по международному проекту.

International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology

The International Scientific Journal of Alternative Energy and Ecology has been published since 2000 on a monthly basis. The Journal is distributed by subscription through the Rospechat, Russian Press: Russian and Foreign Newspapers and Magazines, Interpochta-2003, Artos-GAL, Business Press, YERMAK-PRESS subscription agencies and through the Editorial Board of the Journal.

The Journal is part of International Scientific and Educational System «Hydrogen» (http://www.hydrogen.ru).

The International Scientific Journal of Alternative Energy and Ecology has been entered into the Mass Media Register of the Government of Russia, approved by the United National Organization, included in the List of the State Commission for Academic Degrees and Titles, awarded the Roentgen Medal by the European Academy of Natural Sciences. In 2000 and 2003 the Journal awarded a cash prize by President of International Hydrogen Energy Association Member of Academy T.N. Veziroglu for achievements, and in 2008 the Journal received the Prize of Russian Energy Olympus-2008.

A number of scientific forums have been conducted under the aegis of the Journal

- First International symposium of Safety and Economy of Hydrogen Transport IFSSEHT-2000.
- Second International symposium of Safety and Economy of Hydrogen Transport IFSSEHT-2003.
- First World Congress on Alternative Energy and Ecology WCAEE-2006.
- First International Conference on Hydrogen and Renewable Energy Sources ICHRSE-2006.
- Third International symposium of Safety and Economy of Hydrogen Transport IFSSEHT--2006.
- First international Symposium on Hydrogen Sensors and Recombiners ISHSR-2006.
- National Russian Workshop on Production of Alternative Energy Sources Using the Atomic Hydrogen Cycle AHE-2007

Proceedings of all these events have been published in the International Journal of Alternative Energy and Ecology.

All manuscripts received by the Journal are reviewed, confirmed by the authors and published in the Journal in the shortest possible time. Authors of the best scientific manuscripts participate in contests announced by the Editorial Board and awarded honorable diplomas and prizes established by the International Editorial Board of the Journal and approved by UNO.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

The Editorial Board of the International Scientific Journal of Alternative Energy and Ecology (http://isjaee.hydrogen.ru/) invites managers and participants of current and completed projects to publish manuscripts presenting the results of accomplished research and development projects in the following areas:

1. Monitoring and prediction of atmosphere and hydrosphere conditions
2. Development of energy saving heat and power transportation, distribution and consumption systems
3. Advanced and renewable energy sources
4. Development and processing of polymers and elastomers
5. Development and processing of composite and ceramic materials
6. Energy and fuel processing from organic raw materials
7. Nuclear power, nuclear fuel cycle, safe management of radioactive waste and spent nuclear fuel
8. Risk reduction and mitigation of consequences of natural and technology-related catastrophes
9. Development of membranes and catalytic systems
10. Hydrogen energy
11. Nanotechnologies and nanomaterials
12. Development of energy efficient engines and propulsion devices for transport systems
13. Basic and critical special and commercial processes
14. Protection and life support of population and hazardous facilities under threat of terrorist acts
15. Processing and disposal of civilization-related waste

Announcements and Internet-versions of journal manuscripts are published on the web-site of the International Scientific Journal of Alternative energy and Ecology (http://isjaee.hydrogen.ru/) in the News section.

Electronic versions of the manuscripts are published on the Journal's web-site with some delay (36 months). Visitors of the Journal's web-site represent 205 countries worldwide. The total number of web-site visits is 1,000,000 per year.

Authors of the most significant papers can be nominated for the highest award of the Journal's International Editorial Board (order or medal) upon request submission by the head of the leading participating organization.

The awards are conferred in accordance with resolutions of the International Award Commission of the International Scientific Journal of Alternative Energy and Ecology.

The Editorial Board assists authors of published papers in getting international financial support of leading international scientific foundations and search for leading companies and institutes that specialize in the area of scientific interest for cooperation under international research and development projects.

Upon request of the authors, the Editorial Board publishes a free-of-charge summary of international project proposal in the Journal that helps the authors find foreign co-participants.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Форма № 1-ISJAEE

ПЕРЕЧЕНЬ
необходимых материалов для публикации в Международном научном журнале «Альтернативная энергетика и экология»

По тематике: _____

Тематика определяется в соответствии с Тематикой журнала Form36 с указанием номера раздела и секции (желательно определиться с тематикой, если есть затруднения у авторов, Редакция вправе самостоятельно определить тематику рукописи).

Авторов: _____

Статья: _____

Для своевременного выхода журнала и быстрой публикации работ авторы должны предоставлять в редакцию материалы по перечню, приведенному в таблице ниже. Авторы должны заполнить знаками (+) или (-) графы в столбце «Наличие»

№ п/п	Материал	Наличие
1	Заявление	
2	**Квитанция об оплате или платежное поручение**	
3	Твердая копия рукописи статьи	
4	Электронная версия рукописи статьи	
5	Название статьи на русском языке	
6	Название статьи на английском языке	
7	УДК (PACS)	
8	Автор(ы) статьи	
9	Координаты организаций авторов (включая телефоны и e-mail)	
10	Рисунки (фотографии, схемы)	
11	Подрисуночные подписи на русском языке	
12	Подрисуночные подписи на английском языке	
13	Таблицы	
14	Названия таблиц на русском языке	
15	Названия таблиц на английском языке	
16	Ссылки в тексте на таблицы и рисунки	
17	Список литературы (библиография)	
18	Библиографические ссылки в тексте в соответствие со списком литературы	
19	Структурированность текста, наличие подзаголовков	
20	Аннотация на русском языке	
21	Аннотация на английском языке	
22	Реферат на русском языке	
23	Реферат на английском языке	
24	Резюме на каждого автора (если авторов не более 6) или на главного автора*	
25	Фотография автора (авторов)*	
26	Разрешение на опубликование в открытой печати (экспертное заключение)	
27	Интернет-сообщение на русском языке*	
28	Интернет-сообщение на английском языке*	
29	Соглашение авторов на публикацию статьи в журнале, на электронных ресурсах E-Library, сайте журнала (архив) и на CD – коллекция журнала	
30	Рецензии	
31	Сопроводительное письмо руководителя организации (или письмо автора)	
32	Акт проведенных испытаний (если в статье присутствует экспериментальная часть), подписанный участниками испытаний*	
33	Ходатайства*	

* Материалы, предоставляемые по желанию

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

К сведению авторов. *Редакция Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» считает, что авторы, направляя рукопись в Редакцию, согласны передать учредителям и редколлегии Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» право опубликовать рукопись на русском языке и в переводе на английском языке. Просим авторов прикладывать к направляемой рукописи Обязательство по форме, приведенной ниже. При этом за авторами сохраняются все остальные права как собственников этой рукописи.*

Форма № 2-ISJAEE -2013

ОБЯЗАТЕЛЬСТВО

Автор(ы) статьи предоставляет (ют) издательству ООО НТЦ «ТАТА» на безвозмездной основе на срок действия авторского права, предусмотренного действующим законодательством РФ, исключительную лицензию на использование созданного Автором (ми):

Название рукописи на русском языке

Название рукописи на английском языке

1. *Фамилия, имя, отчеств автора рукописи*
2. *Фамилия, имя, отчество автора рукописи*
3. *Фамилия, имя, отчество автора рукописи*

для использования в Международном научном журнале «Альтернативная энергетика и экология» в пределах предусмотренных п. 2 ст. 1270 ГК РФ.

В соответствии с п. 2 ст. 1270 ГК РФ под использованием Статьи, понимается:

- воспроизвдение Статьи или ее отдельной части на русском языке в любой материальной форме, в том числе на бумажном и электронном носителях в виде отдельного произведения и/или в составе Журнала(лов), и/или базах данных Издателя и/или иных лиц, по усмотрению Издателя;
- распросранение Статьи или ее отдельной части на любом носителе на русском языке по всему миру в виде отдельного произведения и/или в составе Журнала(лов), и/или базах данных Издателя или иных лиц, по усмотрению Издателя;
-доведение Статьи или ее отдельной части до всеобщего сведения таким образом, что любое лицо может получить доступ к Статье из любого места и в любое время по собственному выбору (доведение до всеобщего сведения, в т.ч. через Интернет);
- право на перевод Статьи на английский язык;
- воспроизведение Статьи или ее отдельной части на английском языке в любой материальной форме, в том числе на бумажном или электронном носителе в виде отдельного произведения и/или в составе Журнала(ов), и/или на базах данных Издателя и/или иных лиц, по усмотрению Издателя;
- распространения Статьи на английском языке или ее отдельной части на любом носителе на английском языке по всему миру в виде отдельного произведения и/или в составе Журнала(ов), и/или базах данных Издателя или иных лиц, по усмотрению Издателя;
- доведение Статьи на английском языке или ее отдельной части до всеобщего сведения, таким образом, что любое лицо может получить доступ к Статье из любого места и в любое время по собственному выбору (доведение до сведения, в т.ч. через Интернет);
- сублицензирование (выдача разрешения) полученных прав по настоящему соглашению в целом или частичном виде для перевода, издания, распространения и доведения до всеобщего сведения на английском языке.

1. **Фамилия, имя, отчество автора рукописи** *подпись*
2. **Фамилия, имя, отчество автора рукописи** *подпись*
3. **Фамилия, имя, отчество автора рукописи** *подпись*

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Form 01-ISJAEE

Главному редактору
Международного научного журнала
«Альтернативная энергетика и экология»
Гусеву Александру Леонидовичу

ЗАЯВЛЕНИЕ*

Раздел I. ПРОИЗВОЛЬНАЯ ФОРМА

Прошу (просим) рассмотреть возможность публикации рукописи *«НАЗВАНИЕ РУКОПИСИ»* авторов (ПЕРЕЧИСЛЕНИЕ: должности, Фамилия Имя Отчество) в *Международном научном журнале «Альтернативная энергетика и экология»* в сроки (указывается наиболее оптимальный срок публикации рукописи).

***Материал представлен в электронном виде по E-mail в соответствии с требованиями Правил публикации Form16 -ISJAEE и Form1-ISJAEE. Твердые копии документов и окончательный вариант электронной версии (CD) будут направлены в Редакцию в месячный срок.*

Раздел II. ОБЯЗАТЕЛЬНАЯ ФОРМА

Авторы (фамилия, имя, отчество), должность, полный титул для представления	1. 2. 3. 4. 5.
Наименование организации (если рукопись представляется от организации)	
Название статьи (на русском языке)	
Название статьи (на английском языке)	
Ответственный автор (ФИО, адрес, телефоны, факс, E-mail)	
Адрес, мобильный телефон и ФИО ответственного лица для получения оттисков опубликованной статьи	
Полные платежные реквизиты для оплаты предусмотренных в Правилах позиций по подготовке рукописи к печати и печати, а также для получения счета для получения необходимого количества экземпляров журнала с публикацией	
Бронирование необходимого количества печатных версий журнала с авторской публикацией	
Подписка на журнал (подписан, планирую, не планирую)	
Подписка на электронную версию журнала на CD на полугодие, год, на все выпуски журнала	
Включение в базу данных для распространения (да, нет)	

Подписи авторов:

** Заявление по форме Form01-ISJAEE обязательно для авторов и авторского коллектива независимо от наличия Сопроводительного письма руководителя организации или автора. Информация по Разделу II* ***не может изменяться на протяжении рассмотрения рукописи и на этапе подготовки рукописи к публикации*** *(за исключением особых случаев). Информация по Разделу II используется для оформления Справок (Приоритетная справка, Справка об опубликовании и т.д.).*

*** Если материал представлен обычной почтой в твердой копии и в электронной версии на CD, то сообщается E-mail Ответственного автора (для переписки). Если E-mail отсутствует, переписка ведется обычной почтой.*

**** Если авторы не могут подписать Заявление – командировка, авторы из разных мест, – допускается электронная подпись (ответственность за согласие автора опубликовать материал и достоверность подписи несет Ответственный автор).*

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ»

ОФОРМЛЕНИЕ ПОДПИСКИ

Стоимость подписки на 2023 г.

I. **Электронная версия**
в каждом выпуске сброшюрованы 3 номера

Для физических лиц:

1 выпуск – 2 000 рублей (30 $) (27 евро)
1 месяц – 2 000 рублей (30 $) (27 евро)
3 месяца – 6 000 рублей (90 $) (82евро)
6 месяцев – 12 000 рублей (180 $) (165 евро)
9 месяцев – 18 000 рублей (270 $) (247евро)
12 месяцев – 29 000 рублей (500 $) (450 евро)
+ **Скидки для Членов редколлегии, преподавателей, аспирантов, пенсионеров и студентов (50 %)**.

Для организаций:

1 выпуск – 4 000 рублей (60 $) (55 евро)
1 месяц – 4 000 рублей (65 $) (60 евро)
3 месяца – 12 000 рублей (195 $) (180 евро)
6 месяцев – 24 000 рублей (390 $) (360 евро)
9 месяцев – 36 000 рублей (585 $) (540 евро)
12 месяцев – 48 000 рублей (780 $) (720 евро)

Акции - д**ля юридических и физических лиц в период с 25 сентября по 25 октября действует скидка 20 % на годовую подписку.**

Для получения скидки обращайтесь по адресу: gusev@hydrogen.ru

Архивные выпуски (2017–2020 гг.)

Для физических лиц:

1 выпуск – 1 000 рублей (15 $) (14 евро)
1 месяц – 1 000 рублей (16 $) (14 евро)
3 месяца – 3 000 рублей (45 $) (41 евро)
6 месяцев – 6 000 рублей (90 $) (83 евро)
9 месяцев – 9 000 рублей (135 $) (124 евро)
12 месяцев – 14 500 рублей (250 $) (225 евро)

Для организаций:

1 выпуск – 2 000 рублей (30 $) (27 евро)
1 месяц – 2 000 рублей (30 $) (25 евро)
3 месяца – 6 000 рублей (95 $) (90 евро)
6 месяцев – 12 000 рублей (195 $) (180 евро)
9 месяцев – 18 000 рублей (293 $) (270 евро)
12 месяцев – 24 000 рублей (390 $) (360 евро)

Архивные выпуски (2000–2016 гг.)

1 выпуск – 400 рублей (7 $) (6 евро)
1 месяц – 400 рублей (7 $) (6 евро)
3 месяца – 1 200 рублей (20 $) (18 евро)
6 месяцев – 2 400 рублей (40 $) (35 евро)
9 месяцев – 3 600 рублей (60 $)(55 евро)
12 месяцев – 4 800 рублей (80 $) (62,5 евро)

Подписку можно оформить и получить доступ к электронным версиям по адресу: gusev@hydrogen.ru **(для получения счета-договора).**

II. Печатная версия
в каждом выпуске сброшюрованы 3 номера

(доставка по России включена в общую стоимость)

Для физических лиц:

1 выпуск – 3 000 рублей (50 $) (45 евро)
1 месяц – 3 000 рублей (50 $) (45 евро)
3 месяца – 9 000 рублей (150 $) (135 евро)
6 месяцев – 18 000 рублей (300 $) (270 евро)
9 месяцев – 27 000 рублей (450 $) (405 евро)
12 месяцев – 36 000 рублей (900 $) (810 евро)
+ Скидки для Членов редколлегии, пенсионеров, аспирантов, студентов (20 %).

Для юридических лиц:

1 выпуск – 6 000 рублей (100 $) (90 евро)
1 месяц – 6 000 рублей (100 $) (90 евро)
3 месяца – 18 000 рублей (300 $) (270 евро)
6 месяцев – 36 000 рублей (600 $) (540 евро)
9 месяцев – 54 000 рублей (900 $) (810 евро)
12 месяцев – 70 000 рублей (1000 $) (900 евро)
+ Скидки для Членов редколлегии, пенсионеров, аспирантов, студентов (20 %).

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Акции – **в период с 25 сентября по 25 октября действует скидка 15 % на годовую подписку.**

Для получения скидки обращайтесь по адресу: gusev@hydrogen.ru

Архивные выпуски (2017–2020 гг.)
(доставка не входит в стоимость)

Для физических лиц:

1 выпуск – 1 000 рублей (15 $) (14 евро)
1 месяц – 1 000 рублей (16 $) (14 евро)
3 месяца – 3 000 рублей (45 $) (41 евро)
6 месяцев – 6 000 рублей (90 $) (83 евро)
9 месяцев – 9 000 рублей (135 $) (124 евро)
12 месяцев – 14 500 рублей (250 $) (225 евро)

Для организаций:

1 выпуск – 2 000 рублей (30 $) (27 евро)
1 месяц – 2 000 рублей (30 $) (25 евро)
3 месяца – 6 000 рублей (95 $) (90 евро)
6 месяцев – 12 000 рублей (195 $) (180 евро)
9 месяцев – 18 000 рублей (293 $) (270 евро)
12 месяцев – 24 000 рублей (390 $) (360 евро)

Архивные выпуски (2000–2018 гг.)
(доставка не входит в стоимость)

1 выпуск – 600 рублей (10 $) (9 евро)
1 месяц – 600 рублей (10 $) (9 евро)
3 месяца – 1 800 рублей (30$) (27 евро)
6 месяцев – 3 600 рублей (60 $) (54 евро)
9 месяцев – 5 400 рублей (90 $) (81 евро)
12 месяцев – 7 200 рублей (120 $) (108 евро)

+ Скидки для пенсионеров, студентов (20 %).

Для получения скидки обращайтесь по адресу: gusev@hydrogen.ru

Оформить подписку можно на сайте или направить запрос с указанием реквизитов организации по адресу: gusev@hydrogen.ru **(для получения счета на подписку).**

«Золотая коллекция» (2000–2022 гг.) – 400 номеров журнала – печатная версия
(доставка не входит в стоимость)

300 000 рублей (4900 $) (4200 евро)
+ Скидки для авторов, аспирантов, пенсионеров, студентов, членов редколлегии и рецензентов журнала (50 %).
Для получения скидки обращайтесь по адресу: gusev@hydrogen.ru

Оформить подписку можно на сайте или направить запрос с указанием реквизитов организации по адресу: gusev@hydrogen.ru **(для получения счета на подписку).**

«Золотая коллекция» (2000–2022 гг.) – электронная версия – доступ (логин-пароль)

150 000 рублей (2500 $) (2200 евро)
+ Скидки для авторов, аспирантов, пенсионеров, студентов, членов редколлегии и рецензентов журнала (20 %).
Для получения скидки обращайтесь по адресу: gusev@hydrogen.ru
Оформить подписку можно на сайте или направить запрос с указанием реквизитов организации по адресу: gusev@hydrogen.ru **(для получения счета на подписку).**

«Золотая коллекция» (2000–2020 гг.) – 320 номеров журнала – электронная версия – на CD-диске
200 000 рублей (3000 $) (2500 евро)
+ Скидки для авторов, аспирантов, пенсионеров, студентов, членов редколлегии и рецензентов журнала (20 %).
Для получения скидки обращайтесь по адресу: gusev@hydrogen.ru
Оформить подписку можно на сайте или направить запрос с указанием реквизитов организации по адресу: gusev@hydrogen.ru **(для получения счета на подписку).**

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

III. Платежные реквизиты ООО «ИНСТИТУТ ВОДОРОДНОЙ ЭКОНОМИКИ»

Для расчетов в рублях

Реквизиты счета:
Наименование:
ООО «ИНСТИТУТ ВОДОРОДНОЙ ЭКОНОМИКИ»
ИНН: 5254032750
КПП: 525401001
Банк: МОСКОВСКИЙ ФИЛИАЛ АО КБ «МОДУЛЬБАНК»
БИК: 044525092
к/с №: 30101810645250000092
Счет №: 40702810471210001557

Валютные реквизиты (в евро)

Реквизиты счета:
Correspondent Bank: RAIFFEISEN
BANK INTERNATIONAL AG
SWIFT: RZBAATWWXXX
Account: 1-55.090.237
Beneficiary institution: MODULBANK
SWIFT: MODBRU22
Beneficiary account: 40702978171210000004 (EUR)
Beneficiary: STC «TATA» Limited

Валютные реквизиты (в долларах)

Реквизиты счета:
Correspondent Bank: RAIFFEISEN
BANK INTERNATIONAL AG
SWIFT: RZBAATWWXXX
Account: 70-55.090.237
Beneficiary institution: MODULBANK
SWIFT: MODBRU22
Beneficiary account: 40702840571210000004 (USD)
Beneficiary: STC «TATA» Limited

VI. Контакты

452613, Башкортостан респ., г. Октябрьский, 35-й мкр., дом 9А, абонентский ящик № 33, генеральному директору Гусеву Александру Леонидовичу.
e-mail: gusev@hydrogen.ru

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ТЕМАТИКА МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНОГО ЖУРНАЛА «АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ»

I. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА

1. Солнечная энергетика

А.Штейнфелд (Швейцария, Цюрих, Швейцарский федеральный институт технологий) (МРК)
Г.И. Исаков (Азербайджан, Баку, Институт физики НАН) (ЗГР)
И.Г. Хидиров (Узбекистан, Ташкент, Институт ядерной физики НАН Узбекистана) (МРК)
С.Геруни (Армения, Ереван, Ереванский гос. ун-т) (МНКСР)
С.М. Раза (Пакистан, Кветта, Университет Белуджистана) (МРК)
С.З. Ильяс (Пакистан, Кветта, Университет Белуджистана) (МРК)
А.М. Пенджиев (Туркменистан, Ашхабат-32, Туркменский политехнический институт) (МРК)
В.Ф. Гременок (Белоруссия, Минск, Объединенный институт физики твердого тела и полупроводников) (МНКСР)
В.А. Бутузов (Россия, Краснодар, ОАО «Южгеотепло»)

1-1-0-0 История солнечной энергетики
1-2-0-0 Солнечно-водородная энергетика
Т.Н. Везироглу (США, Майами, МАВЭ, UNIDO-ICHET) (ПГР)
1-2-1-0 Материалы для солнечно-водородной энергетики
1-3-0-0 Солнечные электростанции
1-3-1-0 Кремниевые солнечные электростанции
1-3-2-0 Космические солнечные станции
1-3-3-0 Фотоэлементы
1-3-4-0 Фотовольтаический эффект в полупроводниковых структурах. Фотоэлектрические модули
1-4-0-0 Наземные солнечные станции
1-4-1-0 Солнечные коллекторы
1-5-0-0 Солнечные города
1-5-1-0 Солнечный дом
1-5-2-0 Солнечные холодильные установки
1-5-3-0 Солнечные водоподъемные системы
1-5-4-0 Гелиоэнергетические установки
1-6-0-0 Солнечный транспорт
1-7-0-0 Концентраторы солнечного излучения

2. Ветроэнергетика

И.З. Богуславский (Россия, Москва, ОЭЭП РАН) (МРК)
В.Л. Окулов (Россия, Новосибирск, Сиб. отд. РАН)
Ван Куик Г.А.М. (Президент Европейской Академии Ветроэнергетики)

2-1-0-0 Ветроэнергетика и архитектура
2-2-0-0 Ветроэнергетика и экология
2-3-0-0 Уникальные решения ветроэнергетики
2-4-0-0Парусная ветроэнергетика
2-5-0-0 Гибридные ветроустановки
2-6-0-0 История ветроэнергетики
2-7-0-0 Ветро-водородная энергетика
2-8-0-0 Электрогенераторы для ветроэнергетики
2-9-0-0 Новые конструкции ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения
2-10-0-0 Горизонтально-осевые ветроэнергетические установки
2-11-0-0 Вертикально-осевые ветроэнергетические установки Савониуса
2-12-0-0 Вертикально-осевые ветроэнергетические установки Дарье
2-13-0-0 Ветрогелиоэнергетические установки
2-14-0-0 Будущее ветроэнергетики
2-15-0-0 Аэростатная ветроэнергетика
2-16-0-0 Материалы для ветроэнергетики
2-17-0-0 Моделирование на ЭВМ динамической составляющей скорости ветра в зависимости от времени
2-18-0-0 Комплексное моделирование ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения
2-19-0-0 Преобразование энергии в ветроэнергетических установках
2-20-0-0 Использование энергии ветра. Техника, экономика, экология

3. Морская гидроэнергетика

3-1-0-0 История приливной энергетики
А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)
3-2-0-0 Энергетика морских волн
3-3-0-0 Энергетика морских течений

4. Геотермальная энергетика

В.А. Бутузов (Россия, Краснодар, ОАО «Южгеотепло»)

4-1-0-0 История геотермальной энергетики
4-2-0-0 Фундаментальные исследования в области геотермальной энергетики
4-3-0-0 Проблемы освоения геотермальной энергии
4-4-0-0 Роль моделирования и мониторинга при освоении геотермальной энергии. Оценка геотермального резерва
4-5-0-0 Геотермальные станции
4-5-1-0 Геотермальные электростанции
4-5-2-0 Геотермальные тепловые станции
4-6-0-0 Эффективность и надежность геотермальных тепловых и электрических станций
4-7-0-0 Геотермальные ресурсы стран мира и перспективы их освоения

5. Энергия биомассы

А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)

5-1-0-0 Биогазовые установки
5-2-0-0 Термохимические газогенераторы
5-3-0-0 Энергия биомассы и экология

6. Малая гидроэнергетика

С.Шатворян (Армения, Ереван, Энергетический стратегический центр) (МНКСР)

6-1-0-0 Оборудование малых и микрогидроэлектростанций
6-2-0-0 Деривационные микрогидроэлектростанции
6-3-0-0 Малые АэроГЭС

7. Нетрадиционные источники возобновляемой энергии

В.А. Хуснутдинов (Россия, Москва, РАО «ЕЭС России») (МРК)
А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)
А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

7-1-0-0 Применение льда в энергетике. Ледяные электростанции
7-2-0-0 Использование холода вечной мерзлоты для термостатирования бытовых и технических объектов
7-3-0-0 Физико-химические свойства льда
7-4-0-0 Теплофизические свойства льда
7-5-0-0 Термодинамические основы получения и применения льда
7-6-0-0 Оборудование для исследования льда
7-7-0-0 Установки для получения льда
7-8-0-0 Способы и механизмы экстренного вскрытия льда для спасения под водой
7-9-0-0 Бинарный лед и его применение
7-10-0-0 Применение льда для создания инженерно-технических и архитектурных сооружений
7-11-0-0 Динамика и прочность льда. Динамика хрупкого разрушения. Экспериментальные методы динамической механики разрушения льда
7-12-0-0 Численные и смешанные численно-экспериментальные методы динамической механики разрушения льда
7-13-0-0 Способы удаления ледяных покрытий на водных объектах
7-14-0-0 Аккумулирование холода и применение энергии льда
7-15-0-0 Транспортировка айсбергов и получение пресной воды
7-16-0-0 Термоградиентная энергетика

8. Энергокомплексы на основе ВИЭ

II. НЕВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА

9. Атомная энергетика

А.Я. Столяревский (Россия, Москва, РНЦ «Курчатовский институт») (МРК)
А.Г. Чудин (Россия, Москва, Федеральное Агентство по атомной энергии РФ) (МНКСР)
В.А. Афанасьев (Россия, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ) (МРК)
М.А. Прелас (США, Коламбия, Университет Миссури) (МРК)
9-1-0-0 Атомно-водородная энергетика
*Н.Н. Пономарев-Степно*й, акад. РАН (Россия, Москва, РНЦ «Курчатовский институт») (РНС)
А.Я. Столяревский (Россия, Москва, РНЦ «Курчатовский институт») (МРК)
В.Н. Фатеев (Россия, Москва, РНЦ «Курчатовский институт») (МРК)
А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)
9-1-1-0 История атомно-водородной энергетики
Н.Н. Пономарев-Степной, акад. РАН (Россия, Москва, РНЦ «Курчатовский институт») (РНС)
А.Я. Столяревский (Россия, Москва, РНЦ «Курчатовский институт») (МРК)
А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)
9-1-2-0 Высокотемпературные газовые реакторы (ВТГР) для производства водорода высокотемпературными (T = 1000 °C) методами
9-1-3-0 Быстрые реакторы с натриевым охлаждением (БН) для получения среднетемпературного тепла (T = 500 °C), производства синтетического газа и водорода
9-1-4-0 Быстрые реакторы со свинцовым охлаждением (БРЕСТ) как реакторы следующего поколения для получения высокотемпературного тепла (T > 500 °C)
Г.Л. Хорасанов (Россия, Обнинск, ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ им. А.И. Лейпунского») (МРК)
9-2-0-0 Атомная энергетика для транспортных средств
И.В. Шаманин (Россия, Томск, Томский политехнический университет) (МРК)
9-2-1-0 Радионуклидные источники тепла
9-2-2-0 Радионуклидные термоэлектрические генераторы
9-2-3-0 Термо- и радиационно-стимулированные фазовые превращения в сплавах внедрения (карбидах, нитридах, нитридогидридах, карбогидридах и гидридах переходных металлов, высокотемпературных сверхпроводящих материалах, интерметаллических соединениях)

10. Взрывная энергетика

А.Л. Михайлов (Россия, Саров, ИФВ РФЯЦ ВНИИЭФ) (МРК)
Н.Н. Гердюков (Россия, Саров, ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ) (МРК)
А.А. Штерцер (Россия, Новосибирск, ООО «НПП «МАТЕМ») (МРК)
В.Н. Герман (Россия, Саров, ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ) (МРК)
10-1-0-0 Взрывные технологии
10-2-0-0 Компьютерное моделирование задач взрывной энергетики
М.А. Сырунин (Россия, Саров, ИФВ РФЯЦ ВНИИЭФ)
10-2-1-0 Постановки задач взрывной энергетики
10-2-2-0 Подвижные лагранжево-эйлеровы сетки
10-3-0-0 Взрывная дейтериевая энергетика
10-4-0-0 Взрывная энергетика для синтеза новых веществ
10-4-1-0 Синтез и спекание материалов взрывом
10-4-2-0 Ударно-волновое спекание материалов
10-4-3-0 Компьютерное моделирование процессов ударно-волнового спекания материалов
10-5-0-0 Взрывчатые вещества
10-6-0-0 Взрывные камеры
А.А. Штерцер (Россия, Новосибирск, ООО «НПП «МАТЕМ») (МРК)
10-7-0-0 Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны
10-8-0-0 Энергетические материалы и физика детонации
10-9-0-0 Уравнения состояния и фазовые переходы

III. ТЕРМОЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

11. Термоядерная энергетика

В.Н. Лобанов (Россия, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ) (МРК)
11-1-0-0 Исследования в области управляемого термоядерного синтеза
11-2-0-0 Рентгеновский термоядерный синтез
11-3-0-0 Пучковый термоядерный синтез
11-4-0-0 Инерциальный термоядерный синтез
11-5-0-0 Изотопный эффект
11-6-0-0 Криогенные тритиевые мишени
11-7-0-0 Мишени высокого давления для исследования процессов мюонного катализа ядерных реакций синтеза
11-8-0-0 Международный проект термоядерного энергетического реактора ИТЭР

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

11-9-0-0 Радиологическая защита и ядерная безопасность

11-10-0-0 Производство радиоизотопов и их применение

М.А. Казарян (Россия, Москва, ФИАН им. Лебедева) (МРК)

11-11-0-0 Топливный цикл и экология

11-12-0-0 Проектирование, строительство и эксплуатация ядерных исследовательских и энергетических реакторов

11-13-0-0 Промышленное производство компонентов и материалов, необходимых для использования в ядерных реакторах и их топливных циклах

11-14-0-0 Снятие с эксплуатации, дезактивация и обращение с отходами энергетических реакторов

11-15-0-0 Исследования в области технологии производства лазеров и их применения

11-16-0-0 Системы ТОКАМАК

11-17-0-0 Промежуточные системы с магнитным удержанием

IV. ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА

12. Водородная экономика

Ф. Караосманоглу (Турция, Стамбул, Стамбульский технический университет) (МРК)

З. Сен (Турция, Стамбул, Стамбульский технический университет) (МРК)

А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)

12-1-0-0 История водородной энергетики

Т.Н. Везироглу (США, Майами, МАВЭ, UNIDO-ICHET) (ПГР)

А.Г. Галеев (Россия, Сергиев Посад, ФГУП «НИИхиммаш») (МРК)

12-2-0-0 Безопасность водородной энергетики

А.Г. Галеев (Россия, Сергиев Посад, ФГУП «НИИхиммаш») (МРК)

Я. Клеперис (Латвия, Рига, Университет Латвии) (МРК)

Л.Ф. Беловодский (Россия, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ) (МНКСР)

12-2-1-0 Рекомбинаторы водорода

А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)

12-2-2-0 Системы обдува инертными газами

12-2-3-0 Безопасность криогенных систем

12-2-4-0 Технологии безопасного использования водорода на борту транспортных средств

12-3-0-0 Газоаналитические системы и сенсоры водорода

Я. Клеперис (Латвия, Рига, Университет Латвии) (МРК)

А.М. Полянский (Россия, С.-Петербург, ООО «НПК Электронные пучковые технологии») (МРК)

В.М. Арутюнян, акад. НАН Армении (Армения, Ереван, Ереванский государственный университет) (РНС)

Ю.Шунман (Нидерланды, Делфт, Делфтский технический университет) (МНКСР)

Л.И. Трахтенберг (Россия, Москва, Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН)

12-4-0-0 Хранение водорода

Я. Клеперис (Латвия, Рига, Университет Латвии) (МРК)

О.Н. Сриваставa (Индия, Варанаси, Университет Банарас Хинди) (МРК)

С.М. Алдошин, акад. РАН (Россия, Черноголовка, ИПХФ РАН) (РНС)

Б.П. Тарасов (Россия, Черноголовка, ИПХФ РАН) (МРК)

12-4-1-0 В углеродных наносистемах

О.Н. Ефимов (Россия, Черноголовка, ИПХФ РАН) (МРК)

Б.К. Гупта (Индия, Варанаси, Университет Банарас Хинди) (МРК)

А.В. Вахрушев (Россия, Ижевск, Институт прикладной механики УрО РАН) (МРК)

12-4-2-0 В инкапсулированном газообразномсостоянии: в микросферах, микрокапиллярах, пенометаллах, цеолитах и других соединениях

В.С. Коган (Украина, Харьков, ХФТИ) (МРК)

Е.Ф. Медведев (Россия, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ) (МРК)

А.Ф. Чабак (Россия, Москва, Академия перспективныхтехнологий) (МРК)

12-4-3-0 В газообразном состоянии под давлением

А.С. Коротеев, акад. РАН (Россия, Москва, ФГУП «Центр Келдыша») (РНС)

12-4-3-1 В газообразном состоянии в крупных хранилищах

12-4-3-2 В газообразном состоянии в баллонах

12-4-4-0 В жидком состоянии

А.М. Архаров (Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана)(МРК)

А.М. Домашенко (Россия, Балашиха, ОАО «Криогенмаш»)(МРК)

Г.Г. Шевяков (Россия, Балашиха, ОАО «Криогенмаш») (МРК)

В.С. Травкин (США, Лос-Анджелес, Калифорнийский университет) (МРК)

В.С. Коган (Украина, Харьков, ХФТИ) (МРК)

И.Ф. Кузьменко (Россия, Балашиха, ОАО «Криогенмаш») (МНКСР)

А.Г. Галеев (Россия, Сергиев Посад, ФГУП «НИИхиммаш») (МРК)

12-4-4-1 В криогенном жидком состоянии в стационарных хранилищах

12-4-4-2 В криогенном жидком состоянии на борту транспортных средств

Б.А. Соколов (Россия, Королев, РКК «Энергия» им. С.П. Королева) (МРК)

12-4-5-0 В химически связанном состоянии в жидких средах

12-4-6-0 В твердофазном связанном состоянии в металлогидридных системах

М.Д. Хэмптон (США, Орландо, Университет Центральной Флориды) (ЗГР)

Б.П. Тарасов (Россия, Черноголовка, ИПХФ РАН) (МНКСР)

С.П. Габуда (Россия, Новосибирск, ИНХ СО РАН) (МРК)

В.Л. Кожевников (Россия, Екатеринбург, ИХТТ УрО РАН) (МРК)

12-4-7-0 В адсорбированном состоянии на криоадсорбентах

12-4-8-0 В комбинированных системах

12-4-9-0 Новые способы хранения водорода

12-5-0-0 Методы получения водорода

И.Ф. Кузьменко (Россия, Балашиха, ОАО «Криогенмаш») (МНКСР)

В. В. Лунин, акад. РАН (Россия, Москва, МГУ) (РНС)

12-5-1-0 Радиолиз

М.А. Прелас (США, Коламбия, Университет Миссури-Коламбия) (МРК)

12-5-2-0 Электролиз

12-5-3-0 Термохимическое разложение воды

12-5-4-0 Разложение аммиака

В.А. Кириллов (Россия, Новосибирск, Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН) (МРК)

12-5-5-0 Каталитическая конверсия (риформинг) газообразных и жидких углеводородов

12-5-6-0 Неполное окисление углеводородов

12-5-7-0 Высокотемпературный метод

12-5-8-0 Гидраты

С.П. Габуда (Россия, Новосибирск, ИНХ СО РАН) (МРК)

12-5-9-0 Бортовые конверторные устройства преобразования органических веществ в водород

12-5-10-0 Генерирование водорода на борту в реакции взаимодействия воды с различными металлами (алюминий, магний и т. д.)

12-5-10-1 Механические и электрические способы удаления окисной пленки во время реакции

12-5-10-2 Химические способы удаления окисной пленки во время реакции

12-5-10-3 Ультразвуковые способы удаления окисной пленки во время реакции

12-5-10-4 Способы увеличения удельной поверхности металлов реагентов

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

12-5-10-5 Термические и барические методы интенсификации реакции генерации водорода
12-5-10-6 Устройства для генерации водорода в реакции взаимодействия воды и металлов для бортового применения
12-5-10-7 Устройства для генерации водорода в реакции взаимодействия воды и металлов для бытового применения
12-5-10-8 Устройства для генерации водорода в реакции взаимодействия воды и металлов для промышленной энергетики
12-5-10-9 Физико-математические модели описания процессов генерации водорода
12-5-10-10 Перспективные направления развития методадля воплощения его на борту транспортных средств
12-5-11-0 Получение водорода из глубинного морского сероводорода
И.М. Неклюдов (Украина, Харьков, Харьковский физико-технический институт) (МРК)
Н.А. Азаренков (Украина, Харьков, Харьковский физико-технический институт) (МРК)
В.И. Ткаченко (Украина, Харьков, Харьковский физико-технический институт) (МРК)
12-5-12-0 Новые способы получения водорода
12-6-0-0 Транспортирование водорода
А.Г. Галеев (Россия, Сергиев Посад, ФГУП «НИИхиммаш») (МРК)
12-6-1-0 Транспортирование жидких криогенных продуктов по трубопроводам
А.М. Домашенко (Россия, Балашиха, ОАО «Криогенмаш») (МРК)
12-6-2-0 Охлаждение магистралей криогенных систем
12-6-3-0 Неустановившиеся процессы в криогенных системах
12-7-0-0 Топливные элементы
Б.А. Соколов (Россия, Королев, РКК «Энергия» им. С.П. Королева) (МРК)
Ю.Н. Шалимов (Россия, Воронеж, ВГТУ) (МРК)
В.П. Пахомов (Россия, Москва, РНЦ «Курчатовский институт») (МРК)
12-7-1-0 Разработка и производство топливных элементов
12-7-1-1 Мембраны для топливных элементов
12-7-1-2 Компьютерное моделирование функционирования топливных элементов
12-7-2-0 Применение топливных элементов
12-7-2-1 Устройства питания на топливных элементах с конверсией метанола в водород
12-7-3-0 Топливные элементы с предварительной обработкой водородсодержащего топлива
12-8-0-0 Конструкционные материалы
П.Г. Бережко (Россия, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ) (МРК)
А. М..Полянский (Россия, С.-Петербург,
ООО «НПК Электронные пучковые технологии») (МРК)
В.М. Чертов (Россия, Москва) (МРК)
Ю.Н. Шалимов (Россия, Воронеж, ВГТУ) (МРК)
П. Сан-Грегуар (Франция, Тулон-Вар, Университет Тулон-Вара) (ЗГР)
А.Т. Пономаренко (Россия, Москва, Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН) (МНКСР)
Л.В. Спивак (Россия, Пермь, ПГУ) (МНКСР)
А.А. Курдюмов (Россия, С.-Петербург, СПбГУ) (МНКСР)
М.В. Гольцова (Украина, Донецк, ДонНТУ) (МНКСР)
Я.И. Бляшко (Россия, С.-Пб., АОЗТ «МНТО ИНСЭТ») (МРК)
Н.М. Власов (Россия, Подольск, НИИ НПО «Луч») (МРК)
И.И. Федик (Россия, Подольск, НИИ НПО «Луч») (МРК)
12-8-1-0 Водород в металлах и сплавах
В.А. Гольцов (Украина, Донецк, ДонНТУ) (МРК)
Л.Ф. Гольцова (Украина, Донецк, ДонНТУ) (МРК)
12-8-2-0 Водородная деградация
12-8-3-0 Системы наводороживания конструкционных материалов
12-8-4-0 Статическая и динамическая прочность материалов
Н.Н. Гердюков (Россия, Саров, ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ) (МРК)
12-8-5-0 Газары. Применение газаров
12-8-6-0 Электропечи для термовакуумных процессов. Вакуумные электропечи сопротивления
Э.Н. Мармер (Россия, Москва, ОАО «ВНИИЭТО») (МРК)
12-8-7-0 Новые конструкционные материалы для объектов альтернативной энергетики
12-9-0-0 Методы получения синтез-газа
А.Я. Столяревский (Россия, Москва, РНЦ «Курчатовский институт») (МРК)
12-9-1-0 Адиабатическая конверсия природного газа
12-10-0-0 Транспортные средства и приводы на водородном топливе
Т. Гертиг (Германия, Берлин) (МРК)
А.Л. Дмитриев (Россия, С.-Петербург, РНЦ «Прикладная химия») (МРК)
А.М. Домашенко (Россия, Балашиха, ОАО «Криогенмаш») (МРК)
Б.А. Соколов (Россия, Королев, РКК «Энергия» им. С.П. Королева) (МРК)
А.Ю. Раменский (Россия, Москва, «Аудит-Премьер») (МНКСР)
В.С. Соколов (Россия, С.-Петербург) (МНКСР)
12-11-0-0 Водородные автозаправочные станции
12-12-0-0 Водород для энергообеспечения зданий (водородные мини-электростанции на базе топливных элементов)

V. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

13. Наноструктуры

А.М. Липанов, акад. РАН (Россия, Ижевск, Институт прикладной механики УрО РАН) (МРК)
Ю.М. Шульга (Россия, Черноголовка, ИПХФ РАН) (МРК)
В.И. Кодолов (Россия, Ижевск, Научно-образовательный центр химической физики и мезоскопии УдНЦ УрО РАН) (МНКСР)
Ю.С. Нечаев (Россия, Москва, ФГУП «ГНЦ РФ – Центральный институт черной металлургии им. И.П. Бардина») (МНКСР)
Б.П. Тарасов (Россия, Черноголовка, ИПХФ РАН) (МНКСР)
Ю.Д. Третьяков, акад. РАН (Россия, Москва, ФНМ МГУ) (РНС)
13-1-0-0 Наносистемы: синтез, свойства, применение
Е.А. Гудилин (Россия, Москва, ФНМ МГУ) (РНС)
В.В. Куршева (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)
13-2-0-0 Фуллереновые структуры и углеродные наноматериалы для теплоизоляции
13-3-0-0 Фуллереновые структуры и углеродные наноматериалы для сенсоров водорода
М.В. Воробьева (Россия, Москва, ГИРЕДМЕТ) (МРК)
В.М. Арутюнян, акад. НАН Армении (Армения, Ереван, Ереванский государственный университет) (РНС)
13-4-0-0 Компьютерное моделирование синтеза углеродных наноматериалов с заданными свойствами
13-5-0-0 Углеродные наноструктуры для автотранспорта

VI. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АЭЭ

14. Термодинамический анализ в альтернативной энергетике

В.А. Хуснутдинов (Россия, Москва, РАО «ЕЭС России») (МРК)
А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

14-1-0-0 Термодинамический анализ основных энергетических процессов в альтернативной энергетике
14-2-0-0 Эксергетический анализ основных энергетических процессов в альтернативной энергетике

VII. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭНЕРГЕТИКИ

15. Основные проблемы энергетики и альтернативной энергетики

15-1-0-0 Аккумулирование электрической энергии
15-2-0-0 Сверхпроводящие материалы. Сверхпроводимость. Сверхпроводимость в энергетике
15-3-0-0 Новые циклы и схемы термотрансформаторов
15-4-0-0 Проблемы освещения мегаполисов

16. Применение гелия и специальных материалов в транспортных средствах

Ю.А. Рыжов, акад. РАН (Россия, Москва, Международный инженерный университет) (РНС)
16-1-0-0 Дирижабли для перевозки крупногабаритных грузов
16-2-0-0 Дирижабли для контроля за чрезвычайными ситуациями в мегаполисах: автоинспекция, пожарная безопасность, антитерроризм, наблюдение за техническим и экологическим состоянием промышленных зданий и сооружений. Энергонадзор (контроль тепловых утечек зданий в масштабе города)
16-3-0-0 Пожарные, нейтрализационные, полицейские дирижабли

17. Энергетика и экология

А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)
О.Л. Фиговский (Израиль, Мигдал Ха'Емек, Израильский исследовательский центр «Polymate») (МРК)
М.В. Воробьева (Россия, Москва, ГИРЕДМЕТ) (МРК)
17-1-0-0 Парниковый эффект
17-2-0-0 Экологические проблемы мегаполисов
17-3-0-0 Экология воздушной среды и космического пространства
17-4-0-0 Экология водных ресурсов
17-5-0-0 Проблемы вредных выбросов в атмосферу тепловыми электрическими станциями
17-6-0-0 Проблемы загрязнения почвы традиционными энергоносителями
17-7-0-0 Экологический туризм и экокурорты
17-8-0-0 Проблемы переработки промышленных и бытовых отходов

18. Энергоэффективные способы и устройства разделения и очистки агрессивных газовых смесей

А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)
А.А. Боброва (Россия, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ)

19. Экология и энергоресурсы пустынь

20. Вода, ее свойства. Водоподготовка, применение

21. Вибрация и акустические воздействия энергетических объектов на окружающую среду

VIII. ЗАКОНОДАТЕЛЬНАЯ БАЗА, СМИ, ПОДДЕРЖКА ГОСУДАРСТВА

22. Законодательная база

П.Б. Шелищ (Россия, Москва, Государственная Дума РФ, президент НАВЭ) (МНКСР)
22-1-0-0 Законодательная база альтернативной энергетики в России
22-2-0-0 Законодательное обеспечение инновационного развития водородной энергетики
22-3-0-0 Законодательная база альтернативной энергетики стран СНГ
22-4-0-0 Законодательная база экологии

IX. КАДРОВОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ОБРАЗОВАНИЕ

23. Образование и научно-исследовательские центры

Л.А. Илькаева (Россия, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ) (МНКСР)
Б.Ф. Реутов (Россия, Москва, Федеральное агентство образования и науки РФ) (МРК)
А.В. Чувиковский (Россия, Саров, ИПК РФЯЦ-ВНИИЭФ) (МРК)
Ю.П. Щербак (Россия, Саров, СарФТИ) (МНКСР)
Ж.-П. Концен (Бельгия, Кармановский институт гидрогазодинамики) (МРК)
23-1-0-0 Образовательная деятельность в области альтернативной энергетики и экологии
23-1-1-0 Образовательная деятельность в рамках школьной программы.
23-1-2-0 Образовательная деятельность в вузах
23-2-0-0 Водородные технопарки, наукограды
23-3-0-0 Молодежь в науке и технике

X. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АЭЭ

24. Экономические аспекты

24-1-0-0 Инвестиционная привлекательность различных стран мира и фирм
24-2-0-0 Запасы традиционных энергоресурсов стран экспортеров и мировые запас
24-3-0-0 Государственные научно-технические программы развития водородной энергетики

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

24-4-0-0 Экономический анализ
В.А. Хуснутдинов (Россия, Москва, РАО «ЕЭС России») (МРК)
24-5-0-0 Бизнес-планирование

XI. ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, УСТРОЙСТВА И ИХ ВНЕДРЕНИЕ

25. Нанотехнологии для альтернативной энергетики

А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)
В.В. Куршева (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)
О.Н. Ефимов (Россия, Черноголовка, ИПХФ РАН)
25-1-0-0 Нанотехнологии в процессах синтеза оксидов металлов, в производстве твердооксидных топливных элементов
25-2-0-0 Нанотехнологии в изготовлении клеточных каркасов для медицинских целей
25-3-0-0 Радиационно-химические нанотехнологии в производстве новых типов фторполимерных композиционных материалов

26. Инновационные решения в области энергетики и альтернативной энергетики

А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)

27. Информационные технологии

XII. ТРАНСПОРТНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

28. Криогенные и пневматические транспортные средства

А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)
28-1-0-0 Криогенный азотный транспорт
28-2-0-0 Автомобили на инертных газах для опасных объектов (пожарные, служебные аэропортов, складов горючесмазочных материалов, для взрывоопасных химических производств и др.)
28-3-0-0 Пневматические транспортные средства

29. Бортовые аккумуляторы

29-1-0-0 Тепловые аккумуляторы энергии
А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)
29-1-1-0 Температура выше 273 К
29-1-2-0 Температура ниже 273 К
29-1-3-0 Температура ниже 77 К
29-2-0-0 Маховичные аккумуляторы энергии
29-3-0-0 Электрические аккумуляторы энергии
29-4-0-0 Пружинные аккумуляторы энергии
29-5-0-0 Пневматические аккумуляторы энергии
29-6-0-0 Химические аккумуляторы энергии

30. Мультирежимные транспортные средства

А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)
О.Б. Баклицкая (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)

31. Системы внешней и бортовой рекуперации энергии транспортных средств

А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)

32. Литий-ионные источники тока и суперконденсаторы

XIII. ДОБЫЧА ПРИРОДНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

33. Ювенильный водород в процессах геотектоники и геохимии

С.В. Дигонский (Россия, Екатеринбург, ФГУП «Урангеологоразведка») (МРК)
В.Л. Сывороткин (Россия, Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова) (МРК)
33-1-0-0 Роль водорода в химическом строении мироздания
33-2-0-0 Движущие силы развития Земли и планет
33-3-0-0 Водород в ядре Земли
33-4-0-0 Геология и геохимия природных газов зон глубинных разломов
33-5-0-0 Транспорт ювенильного водорода через толщу Земли и формирование электрозаряженных зон
33-6-0-0 Природный синтез углеродистых веществ
33-7-0-0 Глубинная дегазация Земли, глобальные катастрофы и аномальные явления

XIV. КАТАЛИЗ В АЭЭ

34. Катализ

З.Р. Исмагилов (Россия, Новосибирск, Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН) (МРК)
С.М. Алдошин, акад. РАН (Россия, ИПХФ РАН, Черноголовка) (РНС)
В.Н. Пармон, акад. РАН (Россия, Новосибирск, Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН) (РНС)
В.А. Кириллов (Россия, Новосибирск, Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН) (МРК)
О.Н. Ефимов (Россия, Черноголовка, ИПХФ РАН) (МРК)
Н.Н. Вершинин (Россия, ИПХФ РАН, Черноголовка)
34-1-0-0 Каталитические методы синтеза альтернативного топлива
34-2-0-0 Катализ в совмещенных схемах «производство энергии и получение полезных продуктов из природного газа»
34-3-0-0 Катализ в генерации рабочего тела в газотурбинных установках
34-4-0-0 Катализ в топливных элементах
34-5-0-0 Катализ в процессах получения синтез-газов и водорода

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

34-6-0-0 Каталитические методы очистки водорода
34-7-0-0 Катализ в очистке промышленных газовых выбросов энергетических систем
34-8-0-0 Катализ в системах очистки технических вод
34-9-0-0 Фотокаталитические и электрокаталитические методы получения водорода
34-10-0-0 Разработка и исследование свойств материалов для формирования каталитических слоев в топливных элементах
34-11-0-0 О механизмах каталитического действия. Влияние природы металлов и степени их окисления на каталитическую активность
34-12-0-0 Нанокомпозиты для применения в качестве катализаторов. Влияние размерного фактора на каталитическую активность
34-13-0-0 Альтернативные катализаторы без применения платины
34-14-0-0 Проблемы отравления катализаторов
34-15-0-0 Носители катализаторов: дизайн, синтез, свойства
А.Я. Вуль (Россия, С.-Пб., ФТИ им. Иоффе)
34-16-0-0 Каталитические слои для топливных элементов в планарном исполнении
34-17-0-0 Золь-гель метод для получения катализаторов и носителей катализаторов
34-18-0-0 Каталитическая конверсия топлив и мембранные технологии в процессах производства водородсодержащих топливных композиций и особо чистого водорода

XV. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

35. Энергосберегающие технологии, системы, материалы и приборы

А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)

XVI. ПРОБЛЕМЫ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

36. Проблемы нефтегазовой и угольной промышленности

А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)
36-1-0-0 Постановка задач для ученых и инженеров с целью формулировки ТЗ для НИР и НИОКР с учетом экологического аспекта

37. Нефтегазовые трубопроводы и экология окружающей среды

Г.И. Сарапулова (Россия, Иркутск, НИТУ)
37-1-0-0 Защита от образования метаногидратов при добыче газа

XVII. ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И УСТРОЙСТВА

38. Оптические явления и устройства

XVIII. ГАЗОТУРБИННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

39. Газотурбинные технологии

XIX. ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ПРОИЗВОДСТВА

XX. ПРОБЛЕМЫ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

40-1-0-0 Экологически чистые технологии изготовления древесных изделий без применения синтетических смол-связующих

XXI. НАУКИ О ЗЕМЛЕ

XXII. ИНФОРМАЦИЯ В ОБЛАСТИ АЭЭ

41. Информация

41-1-0-0 Краткие сообщения
А.И. Саликов (Россия, Москва, ДОР ЦНИИатоминформ) (МНКСР)
Е.М. Тарараева (Россия, Москва, Дор ЦНИИатоминформ) (МНКСР)
Е.А. Гудилин (Россия, Москва, ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова) (РНС)
И.В. Лобанова (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)
41-2-0-0 Периодические издания
41-3-0-0 Интернет-ресурсы
41-4-0-0 Научные биографии ученых мира
41-5-0-0 Научные фонды, научные проекты
41-6-0-0 Международные научные конференции
41-7-0-0 Рекламные материалы научных организаций, инвестиционных фирм и фирм-производителей
41-8-0-0 Новые научные книги
41-9-0-0 Интеллектуальная собственность
41-10-0-0 Энциклопедия альтернативной энергетики. Термины и определения
41-11-0-0 Отзывы, письма в редакцию, краткие сообщения
41-12-0-0 Обращения членов редакционного научного совета
41-13-0-0 Энергетические компании
41-14-0-0 Новости Редколлегии
41-15-0-0 Научные организации
41-16-0-0 Новости науки и техники

РНС — Редакционный научный совет; МРК — Международный редакционный комитет;
МНКСР — Международный научно-консультативный совет редакции;
ЭС — Экспертный совет; МСР — Международный совет рецензентов

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

TOPICS OF INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL FOR ALTERNATIVE ENERGY AND ECOLOGY

I. RENEWABLE ENERGY

1. Solar energy

A.Steinfield (Switzerland, Zurich, ETH-Swiss Federal Institute) (IEB)
G.I. Isakov (Azerbaijan, Baku, Institute of Physics of NAS of Azerbaijan) (DECH)
I.G. Khidirov (Uzbekistan, Tashkent, Institute of Nuclear Physics of NAS of Uzbekistan) (IEB)
S.Geruny (Armenia, Yerevan, Yerevan State University) (IEB)
S.M. Raza (Pakistan, Quetta, University Of Balochistan) (IEB)
S.Z. Ilyas (Pakistan, Quetta, University Of Balochistan) (IEB)
A.M. Pendjiev (Turkmenistan, Ashkhabat-32, Tutkmenian Polytechnic Institute) (IEB)
V.F. Gremenok (Belorussia, Minsk, Joined Institute of Solid State and Semi-conductor Physics) (IEAB)
V.A. Butuzov (Russia, Krasnodar, «Yuzhgeoteplo»)
1-1-0-0 History of solar energy
1-2-0-0 Solar-hydrogen energy
T.N. Veziroglu (USA, Miami, IAHE, UNIDO-ICHET) (HECH)
1-2-1-0 Materials for solar-hydrogen energy
1-3-0-0 Solar power plants
1-3-1-0 Silicone solar thermal electric plants
1-3-2-0 Space solar stations
1-3-3-0 Photoelectric cell
1-3-4-0 Photovoltaic effect in semiconductor structures. Photoelectric modules
1-4-0-0 Ground solar stations
1-4-1-0 Solar collectors
1-5-0-0 Solar cities
1-5-1-0 Solar buildings
1-5-2-0 Solar refrigerators
1-5-3-0 Solar water-lifting systems
1-5-4-0 Solar energy units
1-6-0-0 Solar transport
1-7-0-0 Solar radiation concentrators

2. Wind energy

I.Z. Boguslavskiy (Russia, Moscow, DBREPE RAS) (IEB)
V.L. Okulov (Russia, Novosibirsk, SB RAS)
G.A.M. van Kuik (Netherlands, Delft, Wind Energy Research Institute)
2-1-0-0 Wind Energy and Architecture
2-2-0-0 Wind Energy and Ecology
2-3-0-0 Unique Wind Energy Solutions
2-4-0-0 Sail-Driven Wind Energy
2-5-0-0 Hybrid Wind Turbines
2-6-0-0 History of Wind Energy
2-7-0-0 Combined Wind and Hydrogen Energy
2-8-0-0 Electric Power Generators for Wind Energy
2-9-0-0 New Designs of Vertical-Axis Wind Turbines
2-10-0-0 Horizontal-Axis Wind Turbines
2-11-0-0 Savonius Vertical-Axis Wind turbines
2-12-0-0 Darrieus Vertical-Axis Wind Turbines
2-13-0-0 Combined Wind and Solar Power Plants
2-14-0-0 Future of Wind Energy
2-15-0-0 Balloon-Based Wind Energy
2-16-0-0 Wind Energy Materials
2-17-0-0 Computer Simulations of the Time Profile of Dynamic Wind Velocity Component
2-18-0-0 Integrated Modeling of Vertical-Axis Wind Turbines
2-19-0-0 Energy Conversion in Wind Turbines
2-20-0-0 Wind Energy Applications. Engineering, Economy, Ecology

3. Marine hydroenergetics

3-1-0-0 History of energy of tides
A.L. Gusev (Russia, Sarov, STC «TATA»)
3-2-0-0 Sea waves energy
3-3-0-0 Sea tide energy

4. Geothermal energy

V.A. Butuzov (Russia, Krasnodar, «Yuzhgeoteplo»)
4-1-0-0 History of geothermal energy
4-2-0-0 Basic research into geothermal energy
4-3-0-0 Problems of geothermal energy assimilation
4-4-0-0 Role of modeling and monitoring in geothermal energy assimilation. Appraisal of geothermal resources
4-5-0-0 Geothermal plants
4-5-1-0 Geothermal power plants
4-5-2-0 Geothermal heat plants
4-6-0-0 Efficiency and reliability of geothermal heat and power plants. Major ways to improve the efficiency of geothermal heat and power plants
4-7-0-0 Geothermal resources of world countries and prospects of their development

5. Energy of biomass

S.A. Markov (USA, Greencastle, DePauw University) (IEB)
A.L. Gusev (Russia, Sarov, STC «TATA»)
5-1-0-0 Biogas plants
5-2-0-0 Thermochemical gas generators
5-3-0-0 Energy of biomass and ecology

6. Small hydroenergetics

S.Shatvoryan (Armenia, Yerevan, Energy Strategy Center) (IEB)
6-1-0-0 Equipment for small and micro hydro-power plants (HPP)
6-2-0-0 Derivation micro hydro-power plants
6-3-0-0 Small AeroHPPs

7. Unconventional sources of renewed energy

V.A. Khusnutdinov (Russia, Moscow, RAO UES of Russia) (IEB)
A.L. Gusev (Russia, Sarov, STC «TATA»)
7-1-0-0 Application of ice in energy. Glacial power stations

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

7-2-0-0 Application of cold of permafrost for thermostatic control of domestic and process structures
7-3-0-0 Physical and chemical properties of ice
7-4-0-0 Thermal properties of ice
7-5-0-0 Thermodynamic basis for production and application of ice
7-6-0-0 Equipment for ice testing
7-7-0-0 Facilities for ice production
7-8-0-0 Methods and machinery for ice emergent break up for safety depth devices and over-land vehicles undergoing disaster
7-9-0-0 Binary ice in science and technique
7-10-0-0 Application of ice for construction of engineering and technical, and architecture structures
7-11-0-0 Ice dynamics and strength. Embrittlement dynamics. Experimental methods of ice breaking up dynamic mechanics
7-12-0-0 Numerical and combined numerical and experimental methods of ice breaking up dynamic mechanics
7-13-0-0 Techniques for removing ice from water reservoirs
7-14-0-0 Cold storage and application
7-15-0-0 Transport of icebergs and production of fresh water
7-16-0-0 Thermogradient energy

8. RES based power complexes

II. NONRENEWABLE energy

9. Atomic energy

A.Ya. Stolyarevskiy (Russia, Moscow, RRC «Kurchatov Institute») (IEB)
A.G. Chudin (Russia, Moscow, Federal Agency for Nuclear Energy) (IEAB)
V.A. Afanas'ev (Russia, Sarov, RFNC-VNIIEF) (IEB)
M.A. Prelas (USA, Columbia, University of Missouri) (IEB)
9-1-0-0 Atomic-hydrogen energy
N.N. Ponomaryov-Stepnoy, Acad. RAS (Russia, Moscow, RRC «Kurchatov Institute») (SEB)
A.Ya. Stolyarevskiy (Russia, Moscow, RRC «Kurchatov Institute») (IEB)
V.N. Fateev (Russia, Moscow, RRC «Kurchatov Institute») (IEB)
A.L. Gusev (Russia, Sarov, STC «TATA»)
9-1-1-0 History of atomic-hydrogen energy
N.N. Ponomaryov-Stepnoy, Acad. RAS (Russia, Moscow, RRC «Kurchatov Institute») (SEB)
A.Ya. Stolyarevskiy (Russia, Moscow, RRC «Kurchatov Institute») (IEB)
A.L. Gusev (Russia, Sarov, STC «TATA»)
9-1-2-0 High-temperature gas reactors (HTGR) for hydrogen production via high-temperature processes
9-1-3-0 Fast reactors with sodium cooling (SC) to produce midtemperature heat, and synthesis gas and hydrogen
9-1-4-0 Fast reactors with lead cooling as reactors of future generation to produce high-temperature heat
G.L. Khorasanov (Obninsk, SSC of the RF – Institute for Physics and Power Engineering Named After A.I. Leypunsky) (IEB)
9-2-0-0 Atomic energy for vehicles
I.V. Shamanin (Russia, Tomsk, Tomsk Polytechnical Univ.) (IEB)
9-2-1-0 Radionuclide heat sources
9-2-2-0 Radionuclide thermoelectric generators
9-2-3-0 Thermo- and radiation-stimulated phase transformation in alloys incorporated (carbides, nitrides, nitrides-hydrides, carbohydrides and hydrides of transition metals, high-temperature, super-conducting materials, intermetallic composition)

10. Explosion energy

A.L. Mikhailov (Russia, Sarov, Institute of Experimental Gasdynamics and Physics of Explosion RFNC-VNIIEF) (IEB)
N.N. Gerdyukov (Russia, Sarov, Institute of Experimental Gasdynamics and Physics of Explosion RFNC-VNIIEF) (IEB)
A.A. Sterzer (Russia, Novosibirsk, MATEM Co. Ltd) (IEB)
V.N. German (Russia, Sarov, Institute of Experimental Gasdynamics and Physics of Explosion RFNC-VNIIEF) (IEB)
10-1-0-0 Explosion technologies
10-2-0-0 Computer simulation of problems for explosion energy
M.A. Syrunin (Russia, Sarov, IEB RFNC-VNIIEF)
10-2-1-0 Setting up problems for explosion energy
10-2-2-0 Mobile Lagrangian and Euler grids
10-3-0-0 Explosion deuterium energy
10-4-0-0 Explosion energy for syntheses of new materials
10-4-1-0 Materials synthesis and sticking by the explosion
10-4-2-0 Shock-wave sticking
10-4-3-0 Computer modelling of processes of material shock-wave sticking
10-5-0-0 Explosives
10-6-0-0 Blasting chambers
A.A. Sterzer (Russia, Novosibirsk, MATEM Co. Ltd) (IEB)
10-7-0-0 Extremal state of matter. Detonation. Shock waves
10-8-0-0 Energy materials and physics of detonation
10-9-0-0 Equations of the state and phase transition

III. THERMONUCLEAR ENERGY

11. Thermonuclear energy

V.N. Lobanov (Russia, Sarov, RFNC-VNIIEF) (IEB)
11-1-0-0 Investigations on the controlled thermonuclear fusion
11-2-0-0 X-ray thermonuclear fusion
11-3-0-0 Beam fusion
11-4-0-0 Inertial fusion
11-5-0-0 Isotope effect
11-6-0-0 Cryogenic tritium targets
11-7-0-0 High-pressure targets designed for research of muonic catalysis processes in nuclear fusion
11-8-0-0 International project of thermonuclear fusion reactor, ITER
11-9-0-0 Radiological protection and nuclear security
11-10-0-0 Production of radioisotopes and application
11-11-0-0 Fuel cycle and ecology
11-12-0-0 Design, construction and maintenance of nuclear research and power reactors
11-13-0-0 Production of components and materials required for application in nuclear reactors and fuel cycles thereof
11-14-0-0 TOKAMAK systems
11-15-0-0 Auxiliary magnetocumulative systems

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

IV. HYDROGEN ECONOMY

12. Hydrogen economy

F. Karaosmanoglu (Turkey, Istanbul, Istanbul Technical Univ.) (IEB)
Z. Sen (Turkey, Istanbul, Istanbul Technical University) (IEB)
A.L. Gusev (Russia, Sarov, STC «TATA»)
12-1-0-0 History of hydrogen economy
T.N. Veziroglu (USA, Miami, IAHE, UNIDO-ICHET) (HECH)
A.G. Galeev (Russia, Sergiev Posad, JSC «NIIHIMMASH») (IEB)
12-2-0-0 Safety of hydrogen energy
A.G. Galeev (Russia, Sergiev Posad, JSC «NIIHIMMASH») (IEB)
J. Kleperis (Latvia, Riga, University of Latvia) (IEB)
L.F. Belovodskiy (Russia, Sarov, RFNC-VNIIEF) (IEAB)
12-2-1-0 Hydrogen recombinators
A.L. Gusev (Russia, Sarov, STC «TATA»)
12-2-2-0 Systems of inert gas blowing off
12-2-3-0 Ensuring of the safe operation of cryogenic systems
12-2-4-0 Safe application of hydrogen on board the vehicle
12-3-0-0 Gas analytical systems and hydrogen sensors
J. Kleperis (Latvia, Riga, University of Latvia) (IEB)
A.M. Polyansky (Russia, S.-Petersburg, «Electronic & Beam Technologies Ltd.») (IEB)
V.M. Aroutiounian, Academician NAS of Armenia (Armenia, Yerevan, Yerevan State University) (SEB)
J. Schoonman (Netherlands, Delft, Delft University of Technology) (IEAB)
L.I. Trakhtenberg (Russia, Moscow, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics RAS) (IEB)
12-4-0-0 Hydrogen storage
J. Kleperis (Latvia, Riga, University of Latvia) (IEB)
O.N. Srivastava (India, Varanasi, Banaras Hindu University) (IEB)
S.M. Aldoshin, Acad. RAS (Russia, Chernogolovka, IPCP RAS) (SEB)
B.P. Tarasov (Russia, Chernogolovka, IPCP RAS) (IEB)
12-4-1-0 Hydrogen storage in carbon nanosystems
O.N. Efimov (Russia, Chernogolovka, IPCP RAS) (IEB)
B.K. Gupta (India, Varanasi, Banaras Hindu University) (IEB)
A.V. Vakhroushev (Russia, Izhevsk, Institute of Applied Mechanics of Ural branch of RAS) (IEB)
12-4-2-0 Hydrogen storage in an incapsulated gaseous state: in microspheres, in foam metals, in zeolites and others
V.S. Kogan (Ukraine, Khar'kov, NSC Kharkov Institute of Physics and Technology) (IEB)
A.F. Chabak (Russia, Moscow, Academy of perspective technologies) (IEB)
E. F. Medvedev (Russia, Sarov, RFNC-VNIIEF) (IEB)
12-4-3-0 Hydrogen storage in gaseous state under pressure
A.S. Koroteev, Academician RAS (Russia, Moscow, Keldysh Research Center) (SEB)
12-4-3-1 Hydrogen storage in gaseous state in large reservoirs
12-4-3-2 Hydrogen storage in gaseous state in tank
12-4-4-0 Hydrogen storage in liquid state
A.M. Arkharov (Russia, Moscow, Bauman Moscow State Technical University) (IEB)
A.M. Domashenko (Russia, Balashikha, «Cryogenmash») (IEB)
A.A. Makarov (Russia, Sergiev Posad, JSC «NIIHIMMASH») (IEB)
G.G. Shevyakov (Russia, Balashikha, JSC «Cryogenmash») (IEB)
V.S. Travkin (USA, Los Angeles, University of California) (IEB)
V.S. Kogan (Ukraine, Khar'kov, NSC Kharkov Institute of Physics and Technology) (IEB)
I.F. Kuz'menko (Russia, Balashikha, JSC «Cryogenmash») (IEAB)
A.G. Galeev (Russia, Sergiev Posad, JSC "NIIHIMMASH") (IEB)
12-4-4-1 Hydrogen storage in cryogenic liquid state in large reservoirs
12-4-4-2 Hydrogen storage in cryogenic liquid state on board the vehicles
B.A. Sokolov (Russia, Korolyov, S.P. Korolyov Energia RSC) (IEB)
12-4-5-0 Hydrogen storage in chemically-bonded state in liquid media
12-4-6-0 Hydrogen storage in solid phase state in metal hydride systems
M.D. Hampton (USA, Orlando, Univ. of Central Florida) (DECH)
B.P. Tarasov (Russia, Chernogolovka, IPCP RAS) (IEB)
S.P. Gabuda (Russia, Novosibirsk, IIC SO RAS) (IEB)
V.L. Kozhevnikov (Russia, Ekaterinburg, ISSC Ural Branch of RAS) (IEB)
12-4-7-0 Hydrogen storage in combined systems
12-4-8-0 Hydrogen storage in adsorbed state in cryogenic adsorbents
12-4-9-0 Novel methods of hydrogen storage
12-5-0-0 Hydrogen production methods
I.F. Kuz'menko (Russia, Balashikha, JSC «Cryogenmash») (IEAB)
V.V. Lunin, Acad. RAS (Russia, Moscow, M.V. Lomonosov MSU)
12-5-1-0 Radiolysis
M.A. Prelas (USA, Columbia, University of Missouri-Columbia) (IEB)
12-5-2-0 Electrolysis
12-5-3-0 Hydrogen production via thermochemical dissociation of water
12-5-4-0 Hydrogen production by ammonia decomposition
V.A. Kirillov (Russia, Novosibirsk, Boreskov Institute of Catalysis) (IEB)
12-5-5-0 Method of catalytic conversion (reforming) of gaseous and liquid hydrocarbons
12-5-6-0 Hydrogen production by partial oxidation of hydrocarbons
12-5-7-0 High-temperature process for hydrogen production
12-5-8-0 Hydrates
S.P. Gabuda (Russia, Novosibirsk, IIC SO RAS) (IEB)
12-5-9-0 Hydrogen production on board of the vehicle from organic fuels
12-5-10-0 On board hydrogen production via reaction of interaction of water and metals (aluminium, magnesium etc.)
12-5-10-1 Mechanic and electric methods of removal of oxide layer during reaction
12-5-10-2 Chemical methods of removal of oxide layer during reaction
12-5-10-3 Ultrasonic methods of removal of oxide layer during reaction
12-5-10-4 Methods of increase of specific surface of metals
12-5-10-5 Thermal and pressure methods of intensification of hydrogen production
12-5-10-6 Devices for on board hydrogen production via reaction of interaction of water and metals
12-5-10-7 Devices for hydrogen production via reaction of interaction of water and metals for domestic applications
12-5-10-8 Devices for hydrogen production via reaction of interaction of water and metals for commercial applications
12-5-10-9 Physico-mathematical model of processes of hydrogen production
12-5-10-10 Novel lines of development of method for on-board application
12-5-11-0 Hydrogen production from deep-sea hydrogen sulphide
I.M. Neklyudov (Ukraine, Khar'kov, Khar'kov Physical Technical Institute) (IEB)
N.A. Azarenkov (Ukraine, Khar'kov, Khar'kov Physical Technical Institute) (IEB)
V.I. Tkachenko (Ukraine, Khar'kov, Khar'kov Physical Technical

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Institute) (IEB)
12-5-12-0 Novel hydrogen production methods
12-6-0-0 Hydrogen transport
A.G. Galeev (Russia, Sergiev Posad, JSC «NIIHIMMASH») (IEB)
12-6-1-0 Transport of liquid cryogenic products by pipelines
A.M. Domashenko (Russia, Balashikha, JSC «Cryogenmash») (IEB)
12-6-2-0 Cooling of cryogenic system mains
12-6-3-0 Transient processes in cryogenic systems
12-7-0-0 Fuel cells
B.A. Sokolov (Russia, Korolyov, S.P. Korolyov Energia RSC) (IEB)
Yu.N. Shalimov (Russia, Voronezh, VSTU) (IEB)
V.P. Pakhomov (Russia, Moscow, RRC «Kurchatov Institute») (IEB)
12-7-1-0 Research and production of fuel cells
12-7-1-1 Membranes for fuel cells
12-7-1-2 Computer simulation of fuel cell operation
12-7-2-0 Fuel cells application
12-7-2-1 Power supply on fuel cells with methanol conversion for portable devices
12-7-3-0 Fuel cells with hydrogenous fuel pre-processing
12-8-0-0 Structural materials
P.G. Berezhko (Russia, Sarov, RFNC-VNIIEF) (IEB)
A.M. Polyansky (Russia, S.-Petersburg, «Electronic & Beam Technologies Ltd.») (IEB)
V.M. Chertov (Russia, Moscow) (IEB)
Yu.N. Shalimov (Russia, Voronezh, VSTU) (IEB)
P.Saint-Gregoire (France, University de Toulon et du Var) (DECH)
F.A. Lewis (Great Britain, Belfast, The Queen's University of Belfast) (SEB)
A.T. Ponomarenko (Russia, Moscow, Enikolopov Institute of Synthetic Polymer Materials of RAS) (IEAB)
L.V. Spivak (Russia, Perm', Perm' State University) (IEAB)
M.V. Gol'tsova (Ukraine, Donetsk, Donetsk STU) (IEAB)
N.M. Vlasov (Russia, Podol'sk, SRI SIA «Luch») (IEB)
I.I. Fedik (Russia, Podol'sk, SRI SIA «Luch») (IEB)
12-8-1-0 Hydrogen in metals and alloys
V.A. Gol'tsov (Ukraine, Donetsk, DonSTU) (IEB)
L.F. Gol'tsova (Ukraine, Donetsk, DonSTU) (IEB)
12-8-2-0 Hydrogen degradation
12-8-3-0 Structural materials hydrogenation systems
12-8-4-0 Static and dynamic strength of structural materials
N.N. Gerdyukov (Russia, Sarov, Institute of Experimental Gasdynamics and Physics of Explosion RFNC-VNIIEF) (IEB)
12-8-5-0 Gasars. Application of gasars in marine and air fleet, motor-car construction
12-8-6-0 Electrical furnaces for thermovacuum processes
E.N. Marmer (Moscow, VNIIETO)
12-8-7-0 New structural materials for renewable energy structures
12-9-0-0 Synthesis-gas production methods
A.Ya. Stolyarevskiy (Russia, Moscow, RRC «Kurchatov Institute») (IEB)
12-9-1-0 Adiabatic conversion of the natural gas
12-10-0-0 Hydrogen fuel vehicles and engines
T. Gaertig (Germany, Berlin) (IEB)
A.L. Dmitriev (Russia, S.-Petersburg, RSC «Applied Chemistry») (IEB)
A.M. Domashenko (Russia, Balashikha, JSC «Cryogenmash») (IEB)
B.A. Sokolov (Russia, Korolyov, S.P. Korolyov Energia RSC) (IEB)
A.Yu. Ramenskiy (Russia, Moscow, Audit-Premier) (IEAB)
V.S. Sokolov (Russia, S.Petersburg) (IEAB)
12-11-0-0 Hydrogen filling stations
12-12-0-0 Hydrogen for providing buildings, structures and houses with energy. Micro hydrogen power plants based on fuel cells

V. STRUCTURAL MATERIALS

13. Nanostructures

A.M. Lipanov, Acad. RAS (Russia, Izhevsk, Institute of Applied Mechanics UB RAS) (IEB)
Yu.M. Shul'ga (Russia, Chernogolovka, JSC «Cryogenmash») (IEB)
V.I. Kodolov (Russia, Izhevsk, BRHE Centre of Chemical Physics and Mesoscopy) (IEAB)
Yu.S. Nechaev (Russia, Moscow, Bardin Research Institute of the Ferrous-Metals Industry) (IEAB)
B.P. Tarasov (Chernogolovka, IPCP RAS) (IEAB)
Yu.D. Tretiakov, Acad. RAS (Russia, Moscow, FMS MSU) (SEB)
13-1-0-0 Nanosystems: synthesis, properties, and application
E.A. Goodilin, Member Corresp. RAS (Russia, Moscow, FMS MSU) (SEB)
V.V. Kyrsheva (Russia, Sarov, STC «TATA»)
13-2-0-0 Fullerene structures and carbon nanomaterials for heat insulation
13-3-0-0 Fullerene structures and carbon nanomaterials for hydrogen sensors
M.V. Vorobiova (Russia, Moscow, GIREDMET) (IEAB)
V.M. Aroutiounian, Acad. NAS of Armenia (Armenia, Yerevan, Yerevan State University) (SEB)
13-4-0-0 Computer simulation of synthesis of carbon nanomaterials with specified properties
13-5-0-0 Carbon nanostructures for vehicles

VI. THERMODYNAMIC basics OF AEE

14. Thermodynamic analysis in renewable energy

V.A. Khusnutdinov (Russia, Moscow, RAO UES of Russia) (IEB)
A.L. Gusev (Russia, Sarov, STC «TATA»)
14-1-0-0 Thermodynamic analysis of basic energy generation processes in alternative energy
14-2-0-0 Exergetic analysis of basic energy generation processes in alternative energy

VII. ENVIRONMENTAL ASPECTS of ENERGY

15. Basic problems of energy and renewable energy

15-1-0-0 Electric energy storage
15-2-0-0 Superconductive materials. Superconductivity. Superconductivity of energy
15-3-0-0 New cycles and schemes for thermotransformers
15-4-0-0 Problems of megapolise illumination

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

16. Application of helium and special materials in vehicles

16-1-0-0 Airships to transfer large-sized cargoes
16-2-0-0 Airships to control states of emergency in megapolises: car inspection, fire safety, terrorism combat, technical and ecological state control of industrial buildings and structures. Energy control (heat leak control in buildings on a city's scale)
16-3-0-0 Fire fighting airships, counteracting, and police airships

17. Energy and ecology

O.L. Figovsky (Israel, Israel Research Center Polymate) (IEB)
M.V. Vorobiova (Russia, Moscow, GIREDMET) (IEB)
A.L. Gusev (Russia, Sarov, STC «TATA»)
17-1-0-0 Greenhouse gas effect
17-2-0-0 Ecological problems of industrial megapolises
17-3-0-0 Ecology of air atmosphere and space
17-4-0-0 Ecology of water resources
17-5-0-0 Problems of unhealthy atmospheric emissions by heat-electric generating plants
17-6-0-0 Problems of groung pollution by energy carriers
17-7-0-0 Ecological tourism and ecological resorts
17-8-0-0 Problems of factory and domestic waste utilization

18. Energy efficiency methods and facilities for agressive gas mixture separation and purification

A.L. Gusev (Russia, Sarov, STC «TATA»)
A.A. Bobrova (Russia, Sarov, RFNC-VNIIEF)

19. Ecology and power resources of deserts

20. Water, its properties. Water preparation, application

21. Vibration and acoustic effects of energy facilities on the environment

VIII. LEGISLATIVE BASIS, MASS media, STATE SUPPORT

22. Legislative basis

P.B. Shelishch (Russia, Moscow, RF State Duma, President of National Association of Hydrogen Energy) (IEAB)
22-1-0-0 Legislation basis for renewable energy in Russia
22-2-0-0 Legislation assurance for innovation development of hydrogen energy
22-3-0-0 Legislation basis for renewable energy in CIS
22-4-0-0 Legislation basis for ecology

IX. PERSONNEL MANAGEMENT AND education

23. Education and scientific research centres

B.F. Reutov (Russia, Moscow, Federal Agency for Education and Sciences of RF) (IEB)
A.V. Chuvikovskiy (Russia, Sarov, RFNC-VNIIEF) (IEB)
Yu.P. Shcherbak (Russia, Sarov, Sarov Physicotechnical Institute) (IEB)
J.-P. Contzen (Belgium, von Karman Institute for Fluid Dynamics) (IEB)
23-1-0-0 Educational activities in the field of alternative energy and ecology
23-1-1-0 Educational activity within school program
23-1-2-0 Educational activity in institutes of higher education
23-2-0-0 Hydrogen trading estates and science and research cities
23-3-0-0 Young people in alternative energy and ecology science and technology

X. ECONOMIC aspects OF AEE

24. Economical aspects

24-1-0-0 Investment attractiveness of various countries and companies in renewable energy
24-2-0-0 Resources of conventional energy sources in exporting countries and world resources
24-3-0-0 National scientific and technological programmes of the development of hydrogen economy
24-4-0-0 Economical analisys in renewable energy
V.A. Khusnutdinov (Russia, Moscow, RAO UES of Russia) (IEB)
24-5-0-0 Business-planning in renewable energy

XI. INNOVATION solutions, TECHNOLOGIES, FACILITIES AND THEIR INNOVATION

25. Nanotechnology for renewable energy

A.L. Gusev (Russia, Sarov, STC «TATA»)
V.V. Kursheva (Russia, Sarov, STC «TATA»)
O.N. Efimov (Russia, Sarov, STC «TATA»)
25-1-0-0 Nanotechnology in the metal oxide synthesis and solid oxide fuel cells production
25-2-0-0 Nanotechnology in cell framework manufacturing for medical purposes
25-3-0-0 Radiation-chemical nanotechnology in production of new types fluoropolymer composite materials

26. Innovative solutions in alternative energy and ecology

A.L. Gusev (Russia, Sarov, STC «TATA»)

27. Information technologies (IT)

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

XII. ENVIRONMENTAL VEHICLES

28. Cryogenic and pneumatic vehicles

A.L. Gusev (Russia, Sarov, STC «TATA»)
28-1-0-0 Cryogenic nitrogen transport
28-2-0-0 Inert gas-based cryogenic vehicles for hazardous structures: fire engines, air port auxiliary vehicles, fuel and lubricant storage, vehicles in dangerously explosive chemical production
28-3-0-0 Pneumatic vehicles

29. On-board energy accumulators

29-1-0-0 Thermal energy accumulators
A.L. Gusev (Russia, Sarov, STC «TATA»)
29-1-1-0 Temperature above 273 K
29-1-2-0 Temperature below 273 K
29-1-3-0 Temperature below 77 K
29-2-0-0 Flywheel energy accumulators
29-3-0-0 Electrical energy accumulators
29-4-0-0 Spring energy accumulators
29-5-0-0 Compressed-air energy accumulators
29-6-0-0 Chemical energy accumulators

30. Multy mode vehicles

A.L. Gusev (Russia, Sarov, STC «TATA»)
O.B. Baklitskaya (Russia, Sarov, STC «TATA»)

31. External and onboard vehicle energy recovery systems

A.L. Gusev (Russia, Sarov, STC «TATA»)

32. Lithium-ion current sources and supercapacitor

XIII. RECOVERY TECHNIQUES FOR AEE

33. Juvenile hydrogen in geotectonics and geochemistry processes

S.V. Digonskiy (Russia, Ekaterinburg, FGUP «Urangeologo-razvedka») (IEB)
V.L. Syvorotkin (Russia, Moscow, M. V. Lomonosov MSU) (IEB)
33-1-0-0 Role of hydrogen in chemical composition of the universe
33-2-0-0 Diving forces in the evolution of Earth and planets
33-3-0-0 Hydrogen in the Earth's core
33-4-0-0 Geology and geochemistry of natural gases in deep fault areas
33-5-0-0 Transport of juvenile hydrogen through the Earth stratum and formation of electrically charged zones
33-6-0-0 Natural synthesis of carbon-based substances
33-7-0-0 Deep degasifying of the Earth, global disasters and anomalous phenomena

XIV. CATALYSIS FOR AEE

34. Catalysis for renewable energy

Z.R. Ismagilov (Russia, Novosibirsk, Boreskov Institute of Catalysis) (IEB)
S.M. Aldoshin, Acad. RAS (Russia, Chernogolovka, IPCP RAS) (SEB)
V.N. Parmon, Acad. RAS (Russia, Novosibirsk, Boreskov Institute of Catalysis of SD RAS) (SEB)
V.A. Kirillov (Russia, Novosibirsk, Boreskov Institute of Catalysis of SD RAS) (IEB)
O.N. Efimov (Russia, Chernogolovka, IPCP RAS) (IEB)
N.N. Vershinin (Russia, Chernogolovka, IPCP RAS)
34-1-0-0 Catalytic methods for synthesis of alternative fuel
34-2-0-0 Catalysis in combined schemes «energy generation and production of useful products from natural gas»
34-3-0-0 Catalysis in generation of working fluid in gas turbines as an effective alternative flare generation method
34-4-0-0 Catalysis of fuel cells
34-5-0-0 Catalysis in processes of production of synthesis gas and hydrogen
34-6-0-0 Catalytic methods of hydrogen treatment
34-7-0-0 Catalysis in treating of power reactor waste gases
34-8-0-0 Catalysis in process water treatment systems
34-9-0-0 Photocatalytic and electrocatalytic methods for hydrogen production
34-10-0-0 Development and study of material properties to form catalytic layers in fuel cells
34-11-0-0 On mechanism of catalytic action. Effect of metal nature and degree of oxidation thereof on catalytic activity
34-12-0-0 Nanocomposites for application as catalysts. Effect of dimension factor on catalytic activity
34-13-0-0 Alternative catalysts with no platinum
34-14-0-0 Problems of catalyst poisoning
34-15-0-0 Catalyst carriers: design, synthesis, and properties
A.Ya. Vul' (Russia, St. Petersburg, Ioffe Institute)
34-16-0-0 Catalytic layers for fuel cells in planar design
34-17-0-0 Sol-gel process for production of catalysts and catalyst carriers
34-18-0-0 Catalytic conversion of fuel and technologies in the process of membrane production of hydrogen fuel compositions and ultra-pure hydrogen

XV. ENERGY SAVING

35. Energy-saving technologies, materials, systems, and instruments

А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

XVI. PROBLEMS OF OIL-AND-GAS COMPLEX

36. Problems of oil, gas, and coal industry

А.Л. Гусев (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)
36-1-0-0 Problem definition for scientists and engineers to form a Task Order for research and R&D works taking into account ecological aspect

37. Oil and gas pipelines and ecology

Г.И. Сарапулова (Россия, Иркутск, НИТУ)
37-1-0-0 Protection against formation of methanohydrates during gas production

XVII. OPTICAL PHENOMENA AND FACILITIES

38. Optical phenomena and facilities

XVIII. GAS-TURBINE TECHNOLOGIES

39. Gas-turbine technologies

XIX. ENVIRONMENTALLY CONSCIOUS FACTORIES

XX. ISSUES OF AGRICULTURE

40-1-0-0 Environmental technology manufacturing of wood products without the synthetic resin binder

XXI. EARTH SCIENCES

XXII. INFORMATION FOR AEE

41. Information

41-1-0-0 Brief messages
A.I. Salikov (Russia, Moscow, CNIIATOMINFORM) (IEAB)
E.M. Tararaeva (Russia, Moscow, CNIIATOMINFORM) (IEAB)
E.A. Goodilin, Member Corresponding RAS (Russia, Moscow, FMS MSU) (SEB)
I.V. Lobanova (Russia, Sarov, STC «TATA»)
41-2-0-0 Review of periodicals
41-3-0-0 Review of leading internet-resources
41-4-0-0 Prominent scientists' biographies
41-5-0-0 Scientific funds and scientific projects
41-6-0-0 International scientific conferences
41-7-0-0 Advertising matters of investment companies and manufacturers
41-8-0-0 Review of new scientific books
41-9-0-0 Intellectual property
41-10-0-0 Encyclopedia of renewable energy. Terms and definitions
41-11-0-0 Opinions, letters in publishing office, short articles
41-12-0-0 Messages of members of Scientific editorial board
41-13-0-0 Energetic companies
41-14-00 News of Editorial board
41-15-0-0 Scientific organizations
41-16-0-0 News

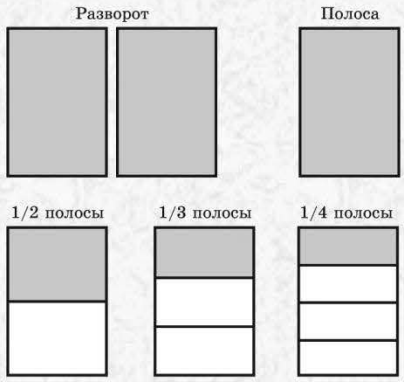
SEB — Scientific Editorial Board
IEB — International Editorial Board
IEAB — International Editorial Advisory Board
EB — Experts Board
IRB — International Reviewers Board

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

РЕКЛАМА В МЕЖДУНАРОДНОМ НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ»

Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» приглашает научные инсти туты, организации и промышленные предприятия разместить информацию о конференциях, выставках разрабатываемой и выпускаемой продукции в области альтернативной энергетики и экологии.

Площади рекламного модуля



Требования к макетам рекламных модулей, изготовленных заказчиком

Макет рекламного модуля должен иметь размер, соответствующий размеру печатного оттиска. Форматы макетов: растровый — TIFF (см. требования), векторный — Corel Draw (см. требования). Использование редактора Microsoft Word для проектирования макетов рекламных модулей не допускается.

Допускается предоставление макета модуля (кроме обложки) в формате Adobe Pagemaker версий 6.0, 6.5, 7.0. В этом случае должны предоставляться все связанные элементы, а также все используемые шрифты.

Требования к исходным рекламным материалам

Все элементы рекламного модуля (иллюстрации, логотипы, текст и др.) предоставляются в отдельных файлах.

1. Текст

Текст набирается гарнитурой Times New Roman, кегль 14, интервал полуторный. Допускается выделение важной информации полужирным начертанием. Формат Microsoft Word for Windows.

Использование OLE-объектов (графики, слайды презентаций, диаграммы в формате Microsoft Excel, результаты вычислений в математических и иных, в том числе собственных программах) в документах не допускается. Такие объекты присылаются в формате исходной программы и дублируются изображением (см. требования к иллюстрациям).

Использование дополнительных шрифтов (например, логотип выполнен специфической гарнитурой) оговаривается дополнительно. В этом случае предоставляется файл, содержащий начертание букв в формате TTF. Использование PS-шрифтов не допускается.

2. Иллюстрации

Все иллюстрации, находящиеся в рекламном модуле, должны предоставляться в отдельных файлах в форматах TIFF или BMP. Не допускается использование многослойных изображений. Черно-белые изображения должны быть в модели Grayscale. Цветные (обложка) — в модели CMYK. Все ч/б растровые изображения должны иметь разрешение 200 dpi, цветные — 250–400 dpi.

Для векторных изображений предпочтительным является использование формата Corel Draw (*.cdr) до версии 12.0 включительно.

Все встроенные эффекты (линзы, текстурные заливки, тени и т.д.) должны быть переведены в растровое изображение (bitmap). Векторные эффекты (Extrude, Envelope, Contour, Add Perspective, Blend, Distortion, Artistic media) должны быть преобразованы в кривые. Все текстовые объекты должны быть переведены в кривые. Размещение растровых рисунков в документе Corel Draw не допускается.

Стоимость размещения рекламных модулей

Объем рекламного модуля	Технические параметры	Цена публикации в одном номере (руб.)
Обложка (полноцветная)	285x205 мм	300 000
2-я или 3-я страницы обложки (полноцветная)	285x205 мм	25 000
Полный разворот на две полосы*	257x336 мм	10 000
Полная полоса 1/1*	257x168 мм	5 000
1/2 Полосы*	128x168 мм	5 000
1/3 Полосы*	85x168 мм	2 000
1/4 Полосы*	64x168 мм	1 000
СИСТЕМА СКИДОК		
При публикации в 2-3 номерах	10%	
При публикации в 4-6 номерах	15%	
При публикации в 7-9 номерах	20%	
При публикации в 10-12 номерах	50%	

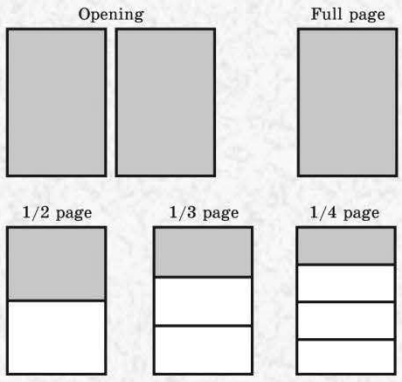
Для заказа рекламной площади и получения счета необходимо заполнить форму заявки и отправить ее по адресу gusev@hydrogen.ru или по факсу (83130) 6-31-07.
Редакция журнала оставляет за собой право отбора поступивших рекламных объявлений.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

ADVERTISEMENT IN INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL FOR ALTERNATIVE ENERGY AND ECOLOGY

The International scientific journal "Alternative energy and economy" invites scientific institutes, organizations and industrial enterprises to place advertisements on conferences, exhibitions, designed and production products in the field of alternative energy and ecology.

Spaces for advertisement module



General information on lay-outs of advertisement modules fabricated by a customer

The lay-out of an advertisement module is to have the dimension in accordance with that of a print. Lay-out formats: raster — TIFF (see General information), vector — Corel Draw (see General information). The use of Microsoft Word editor to design lay-outs of advertisement modules is not allowed.

The module lay-out (except the cover) in the format of 6.0, 6.5, 7.0 Adobe Pagemaker versions is allowed to be provided. In this case, all combined elements, and also all available fonts that are not included in the Microsoft Windows structure are to be provided.

Information on original advertisements

All elements of the advertisement module (illustrations, symbols, text, etc.) have to be put in individual files.

1. Text

Text is has to be composed by Times New Roman types, font 14, print interval: one and a half. Important information can be printed in italics. Format — Microsoft Word for Windows.

OLE-objects (graphs, presentation slides, diagrams in Microsoft Excel format, results of computations in mathematical and others including own programmes) are not allowed in documents. The objects as such are required to be sent in original programme format, and are copied by illustrations (see General information on illustrations).

The use of additional fonts (for example, a symbol is given by a specific type) is additionally specified. In this case, a file containing letter design in TTF format. PS-fonts is not allowed.

2. Illustrations

All illustrations available in the advertisement module are to be displayed in TIFF or BMP formats. Multilayer displays are not allowed. Black-and white displays are to be used in Grayscale model. Coloured displays (cover) are in CMYK model. All black-and-white raster displays are to be of resolution of 200 dpi, colour — of 250–400 dpi.

The use of Corel Draw (*.cdr) format to 12 version inclusive is considered to be advantageous for vector display.

All incorporated effects (lenses, texture fillings, shadows, etc.) are to be converted to raster display (bitmap). Vector effects (Extrude, Envelope, Contour, Add Perspective, Blend, Distortion, Artistic media) are to be transformed to curves. All text objects are to be converted to curves. Raster figures are not allowed to be placed in Corel Draw document.

Advertisement space price

Advertisement module space	Technical parameters	Publication price in one issue ($US)
1st page of the cover (full-coloured)	160x145 мм	10000
Full opening in two pages	257x336 мм	1000
2nd or 3d pages of the cover (full-coloured)	257x168 мм	300
Full page	128x168 мм	200
1/2 page	85x168 мм	200
1/3 page	64x168 мм	60
1/4 page	64x168 мм	30
Price rebate		
When published in 2-3 issues	5%	
When published in 4-6 issues	7%	
When published in 7-9 issues	10%	
When published in 10-12 issues	15%	

To order an advertisement space and make up a bill, please fill in an order form and send it using the following address: gusev@hydrogen.ru or by fax +7 (83130) 6-31-07.

The editorial board reserves the right to choose advertisements entered.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»
Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

452613, Башкортостан респ., г. Октябрьский, 35-й мкр., дом 9А, абонентский ящик № 33
По подписке: Виктории Анатольевне Онищенко: тел/whapp/telegramm: +79373657497
По редакторским вопросам: Алевтине Сергеевне Хазиевой: тел/whapp/telegramm: +79375000422

По всем вопросам: Главному редактору Гусеву Александру Леонидовичу
Тел.: +79046720397; WhatsApp: +79046720397; Telegram: +38269260722 или https://t.me/isjaee1 ;
skype: aleksandr_tata
E- mail: gusev@hydrogen.ru; ceo@yaalgusev.ru; alexandergusev777@gmail.com

Рекомендуемые сайты по работе журнала: http://isjaee.com, https://t.me/isjaee; https://t.me/hydrogentechnologies; https://t.me/Science_Montenegro; https://t.me/HYDROGENinstitute
Для справок: e-mail: info@hydrogen.ru

452613, Russia, Bashkortostan Rep., Oktyabrsky, 35th mkrn., house 9a, Post Box Officce 33
By subscription: Victoria Anatolyevna Onishchenko: Tel / Whapp / Telegramm: +79373657497
Editorial: Alevtina Sergeevna Khazieva: Tel / Whapp / Telegramm: +79375000422

For all questions: Chief Editor Gusev Alexander Leonidovich
Phone: +79046720397; whatsApp: +79046720397; telegramm: +38269260722; skype: aleksandr_tata
E-mail: gusev@hydrogen.ru, http://isjaee.com

Information: gusev@hydrogen.ru; ceo@yaalgusev.ru; alexandergusev777@gmail.com

Recommended sites for the work of the journal: http://isjaee.com, https://t.me/isjaee; https://t.me/hydrogentechnologies; https://t.me/Science_Montenegro; https://t.me/HYDROGENinstitute
Reference: e-mail: info@hydrogen.ru

Международный научный журнал
«Альтернативная энергетика и экология»
Подписано в печать 29.02.2024
Формат 60×84/8 Тираж 260 000 экз.
255 000 (EBSCO)
Цена договорная

Журнал включён в каталог «Роспечать» (индекс 10337 «Альтернативная энергетика и экология»)
и Объединённый каталог «Пресса России. Российские и зарубежные газеты и журналы» (индекс 41935 «Альтернативная энергетика и экология»).