



# ISJAE

№ 03  
(420)  
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 ISJAE  
 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 («Ожгетепло», Краснодар, Россия)  
 Т.Н. Везироглу, д-р. проф., президент МАВЭ, зам. гл. ред. ISJAE  
 Е.А. Везироглу, д-р, проф., главный редактор International Journal of Hydrogen Energy (IJHE)  
 И.А. Габиев, 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 ISJAE  
 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 ISJAE  
 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. Коротева, 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. Луговац, акад., проф. (Университет «УНИОН», Белград, Сербия)  
 Р.Х. Меликов, к-т.тех.наук, (Азербайджан)  
 Ч. Марчетти, проф. (Сиени, 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-Степиной, акад. РАН (РНИЦ «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, Колумбия, США)  
 А.Ю. Раменский, канд. техн. наук, президент НАВЭ РФ (Россия, Москва), зам. гл. редактора ISJAE  
 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-Грегуйар, проф. (Университет Тулон-Вара, Франция), зам. главного редактора ISJAE  
 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 ISJAE  
 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 ISJAE  
 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)



International Publishing House of scientific periodicals «Space»



Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ (2014) – 5,694. Журнал зарегистрирован Международным центром ЮНЕСКО в 2000 г. (название: «Аlternativnaá énergetika i écológiá», краткое название: «Аltern. énerg. écol.»), ISSN 1608-8298. тематика журнала одобрена Международной ассоциацией водородной энергетик (МАВЭ) и Международным центром развития водородной энергетикки 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 Херфиндала 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.



# ISJAE



## 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 Office 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 СОБЕТ

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. Anyayev D.Sc. (SOF, IITE 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. Mkhitarian, 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. Shecheklein, 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. Tsvizade, 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)

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

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: "Аl'ternativnaa energetika i ekologiya", abbreviated key title: "Al'tern. energ. ecol."), 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.



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

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОВЕТ РЕЦЕНЗЕНТОВ

**Председатель:** Т.Н. Везируглу  
**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. Тараева** (Москва, Россия)  
**Б.П. Тарасов** (Черноголовка, Россия)  
**Г.Л. Хорасанов** (Обнинск, Россия)  
**М.Д. Хэмптон** (Орlando, 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

## 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. Tararava** (Russia, Moscow)  
**B.P. Tarasov** (Russia, Chernogolovka)  
**M.V. Vorobyova** (Russia, Moscow)

## 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)

## MEMORIAL

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

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



## 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**



## 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

### 6. Малая гидроэнергетика

6-1-0-0 Оборудование малых и микрогидроэлектростанций

Казанцев Ю. В., Корнилович Д. В., Хальясмаа А. И.,  
Архипов А. А., Миклухин А. В., Сергеевичев Л. Ю., Цуран М. В.  
Исследование алгоритмов распределения реактивной мощности для оптимизации потерь мощности  
на гидроэлектростанциях.....12  
doi: 10.15518/isjaee.2024.03.012-027

### 8. Энергокомплексы на основе ВИЭ

Котин Д. А., Иванов И. А.  
Синтез системы управления понижающего преобразователя, учитывающей нелинейность объекта  
управления.....28  
doi: 10.15518/isjaee.2024.03.028-041

## II. НЕВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА

### 9. Атомная энергетика

9-1-0-0 Атомно-водородная энергетика

Юрин В. Е., Егоров А. Н.  
Исследование эффективности производства товарного водорода на АЭС. Сравнение с автономным  
производством малой мощности.....42  
doi: 10.15518/isjaee.2024.03.042-056

Секретарев Ю. А., Мятёж Т. В., Любченко В. Я., Зубова Н. В., Безменов С. В.  
Модель оптимизации режимов работы автономных систем энергоснабжения на основе водородных  
технологий для нужд Арктики.....57  
doi: 10.15518/isjaee.2024.03.057-070

## IV. ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА

12-8-7-0 Новые конструкционные материалы для объектов альтернативной энергетики

Драгунов В. П., Остертак Д. И., Казымов Д. М., Коваленко Е. Ю.  
Особенности функционирования делителя напряжения для накопителей кинетической  
энергии и водородных батарей.....71  
doi: 10.15518/isjaee.2024.03.071-080

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

Мосин М. Е., Попов Н. С., Домахин Е. А., Вильбергер М. Е.  
Обоснование применения метода скользящих режимов для управления скоростью СДПМ.....81  
doi: 10.15518/isjaee.2024.03.081-090



*Жданеев О. В., Москвин А. В., Хакимов Р. Р.*

Водородные системы накопления энергии: сравнение приведенной стоимости хранения энергии LCOS различных систем. Водород как ключевая технология для длительного и сезонного накопления энергии.....	91
<i>doi: 10.15518/isjaee.2024.03.091-109</i>	

## X. Экономические аспекты АЭЭ

### 24. Экономические аспекты

24-4-0-0 Экономический анализ

*Жданеев О. В., Овсянников И. Р.*

Прогноз инновационной активности по ключевым направлениям технологий энергоперехода на базе анализа патентной активности.....	110
<i>doi: 10.15518/isjaee.2024.03.110-132</i>	

## XI. ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, УСТРОЙСТВА И ИХ ВНЕДРЕНИЕ

### 26. Инновационные решения в области энергетики и альтернативной энергетики

*Мохаммед Хассан, Салах Камель, Муродбек Сафаралиев, Сергей Кокин*

Усовершенствованная технико-экономическая оптимизация гибридных систем на солнечной энергии/ ветре/ топливных элементах/дизельном топливе с накоплением энергии на водороде.....	133
<i>doi: 10.15518/isjaee.2024.03.133-167</i>	

## XV. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

### 35. Энергосберегающие технологии, системы, материалы и приборы

*Кучак С. В., Штейн Д. А.*

Разработка системы управления для оптимального сопряжения энергосети с электролизерами и водородными топливными элементами для парирования провального периода.....	168
<i>doi: 10.15518/isjaee.2024.03.168-176</i>	

## 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.....	177
---	-----

### 41. Информация

Новости.....	179
--------------	-----



**На 1-й стр. обложки:** 25 лет со дня образования международной системы «Bridge between East and West (IBEW): ISJAEE-IJHE-ISJAE»  
(на фото: Президент IАНЕ, главный редактор IJHE проф. доктор Т. Н. Везироглу и Президент IААЕЕ, главный редактор ISJAEЕ А. Л. Гусев  
(2000 год, США, Майами, Университет Майами)

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 Владелец интеллектуальной собственности Александром Леонидовичем Гусевым.

**Заведующий редакцией, гл. редактор  
сайта <http://isjaee.com>**

Александр Леонидович Гусев (Россия, Саратов)

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

**Переводчики**

Александр Рудольфович Володько (Россия, Саратов)  
Татьяна Викторовна Зезулина (Россия, Саратов)

**Контент-менеджер сайта**

<http://isjaee.com>

Александр Леонидович Гусев  
(Россия, Саратов)

**Художественный редактор**

Виктор Иванович Немышев (Россия, Саратов)

**Научные обозреватели**

Ольга Борисовна Баклицкая-Каменова  
(Россия, Москва)  
Вера Владимировна Куршева (Россия, Москва)

**Компьютерная графика**

Валентин Александрович Гусев  
(Россия, Саратов)

**Редактор, корректор**

Алевтина Сергеевна Хазиева  
(Россия, Октябрьский)

**Компьютерная верстка**

Алевтина Сергеевна Хазиева  
(Россия, Октябрьский)



# CONTENT

## I. RENEWABLE ENERGY

### 6. Small hydroenergetics

6-1-0-0 Equipment for small and micro hydro-power plants (HPP)

*Kazantsev Yu. V., Kornilovich D. V., Khalyasmaa A. I.,  
Arkhipov A. A., Miklukhin A. V., Sergievichev L. Yu., Tsuran M. V.*  
Novel technologies for optimization of hydroelectric power plants with hydrogen  
energy storage system.....12  
*doi: 10.15518/isjaee.2024.03.012-027*

### 8. Energy complexes based on renewable energy sources

*Kotin D. A., Ivanov I. A.*  
Synthesis of a control system for a buck converter,  
accounting for the nonlinearity of the control object.....28  
*doi: 10.15518/isjaee.20224.03.028-041*

## II. NON-RENEWABLE ENERGY

### 9. Atomic energy

9-1-0-0 Atomic-hydrogen energy

*Yurin V. E., Egorov A. N.*  
Investigation of the efficiency of commercial hydrogen production at NPP. Comparison with  
autonomous low capacity production.....42  
*doi: 10.15518/isjaee.2024.03.042-056*

*Sekretarev Y. A., Myateg T. V., Lyubchenko V. Ya., Zubova N. V., Bezmenov S. V.*  
Model of optimization of operating modes of autonomous energy supply systems based on hydrogen  
technology for the needs of Arktika.....57  
*doi: 10.15518/isjaee.2024.03.057-070*

## IV. HYDROGEN ECONOMY

12-8-7-0 New structural materials for renewable energy structures

*Dragunov V. P., Ostertak D. I., Kazymov D. M., Kovalenko E. Y.*  
Features of the voltage divider for kinetic energy storage devices and hydrogen batteries.....71  
*doi: 10.15518/isjaee.2024.03.071-080*

12-10-0-0 Hydrogen fuel vehicles and engines

*Mosin M. E., Popov N. S., Domakhin E. A., Vilberger M. E.*  
Justification of the application of the sliding mode method for controlling the speed of the PMSM.....81  
*doi: 10.15518/isjaee.2024.03.081-090*



12-12-0-0 Hydrogen for providing buildings

Zhdaneev O. V., Moskvina A. V., Khakimov R. R.

Hydrogen energy storage systems: comparison of the leveled cost of LCOS energy storage of different systems.

Hydrogen as a key technology for long-term and seasonal energy storage.....91  
doi: 10.15518/isjaee.2024.03.091-109

## X. ECONOMIC ASPECTS OF AEE

### 24. Economical aspects

24-4-0-0 Economical analysis in renewable energy

Zhdaneev O. V., Ovsyannikov I. R.

Forecast of innovation activity in key areas of energy transfer technologies based

on the analysis of patent activity.....110  
doi: 10.15518/isjaee.2024.03.110-132

## XI. INNOVATIVE SOLUTIONS, TECHNOLOGIES, DEVICES AND THEIR IMPLEMENTATION

### 26. Innovative solutions in the field of energy and alternative energy

M. H. Hassan, S. Kamel, M. Safaraliev, S. Kokin.

Improved techno-economic optimization of hybrid solar/wind/fuel cell/diesel systems with

hydrogen energy storage.....133  
doi: 10.15518/isjaee.2024.03.133-167

## XV. ENERGY SAVING

### 35. Energy-saving technologies, systems, materials and devices

Kuchak S. V., Shtein D. A.

Development of a control system for optimal interfacing of the power grid with electrolyzers

and hydrogen fuel cells to parry the down period.....168  
doi: 10.15518/isjaee.2024.03.168-176

## 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.....177

### 41. Information

News.....179

**On the 1st page of the cover: 25 years since the formation of the international system «Bridge between East and West (IBEW): ISJAEE-IJHE-ISJAEE» (in the photo: President of IAHE, editor-in-chief of IJHE Prof. Dr. T. N. Veziroglu and President of IAEE, editor-in-chief of ISJAEE A. L. Gusev (2000, USA, Miami, University of Miami)**

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 Nemyshyev (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)





МАЛАЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

SMALL HYDROENERGETICS

ОБОРУДОВАНИЕ МАЛЫХ И МИКРОГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

EQUIPMENT FOR SMALL AND MICRO HYDRO-POWER PLANTS (HPP)

Статья поступила в редакцию 03.03.24 Ред. Рег. № 317-003-24

The article has entered in publishing office 03.03.24 Ed. Reg. No 317-003-24

УДК 621.31

# ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ НА ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

**Казанцев Ю. В.<sup>1</sup>, Корнилович Д. В.<sup>2</sup>, Хальясмаа А. И.<sup>3</sup>,  
Архипов А. А.<sup>4</sup>, Миклухин А. В., Сергиевичев Л. Ю.<sup>5</sup>, Цуран М. В.<sup>6</sup>**

Новосибирский государственный технический университет,  
пр. К. Маркса, 20, 630073, Новосибирск, Россия

<sup>1</sup> yu.kazancev@corp.nstu.ru

<sup>2</sup> yqemahaty@gmail.com

<sup>3</sup> a.i.khaliasmaa@urfu.ru

<sup>4</sup> arxipov.2019@stud.nstu.ru

<sup>5</sup> sergievichev.lev3002016@gmail.com

<sup>6</sup> tsuran.2020@stud.nstu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.012-027

Заключение совета рецензентов: 21.03.24

Заключение совета экспертов: 25.03.24

Принято к публикации: 30.03.24

Проблема распределения нагрузки между гидроагрегатами гидроэлектростанций (ГЭС) является актуальной задачей из-за нелинейности характеристик гидротурбины и индивидуальных особенностей энергоблоков, условия эксплуатации которых зачастую различны. Необходимо брать во внимание самые передовые методы оптимизации, учитывающие нелинейность характеристики турбины. Методы также должны учитывать строгие ограничения на условия эксплуатации энергетического оборудования при поиске экстремума целевой функции, указанной в форме равенств и неравенств. При решении вышеупомянутой задачи оптимизации накладываются ограничения на вычислительные мощности автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП), которые должны работать в режиме реального времени. Для решения задачи оптимизации был проанализирован метод внутренней точки, а метод множителей Лагранжа был модифицирован так, чтобы он мог минимизировать расход турбины и потери активной энергии в обмотках электрогенераторов и

Казанцев Ю. В., Корнилович Д. В., Хальясмаа А. И., Архипов А. А., Миклухин А. В., Сергиевичев Л. Ю., Цуран М. В. Новые технологии оптимизации режима гидроэлектростанций с системой хранения водородной энергии // альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 03 (420) 2024, с. 12-27

Kazantsev Yu. V., Kornilovich D. V., Khalyasmaa A. I., Arkhipov A. A., Miklukhin A. V., Sergievichev L. Yu., Tsuran M. V. Novel technologies for optimization of hydroelectric power plants with hydrogen energy storage system // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 03(420) 2024, pp. 12-27



трансформаторов. В статье представлены результаты моделирования разработанных алгоритмов оптимизации и результаты натурных испытаний системы автоматического управления выработкой, использующей описанные алгоритмы. Все проведенные испытания показали достаточно высокую эффективность предложенных методов оптимизации в условиях реальной эксплуатации.

**Ключевые слова:** гидротурбины; гидроэлектростанции; автоматический контроль генерации; оптимизация потока воды; регулирование активной и реактивной мощности; стационарная устойчивость гидрогенератора.

## NOVEL TECHNOLOGIES FOR OPTIMIZATION OF HYDROELECTRIC POWER PLANTS WITH HYDROGEN ENERGY STORAGE SYSTEM

*Kazantsev Yu. V.<sup>1</sup>, Kornilovich D. V.<sup>2</sup>, Khalyasmaa A. I.<sup>3</sup>,  
Arkhipov A. A.<sup>4</sup>, Miklukhin A. V., Sergievichev L. Yu.<sup>5</sup>, Tsuran M. V.<sup>6</sup>*

Novosibirsk State Technical University, K. Marx Ave., 20, 630073, Novosibirsk, Russia;

<sup>1</sup> yu.kazantsev@corp.nstu.ru

<sup>2</sup> yqemahaty@gmail.com

<sup>3</sup> a.i.khaliasmaa@urfu.ru

<sup>4</sup> arhipov.2019@stud.nstu.ru

<sup>5</sup> sergievichev.lev3002016@gmail.com

<sup>6</sup> tsuran.2020@stud.nstu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.012-027

Referred: 21.03.24

Received in revised form: 25.03.24

Accepted: 30.03.24

The problem of load distribution between hydraulic units of hydroelectric power plants (HPPs) is an urgent task due to the nonlinearity of the characteristics of the hydraulic turbine and the individual characteristics of power units, the operating conditions of which are often different. It is necessary to take into account the most advanced optimization methods that take into account the nonlinearity of the turbine characteristics. Methods must also take into account strict restrictions on the operating conditions of power equipment when searching for the extremum of the objective function, specified in the form of equalities and inequalities. When solving the above optimization problem, restrictions are imposed on the computing power of automated process control systems (APCS), which must operate in real time. To solve the optimization problem, the interior point method was analyzed and the Lagrange multiplier method was modified so that it could minimize the turbine flow rate and active energy losses in the windings of electric generators and transformers. The article presents the results of modeling the developed optimization algorithms and the results of full-scale testing of an automatic production control system using the described algorithms. All tests performed showed a fairly high efficiency of the proposed optimization methods under real operating conditions.

**Keywords:** hydraulic turbines; hydroelectric power plants; automatic generation control; water flow optimization; active and reactive power control; steady-state stability of hydroelectric generator.



Казанцев  
Юрий Валентинович

Kazantsev Yu. V.

**Сведения об авторе:** к.т.н, доцент, Новосибирский государственный технический университет.

**Образование:** стажировка в Болонском университете (2014 г.), Новосибирский государственный технический университет, к.т.н. (2021 г.).

**Область научных интересов:** информационно-измерительная техника, автоматизация объектов электроэнергетики.

**Публикации:** 19

**Author information:** Ph. D., Associate Professor, Novosibirsk State Technical University.

**Education:** Bologna University, postgraduate (2014), Novosibirsk State Technical University, Ph.D. (2020).

**Research area:** information and measuring technology, automation of electric power facilities

**Publications:** 19



Корнилович  
Денис Викторович  
Kornilovich D. V.

**Сведения об авторе:** аспирант, Новосибирский государственный технический университет.

**Образование:** Новосибирский государственный технический университет (2022 г.).

**Область научных интересов:** электрические станции, автоматизация задач электроэнергетики.

**Публикации:** 10

**Author information:** postgraduate, Novosibirsk state technical university.

**Education:** Novosibirsk State Technical University (2020).

**Research area:** electric power plants, the use of neural networks in the tasks of the electric power industry.

**Publications:** 10



Хальясмаа  
Александра Ильмаровна  
Khalyasmaa A. I.

**Сведения об авторе:** к.т.н, доцент, Уральский федеральный университет.

**Образование:** Уральский федеральный университет, магистратура (2009 г.), Уральский федеральный университет, к.т.н. (2015 г.).

**Область научных интересов:** диагностика электрооборудования, искусственный интеллект, машинное обучение, возобновляемые источники энергии.

**Публикации:** 216

**Author information:** Ph. D., Associate Professor, Ural Federal University.

**Education:** Ural Federal University, master's degree (2009), Ural Federal University, Ph. D. (2015).

**Research area:** electrical equipment diagnostics, artificial intelligence, machine learning, renewable energy sources.

**Publications:** 216



Архипов  
Александр Андреевич  
Arkhipov A. A.

**Сведения об авторе:** магистрант, Новосибирский государственный технический университет.

**Образование:** Новосибирский государственный технический университет (2019 г.).

**Область научных интересов:** релейная защита, противоаварийная и режимная автоматика.

**Публикации:** 0

**Author information:** Graduate student, Novosibirsk State Technical University.

**Education:** Novosibirsk State Technical University (2019).

**Research area:** relay protection, emergency and mode automation.

**Publications:** 0



Миклухин  
Артем Витальевич  
Miklukhin A. V.

**Сведения об авторе:** магистрант кафедры «Электрические станции» Новосибирского Государственного Технического Университета.

**Образование:** Новосибирский Государственный Технический Университет (2019 г.).

**Область научных интересов:** релейная защита, цифровые подстанции.

**Публикации:** 0

**Author information:** Graduate student of the Department of «Electric Stations» of Novosibirsk State Technical University.

**Education:** Novosibirsk State Technical University (2019).

**Scientific interests area:** relay protection, digital substations.

**Publications:** 0



Сергиевичев  
Лев Юрьевич  
Sergievichev L. Yu.

**Сведения об авторе:** студент, Новосибирский государственный технический университет.

**Образование:** Новосибирский государственный технический университет (2020 г.).

**Область научных интересов:** электрические станции, применение нейронных сетей в задачах электроэнергетики.

**Публикации:** 3

**Author information:** student, Novosibirsk State Technical University.

**Education:** Novosibirsk State Technical University (2020).

**Research area:** electric power plants, the use of neural networks in the tasks of the electric power industry.

**Publications:** 3







Цуран  
Максим Вячеславович  
Tsuran M. V.

**Сведения об авторе:** студент, Новосибирский государственный технический университет.

**Образование:** Новосибирский государственный технический университет (2024 г.).

**Область научных интересов:** релейная защита, противоаварийная и режимная автоматика.

**Публикации:** 0

**Author information:** student, Novosibirsk State Technical University.

**Education:** Novosibirsk State Technical University (2024).

**Research area:** relay protection, emergency and mode automation.

**Publications:** 0

## Введение

Водородная энергетика [1] – это одна из наиболее перспективных областей [2] исследований и разработок в сфере энергетики [3]. В последние десятилетия [4] интерес к водороду, как потенциальному источнику чистой [5] и устойчивой энергии, значительно возрос [6]. Этот интерес обусловлен не только неотложной необходимостью [7] снижения выбросов парниковых газов [8] и борьбой с изменением климата, но и стремлением обеспечить надежный источник энергии для будущих поколений [9].

В XXI веке водород стал актуальным элементом борьбы с изменением климата [10], когда государства поставили цель сдержать глобальный рост температуры в пределах 1,5 °C к 2050 году [11]. По данным Международного агентства [12] по возобновляемым источникам энергии, водород сможет внести 10 % вклада на пути к нулевому уровню выбросов CO<sub>2</sub> [13], снижая углеродный след в тяжелой промышленности [14] и дальнемагистральном транспорте, а также обеспечивая сезонное хранение энергии [15].

Водород, как химический элемент, имеет множество преимуществ как потенциальный энергетический носитель [16]. Он обладает высокой энергетической плотностью [17], может храниться и переноситься сравнительно легко [18], и при этом его сгорание или использование в топливных элементах [19] не приводит к выбросам углеродных оксидов или других вредных веществ [20]. Это делает водород идеальным кандидатом для замещения традиционных источников энергии [21], особенно в секторах, где трудно добиться полной декарбонизации [22].

Запасы водорода практически безграничны [23], так как он встречается почти всюду [24], его можно использовать там, где он производится [25]. В отличие от батарей, которые не могут хранить большое количество электроэнергии в течение продолжительного времени [26], водород можно производить из избыточной возобновляемой энергии и хранить в больших количествах [27].

Водород содержит почти в три раза больше энергии [28], чем ископаемое топливо, поэтому для вы-

полнения какой-либо работы его требуется гораздо меньше [29]. Например, по сравнению с электростанцией, работающей на сжигании топлива с коэффициентом полезного действия (КПД) от 33 до 35 % [30], водородные топливные элементы выполняют ту же функцию с КПД до 65 %. Для примера, у солнечных элементов КПД – 20 %, а у ветряных – 40 % [31].

Стоимость добычи самого чистого вида водорода ставит наиболее сильные препятствия в его развитии [32]. Перспективы водородной энергетики [33] связаны с удешевлением стоимости водорода, производимого электролизом воды [34]. В качестве основных факторов [35] обеспечения конкурентоспособности зеленого водорода рассматривается перспективное снижение капитальных затрат на электролизеры [36], а также стоимости электроэнергии из возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ).

По мере того [37], как мир стремится к более экологически чистому и устойчивому энергетическому будущему [38], роль водородной энергетики становится все более значимой. Эта технология может стать ключевым компонентом энергетической революции [39], способствуя снижению загрязнения окружающей среды и обеспечению энергетической безопасности. В следующих разделах мы более подробно рассмотрим все аспекты водородной энергетики и ее потенциал для изменения энергетической парадигмы [40].

Водородная энергетика входит в кластер альтернативной (возобновляемой) энергетики. К этому же кластеру относится и гидроэнергетика. В настоящее время возрастает значение гидроэлектростанций [41] не только как экологически чистого и дешевого источника электроэнергии, но и мощного инструмента регулирования режима работы электроэнергетических систем [42], в особенности при увеличении в них доли солнечных и ветряных электростанций, характеризующихся стохастическим характером выработки электроэнергии [43].

Основной автоматизированной системой управления технологическим процессом, управляющей

работой станции, является микропроцессорная система группового регулирования активной и реактивной мощности (МС ГРАРМ) [44]. Групповые регуляторы осуществляют централизованное управление активной и реактивной мощностью генераторов гидроэлектростанции как единым агрегатом, упрощающее участие станции в общесистемном регулировании частоты, активной, реактивной мощности и напряжения. Групповые регуляторы функционально состоят из двух основных подсистем: группового регулятора активной мощности и группового регулятора реактивной мощности и напряжения [45]. Первый предназначен для автоматического регулирования частоты и активной мощности и осуществляет распределение суммарного задания гидроэлектростанции по активной мощности между гидроагрегатами. Второй – для автоматического регулирования напряжения и реактивной мощности гидроэлектростанции по заданиям напряжения и реактивной мощности [46]. Проблема распределения реактивной мощности агрегатов гидроэлектростанции при групповом регулировании является крайне актуальной, так как каждый из существующих методов распределения реактивной мощности не в полной мере отвечает предъявляемым к нему требованиям. Главной задачей раздела является

создание методов распределения реактивных нагрузок, учитывающих ограничения по полной мощности и статической устойчивости, а также критерий снижения активных потерь [47].

Также при распределении активной и реактивной мощности в системах группового регулирования не в полной мере учтены некоторые критерии и ограничения, в частности: минимизации потерь активной мощности, условие обеспечения статической устойчивости гидрогенераторов в режиме недовозбуждения [48].

Стоит отметить, что с растущим уровнем цифровизации энергетики и, как следствие, переходом на микропроцессорные системы управления, появилась возможность учесть вышеперечисленные особенности работы гидроагрегатов, а также снизить их негативное влияние, тем самым повысив качество регулирования [49].

Вышесказанное подчеркивает актуальность данного исследования, направленного на совершенствование методов моделирования гидроагрегатов, алгоритмов и методов настройки групповых регуляторов активной и реактивной мощности и регуляторов скорости вращения [50].

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

АСУ ТП	Автоматизированная система управления технологическим процессом
АРВ	Автоматическое регулирования возбуждения
ВИЭ	Возобновляемые источники электроэнергии
ГЭС	Гидроэлектростанция

ГУВ	Групповое управление возбуждением
КПД	Коэффициент полезного действия
МС ГРАРМ	Микропроцессорная система группового регулирования активной и реактивной мощности
ПТК	Программно-технический комплекс
CO <sub>2</sub>	Углекислый газ

### 1. Критерий минимизации активных потерь

#### 1.1 Станция блочного типа с двухобмоточными трансформаторами

Рассмотрим электрическую станцию блочного типа. Запишем формулы для расчета суммарных активных потерь для электростанции, представленной на рисунках 1 и 2 [51]:

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta P_i; \tag{1.1}$$

где  $\Delta P_{\Sigma}$  – суммарные активные потери электростанции, состоящей из  $n$  блоков;  $\Delta P_i$  – активные потери блока.

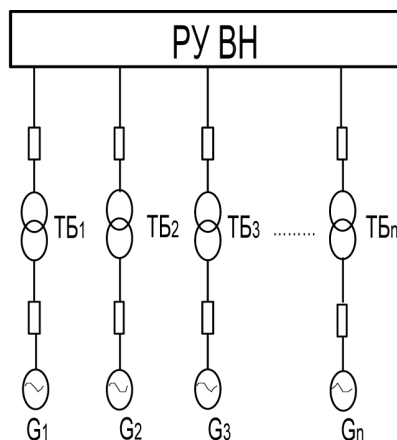


Рис. 1. Структурная схема электрической станции блочного типа

Fig. 1. Block diagram of a block-type power station

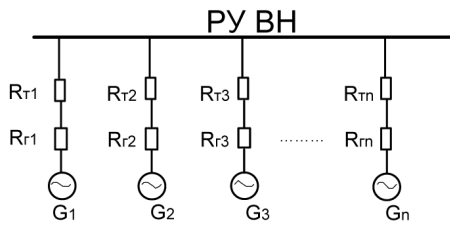


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения для расчета активных потерь

Fig. 2. Equivalent circuit for calculating active losses

где  $I_i$  – ток  $i$ -го генератора;  $R_{\delta i}$  – суммарное активное сопротивление  $i$ -го блока:

$$R_{\delta i} = R_{rT} + R_{rG}; \quad (1.2)$$

где  $R_{rT}$  – активное сопротивление трансформатора  $i$ -го блока;  $R_{rG}$  – активное сопротивление генератора  $i$ -го блока. Ток статора  $i$ -го генератора запишется как:

$$I_i = \frac{S_i}{U}; \quad (1.3)$$

где  $U$  – напряжение на шинах высокого напряжения;  $S_i$  – полная мощность генератора  $i$ -го блока по выражению.

С учётом уравнений выше, суммарные активные потери электростанции определяются следующим образом [52]:

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta P_i = \sum_{i=1}^n \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{U^2} R_{\delta i};$$

или:

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i^2}{U^2} R_{\delta i} + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i^2}{U^2} R_{\delta i}; \quad (1.4)$$

Обозначим  $C = \sum_{i=1}^n \frac{P_i^2}{U^2} R_{\delta i}$ , тогда выражение (1.4) запишется следующим образом:

$$\Delta P_{\Sigma} = C + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i^2}{U^2} R_{\delta i}; \quad (1.5)$$

где значение  $C$  при заданном распределении активных нагрузок является постоянной величиной, тогда как оставшаяся часть будет переменной.

Согласно [53] условием оптимального распределения (условием минимума суммы нескольких переменных величин) является равенство их частных производных, для выражения (5) частная производная определится как:

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial Q_i} = \frac{\partial C}{\partial Q_i} + \frac{\partial \sum_{i=1}^n \frac{Q_i^2}{U^2} R_{\delta i}}{\partial Q_i} = 0 + \frac{2Q_i}{U^2} R_{\delta i} = \frac{2Q_i}{U^2} R_{\delta i}; \quad (1.6)$$

Из (1.6) следует критерий минимизации активных потерь от реактивной составляющей полного тока при заданных активных мощностях  $n$  блоков:

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n; \quad (1.7)$$

где  $Q_1, Q_2, \dots, Q_i$  – соответствующие реактивные нагрузки генераторов.

Выражение (1.7) также является критерием равномерного распределения реактивных нагрузок между группой генераторов.

Объединяя уравнения (1.6) и (1.7), получим:

$$\frac{2Q_1}{U_1^2} R_{b1} = \frac{2Q_2}{U_2^2} R_{b2} = \dots = \frac{2Q_n}{U_n^2} R_{bn}. \quad (1.8)$$

Выразим мощность  $Q_n$  из (1.8):

$$Q_n = \frac{Q_1 R_{b1}}{R_{bn}}; \quad (1.9)$$

Суммарная реактивная мощность станции определяется следующим образом:

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = Q_{\Sigma}; \quad (1.10)$$

Объединяя уравнения (1.9) и (1.10), получим:

$$Q_1 + \frac{Q_1 R_{b1}}{R_{b2}} + \frac{Q_1 R_{b1}}{R_{b3}} + \dots + \frac{Q_1 R_{b1}}{R_{bn}} = Q_{\Sigma}. \quad (1.11)$$

Тогда, мощность 1-го блока определится как:

$$Q_1 = \frac{Q_{\Sigma}}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{R_{b1}}{R_{bi}}}; \quad (1.12)$$

Следовательно, при различиях в сопротивлениях блоков, равномерный закон распределения определится как:

$$Q_i = \frac{Q_{sum} R_{b1}}{R_{b1} \sum_{j=1}^n \frac{R_{b1}}{R_{bj}}}. \quad (1.13)$$

где  $Q_{sum}$  – распределяемое задание группы.

Для задачи распределения реактивных мощностей исходными являются следующие данные: активные мощности агрегатов, задание по реактивной мощности (напряжению в узловой точке) станции, коэффициенты загрузки агрегатов по реактивной мощности, а также параметры генераторов и трансформаторов блока [54]. В ходе распределения необходимо рассчитать индивидуальные задания по реактивной мощности агрегатов с учётом ограничений гидрогенератора [55]:

- по максимальному току ротора (по нагреву обмоток ротора);
- по минимальному току ротора (от перемагничивания в режиме недовозбуждения);
- по условию нагрева концевых зон статора [56];
- по току статора (полной мощности);
- по условию устойчивости параллельной работы.



Так как первые два ограничения обычно реализуются в программно-техническом комплексе (ПТК) автоматического регулирования возбуждения (АРВ) [57], а третье применимо не ко всем моделям генераторов, в статье подробно рассматриваются последние два ограничения. Перечисленные выше ограничения режимов работы гидрогенераторов задаются в виде P-Q capability diagram (P-Q) [58]. Стоит

отметить, что основными недостатками P-Q диаграмм является ряд приближений: построение линий для одного набора параметров графическим способом, в частности, линии условия параллельной работы (статической устойчивости) [59] для определенного напряжения, а также запас на неточность задания параметров генератора [60].

## 2. Методы распределения реактивных мощностей

### 2.1 Пропорциональный метод

В пропорциональном методе распределения реактивной мощности, предложенном в [61], реактивная нагрузка  $i$ -го генератора вычисляется по формуле:

$$Q_i = k \cdot P_{Ti}; \tag{2.1}$$

где  $P_{Ti}$  – активная мощность  $i$ -й гидротурбины,  $k$  – принятый коэффициент распределения.

Данный метод используется для обеспечения практически одинакового запаса статической устойчивости генераторов, однако имеет ряд недостатков:

- Не учитывается критерий минимизации потерь энергии;

- Реактивная нагрузка распределяется между агрегатами неравномерно;
- Обмотки статоров генераторов и блочные трансформаторы оказываются неравномерно нагруженными по току;

Возможно небольшое отличие запасов статической устойчивости у разных агрегатов.

Для нескольких генераторов [62], работающих с различными активными мощностями  $P_{Ti}$  коэффициенты запаса статической устойчивости будут различными. Также по самому принципу метода (2.1) не будет соблюдаться критерий минимизации активных потерь (1.7).

### 2.2 Метод распределения по условию равенства токов статоров

Данный способ подразумевает распределение реактивных нагрузок по следующему выражению [63]:

$$I_1 = I_2 = \dots = I_n \tag{2.2}$$

где  $I_1, I_2 \dots I_n$  – соответствующие токи статора генераторов.

Этот метод обеспечивает равномерную загрузку основного оборудования по току, однако имеет такие недостатки как [64]:

1. Некорректное распределение реактивной нагрузки с точки зрения статической устойчивости;
2. Неравномерное распределение реактивной нагрузки между агрегатами.

Рассмотрим первый недостаток. Так, агрегат, наиболее нагруженный по активной мощности, работает с меньшей реактивной нагрузкой, что снижает запас его статической устойчивости [65]. Из рис. 3 мы видим, что агрегат № 2 работает с меньшим запасом статической устойчивости, так как он перегружен по активной мощности, а выдаваемая им реактивная мощность мала, потому что оба агрегата работают с равной полной мощностью.

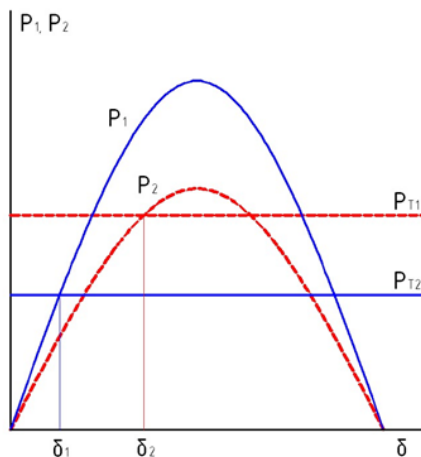


Рис. 3. Характеристики активной мощности на примере неявнополюсных генераторов  
 Fig. 3. Characteristics of active power using the example of non-salient-pole generators

Второй недостаток метода связан с неполным несоблюдением критерия минимизации активных потерь [66].

Запишем уравнение максимальной реактивной нагрузки генератора при заданной номинальной полной мощности  $S_{\text{н}}$  и текущем значении активной мощности:

$$Q_{\text{maxi}} = \sqrt{S_{\text{н}}^2 - P_i^2}; \tag{2.3}$$

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Ток статора  $i$ -го генератора запишется как:

$$I_i = \frac{S_i}{U}; \quad (2.4)$$

Запишем выражение (2.2) с учётом (1.3) и формулы полной мощности  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ :

$$\frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}{U} = \frac{\sqrt{P_2^2 + Q_2^2}}{U} = \dots = \frac{\sqrt{P_n^2 + Q_n^2}}{U}; \quad (2.5)$$

Домножив (2.5) на  $U$  получим:

$$\sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = \dots = \sqrt{P_n^2 + Q_n^2}; \quad (2.6)$$

Перепишем уравнение (2.6) с учётом коэффициентов загрузки каждого агрегата:

$$\frac{P_1^2 + Q_1^2}{k_{z1}^2} = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{k_{z2}^2} = \dots = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{k_{zn}^2}; \quad (2.7)$$

где  $k_{z1}, k_{z2}, \dots, k_{zn}$  – соответствующие коэффициенты загрузки по токам статоров генераторов.

Сформируем систему уравнений для распределения реактивных нагрузок генераторов по условию равенства токов статоров:

$$Q_1 + \sqrt{\frac{k_{z2}^2}{k_{z1}^2} (P_1^2 + Q_1^2) - P_2^2} + \sqrt{\frac{k_{z3}^2}{k_{z1}^2} (P_1^2 + Q_1^2) - P_3^2} + \dots + \sqrt{\frac{k_{zn}^2}{k_{z1}^2} (P_1^2 + Q_1^2) - P_n^2} = Q_\Sigma \quad (2.10)$$

При заданных активных нагрузках выражение (2.10) является нелинейной функцией одной переменной  $Q_1$  [68]. Найдя решение уравнения численным методом, получим величину  $Q_1$ , соответствующую текущему распределению активных мощностей агрегатов и заданным коэффициентам загрузки генераторов по полной мощности. Подставив в остальные уравнения системы (2.9) полученное значение  $Q_1$ , определим реактивные мощности остальных генераторов по условию равенства токов статоров генераторов.

Распределение по равенству токов статоров генераторов с учётом ограничения, необходимо производить в три этапа [69]:

1. Расчет минимальной и максимальной

### 2. 3 Равномерное распределение с ограничениями

Равномерное распределение осуществляется с использованием критерия минимизации активных потерь (1.7), который записывается в виде [71]:

$$Q_1 = \frac{Q_\Sigma \cdot k_{z1}}{\sum_{j=1}^m k_{zj}}; \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = Q_\Sigma, \\ \frac{P_1^2 + Q_1^2}{k_{z1}^2} = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{k_{z2}^2}, \\ \frac{P_1^2 + Q_1^2}{k_{z1}^2} = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{k_{z3}^2}, \\ \dots \\ \frac{P_1^2 + Q_1^2}{k_{z1}^2} = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{k_{zn}^2}. \end{cases} \quad (2.8)$$

Первое выражение системы (2.8) является суммой реактивных нагрузок всех агрегатов, а  $Q_\Sigma$  – суммарное задание станции по реактивной мощности.

То есть распределение реактивных нагрузок должно обеспечивать требуемое задание по реактивной мощности электростанции [67]. Перепишем систему уравнений (2.8) следующим образом:

$$\begin{cases} Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = Q_\Sigma, \\ Q_2 = \sqrt{\frac{k_{z2}^2}{k_{z1}^2} (P_1^2 + Q_1^2) - P_2^2}, \\ Q_3 = \sqrt{\frac{k_{z3}^2}{k_{z1}^2} (P_1^2 + Q_1^2) - P_3^2}, \\ \dots \\ Q_n = \sqrt{\frac{k_{zn}^2}{k_{z1}^2} (P_1^2 + Q_1^2) - P_n^2}. \end{cases} \quad (2.9)$$

Подставив в первое уравнение (2.9) остальные выражения системы, получим суммарное задание станции по реактивной мощности:

реактивной нагрузки  $Q_{i,\min}, Q_{i,\max}$  каждого агрегата из условия соблюдения требуемого коэффициента запаса статической устойчивости и ограничения по полной мощности [70];

2. Вычисление реактивных нагрузок агрегатов ( $Q_i$ ) путем распределения суммарного задания реактивной мощности по условию равенства токов статоров генераторов, т.е. с использованием уравнений (2.9) и (2.10);

3. Сравнение для каждого агрегата  $Q_i$  с  $Q_{i,\min}, Q_{i,\max}$ . Если есть агрегаты, у которых  $Q_i < Q_{i,\min}$  ( $Q_i > Q_{i,\max}$ ), то для них следует принять  $Q_i = Q_{i,\min}$  ( $Q_i = Q_{i,\max}$ ); в дальнейшем необходимо исключить их из распределения и выполнить повторный расчет, начиная с п. 2.



где  $m$  – количество агрегатов, участвующих в распределении.

Данный метод также имеет следующие особенности:

1. Не учитывается требование по статической устойчивости;
2. Ограничение по полной мощности генератора в виде P-Q диаграммы;
3. Неравномерная нагрузка основного оборудования по току.

Для устранения первых двух недостатков предлагается использовать усовершенствованный метод распределения, учитывающий соответствующие ограничения, и состоящий из трёх следующих этапов [72]:

1. Расчет минимальной реактивной нагрузки  $Q_{i.min}$ , для каждого агрегата с использованием полученного авторами аналитического уравнения для

явнополюсного генератора из условия соблюдения требуемого коэффициента запаса статической устойчивости [73], ограничения по полной мощности и по условиям нагрева обмоток;

2. Расчет максимальной реактивной нагрузки  $Q_{i.max}$  для каждого агрегата по полной мощности и по условиям нагрева обмоток;

3. Вычисление реактивных нагрузок агрегатов ( $Q_i$ ) путем равномерного распределения суммарного задания реактивной мощности с учётом коэффициентов загрузки (2.11);

4. Для каждого агрегата сравнение  $Q_i$  с  $Q_{i.min}$ ,  $Q_{i.max}$ . Если есть агрегаты, у которых  $Q_i < Q_{i.min}$  ( $Q_i > Q_{i.max}$ ), то для них следует принять  $Q_i = Q_{i.min}$  ( $Q_i = Q_{i.max}$ ); в дальнейшем необходимо исключить их из распределения и выполнить повторный расчет, начиная с п. 2.

### 3. Описание алгоритма распределения по условию равенства токов статоров с ограничениями в пакете математического моделирования

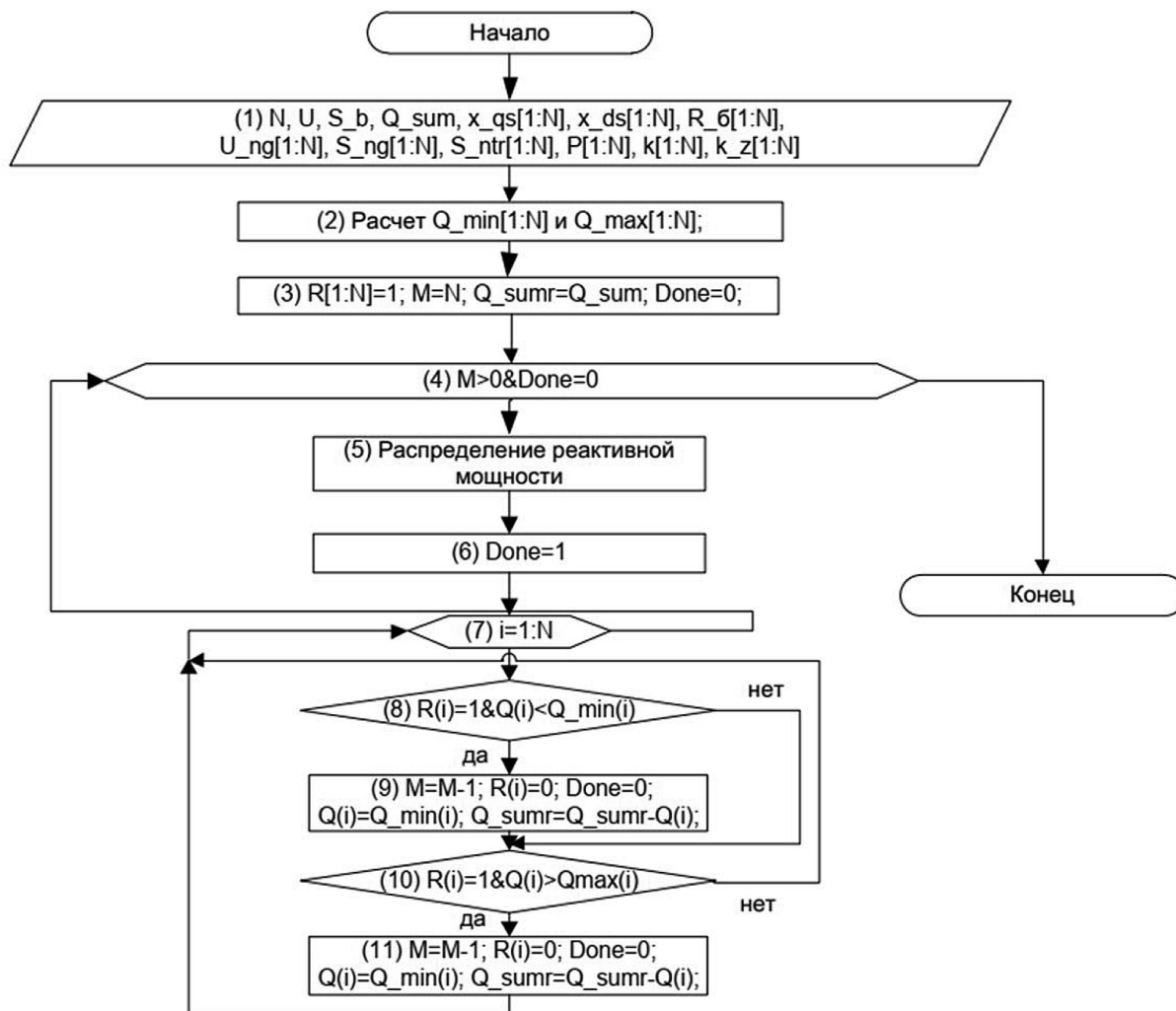


Рис. 4. Алгоритм главной программы распределения  
 Fig. 4. Algorithm of the main distribution program



Работа алгоритма начинается с ввода следующих исходных данных (элемент 1):

- Количества блоков ГЭС N;
- Напряжения на шинах высокого напряжения U, о.е.;
- Базисной мощности S<sub>b</sub>, МВАр;
- Массивов параметров блоков ГЭС: x<sub>ds</sub>[1:N] – суммарных реактивных сопротивлений по продольной оси, о.е.; x<sub>qs</sub>[1:N] – суммарных реактивных сопротивлений по поперечной оси, о.е.; R<sub>b</sub> [1:N] – суммарных активных сопротивлений блоков, Ом; U<sub>ng</sub>[1:N] – номинальных напряжений генераторов, КВ; S<sub>ng</sub>[1:N] – номинальных полных мощностей генераторов, МВАр; S<sub>nt</sub>[1:N] – номинальных полных мощностей трансформаторов, МВАр;
- Массива коэффициентов запаса статической устойчивости генераторов k[1:N];
- Массива коэффициентов загрузки по реактивной мощности k<sub>z</sub>[1:N];
- Массива активных нагрузок каждого агрегата P[1:N], о.е.;
- Текущее задание электростанции по реактивной мощности Q<sub>sum</sub>, о.е.

Затем рассчитываются массивы ограничений реактивной мощности генераторов по полной мощности Q<sub>max</sub>[1:N] и статической устойчивости Q<sub>min</sub>[1:N]. Далее принимаются предварительные приближения:

- В массив признака участия в распределении реактивной нагрузки R записываются значения 1 R [1:N]=1;

#### 4. Сравнение предложенных алгоритмов распределения реактивной мощности

На основании полученных результатов необходимо сравнить предложенные алгоритмы распределения реактивных нагрузок. Критериями сравнения

- Количество агрегатов M, участвующих в распределении, принимается равным N (общему числу агрегатов);

- Суммарная распределяемая реактивная мощность Q<sub>sum</sub> принимается равной текущему заданию электростанции по реактивной мощности Q<sub>sum</sub>;
- Флаг конца распределения Done = 0.

Далее в цикле (элемент 4) выполняется расчет распределений реактивной мощности до тех пор, пока в распределении участвует хотя бы один агрегат (M > 0) и флаг конца распределения Done равен 0. После распределения реактивной мощности по одному из рассматриваемых методов в элементе (5) флагу Done предварительно присваивается значение 1 (элемент 6). Затем в цикле 7 производится сравнение расчетного значения реактивной мощности каждого агрегата с ограничениями (элементы 8 и 10). Если рассчитанное значение для i-го агрегата превышает ограничение, то в блоке 9 или 11 агрегат исключается из распределения (R(i) = 0), количество агрегатов в распределении уменьшается (M = M – 1), для i-го блока принимается нагрузка Q(i), численно равная ограничению, и суммарная распределяемая реактивная мощность уменьшается на величину принятой нагрузки, флаг Done сбрасывается в 0.

Если после очередного шага цикла флаг окончания Done оказывается равным 0 и количество агрегатов в распределении M больше нуля, распределение реактивной мощности повторяется с уточненными количеством блоков и заданием k распределению.

являются суммарные потери активной энергии [74]. В табл. 1 представлены результаты расчета активных потерь электростанции.

Таблица 1

Суммарные активные потери при Q<sub>sum</sub> = 200 МВАр (dP<sub>sum1</sub>), а также Q<sub>sum</sub> = -300 МВАр (dP<sub>sum2</sub>)

Table 1

Total active losses at Q<sub>sum</sub> = 200 Mvar (dP<sub>sum1</sub>), as well as Q<sub>sum</sub> = -300 Mvar (dP<sub>sum2</sub>)

Распределение Q <sub>sum</sub> , МВАр	Пропорциональное, dP <sub>sum</sub> , кВт	По равенству токов статора, dP <sub>sum</sub> , кВт	Равномерное, dP <sub>sum</sub> , кВт	Δ, %
200	3157,4	2713,2	2572,1	5,2
-300	5034,7	3389,6	3389,6	0

При распределении суммарной реактивной мощности Q<sub>sum</sub> = 200 МВАр наименьшими активными потерями (dP<sub>sum1</sub>) характеризуется равномерное распределение, т.к. оно учитывает критерий минимизации активных потерь. Разница в потерях

активной мощности для 5 однотипных гидроагрегатов Новосибирской ГЭС между предложенными вариантами в этом режиме составляет порядка 5,2 %.

В случае задания суммарной реактивной мощности Q<sub>sum</sub> = -300 МВАр обоим предложенным



алгоритмам распределения соответствуют одинаковые суммарные активные потери энергии, т.к. все блоки работают с ограничениями по статической устойчивости, а значит, реактивная мощность распределяется неравномерно.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что наиболее оптимальным является алгоритм равномерного распределения вследствие следующих

его преимуществ перед распределением по равенству токов статоров:

1. Меньшие активные потери;
2. Простота логики распределения и требуемых расчетов мощности и ограничений по полной мощности и статической устойчивости.

Сравнение всех методов представлено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение алгоритмов распределения реактивной мощности

Table 2

Comparison of reactive power distribution algorithms

Метод	По равенству токов статоров	Равномерный	Пропорциональный	По равенству потерь в обмотках
Условие	$I_1 = I_2 = \dots = I_n$ , где $I_1 = I_2 = \dots = I_n$ – соответствующие токи статора генераторов	$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n$ , где $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n$ – соответствующие токи статора генераторов	$Q_i = k \cdot P_{Ti}$ , где $P_{Ti}$ – активная мощность $i$ -й гидротурбины, $k$ – коэффициент распределения	$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial Q_i} = \frac{2Q_i}{U^2} R_i$ , где $R_i$ – активные сопротивления обмоток трансформаторов и статоров генераторов
Распространенность	Высокая	Средняя	Низкая	Нет
Учет критерия минимизации активных потерь	Средний	Средний	Низкий	Максимальный
Ограничение по статической устойчивости	P-Q диаграмма	P-Q диаграмма. Аналитическое выражение	Да	P-Q диаграмма. Аналитическое выражение
Сложность расчёта распределения	Высокая	Низкая	Низкая	Средняя

### 5. Экспериментальная проверка алгоритма распределения реактивной мощности

Алгоритм равномерного распределения был реализован на языке программирования C++ и интегрирован в ПТК МС ГРАРМ Новосибирской ГЭС. После интеграции были проведены натурные испытания работы системы с внедренным алгоритмом. При индивидуально регулировании агрегата № 2 суммарная реактивная нагрузка распределяется между агрегатами поровну (рис. 5), а при работе генератора № 3 с коэффициентом загрузки 50 % (рис. 6) – пропорци-

онально заданным коэффициентам загрузки по реактивной мощности. На рис. 4 агрегат 2 имеет меньшее значение выдаваемой реактивной мощности, а также появился индикатор ограничения по превышению уставки системой группового управления возбуждением (ГУВ), что свидетельствует о работе вышеуказанного генератора с ограничением по полной мощности. Между остальными блоками суммарное значение реактивной нагрузки распределено равномерно.

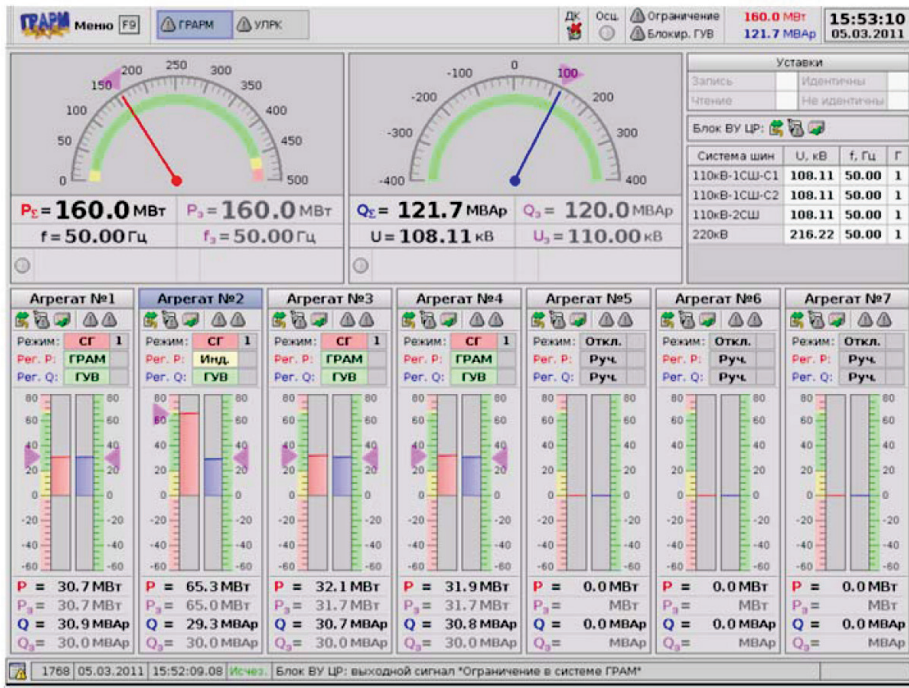


Рис. 5. Основное окно ГРАМ при индивидуальном регулировании агрегата № 2  
 Fig. 5. Main window GARM for individual control of unit No. 2

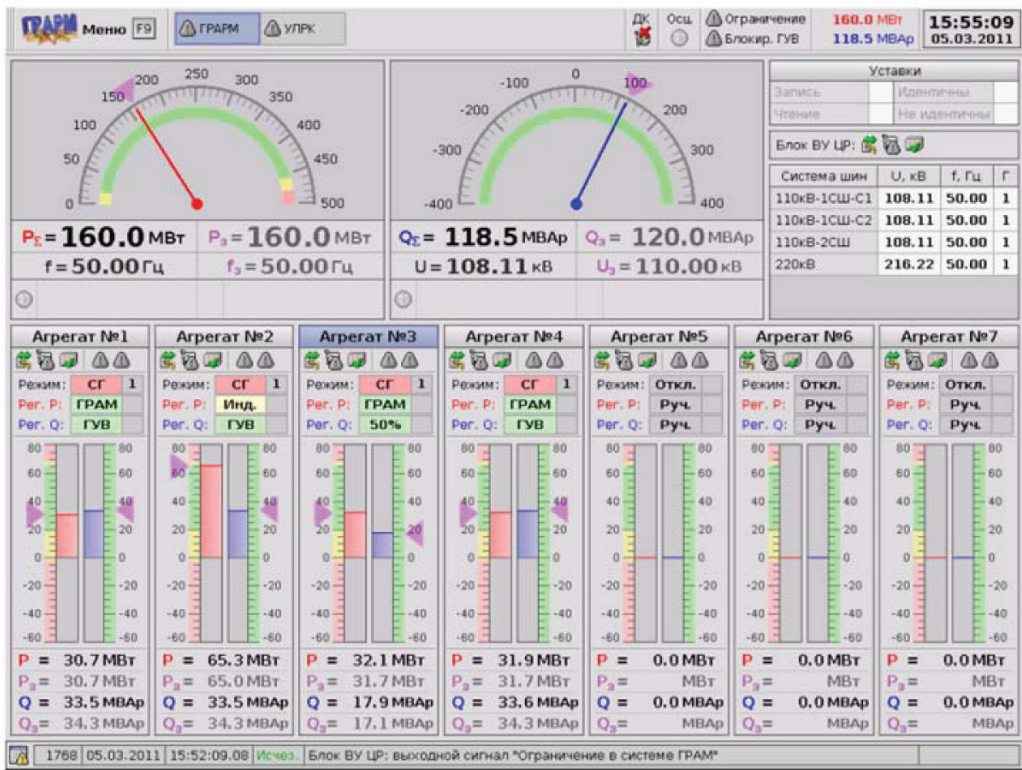


Рис. 6. Основное окно ГРАМ при работе агрегата № 3 с коэффициентом загрузки по реактивной мощности 50 %  
 Fig. 6. Main GRARM window when unit No. 3 is operating with 50 % reactive power load factor

На основании полученных данных можно сделать вывод, что в рассмотренных режимах работы

ГЭС алгоритм равномерного распределения функционирует без ошибок.



## Заключение

Получено аналитическое уравнение ограничения минимальной реактивной мощности явнополюсного генератора по условию обеспечения статической устойчивости для заданного коэффициента запаса, текущих активной мощности и напряжения. В целом, групповые регуляторы реактивной мощности рекомендовали себя как высокоэффективное решение для управления реактивной мощностью в энергосистемах. Они предлагают несколько преимуществ по сравнению с традиционными индивидуальными контроллерами, включая повышенную стабильность системы, снижение потерь и снижение затрат. При проектировании и развертывании этих контроллеров важно учитывать такие факторы, как топология системы, характеристики нагрузки и другое. В целом, групповые регуляторы реактивной мощности представляют собой перспективную технологию для повышения эффективности и надежности энергосистем, поэтому необходимы дальнейшие исследования и разработки в этой области.

## Благодарности

Выражаем особую благодарность ПАО «Русгидро» за содействие в сборе исходной информации и помощь в интеграции разработанного алгоритма в действующую на станции систему ГРАМ для проведения натурных испытаний.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

## Финансирование

Данная работа была профинансирована Новосибирским государственным техническим университетом путем предоставления гранта на проведение исследовательских работ.

## Список литературы

[1]. T. Capurso, M. Stefanizzi, M. Torresi, and S. M. Camporeale. «Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition». *Energy Convers. Manag.*, vol. 251, no. July 2021, p. 114898, 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114898.

[2]. Calise, F., Cappiello, F.L., Cimmino, L., Dentice d'Accadia, M. & Vicidomini, M. (2023). Renewable smart energy network: A thermoeconomic comparison between conventional lithium-ion batteries and reversible solid oxide fuel cells. *Renewable Energy*.

[3]. Henry, A., Mestay, D., Rooney, D., Robertson, P. & Foley, A. M. (2023). Techno-economic analysis to identify the optimal conditions for green hydrogen production. *Energy Conversion and Management*.

[4]. Boscherini, M., Storione, A., Minelli, M., Miccio, F. & Doghieri, F. (2023). New Perspectives on Catalytic Hydrogen Production by the Reforming, Partial Oxidation and Decomposition of Methane and Biogas. *Energies*.

[5]. Ibrayeva A. E. New Trends and Prospects of Hydrogen Energy in the World and in Kazakhstan. *Russia & World: Sc. Dialogue*. 2023; (3):71-87. (In Russ.) [https://doi.org/10.53658/RW2023-3-3\(9\)-71-87](https://doi.org/10.53658/RW2023-3-3(9)-71-87).

[6]. X. Song, D. Liang, J. Song, G. Xu, Z. Deng and M. Niu. «Problems and Technology Development Trends of Hydrogen Production from Renewable Energy Power Electrolysis - A Review». 2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Taiyuan, China, 2021, pp. 3879-3882, doi: 10.1109/EI252483.2021.9713350.

[7]. H. Bai, H. Chen and W. Shi. «Hydrogen Production by Renewable Energy and Future Trend in China». 2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and

Energy System Integration (EI2), Chengdu, China, 2022, pp. 676-680, doi: 10.1109/EI256261.2022.10116157.

[8]. M. Vadaszi, I. Szunyog and A. B. Szombati-Galyas. «The Role of Hydrogen Connected to the Existing Natural Gas Infrastructure in the Hungarian Energy Transition». 2023 19th International Conference on the European Energy Market (EEM), Lappeenranta, Finland, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/EEM58374.2023.10161884.

[9]. M. L. Imeni and M. S. Ghazizadeh. «Pave the Way for Hydrogen-Ready Smart Energy Hubs in Deep Renewable Energy System». 2023 8th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM), Mazandaran, Babol, Iran, Islamic Republic of, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICTEM56862.2023.10083890.

[10]. S. Li, Y. Si, L. Ma, N. Xin, Z. Wu and M. Gao. «Hydrogen Pricing Method Based on Geographical Distribution Characteristics of Renewable Energy Base». 2022 4th International Conference on Power and Energy Technology (ICPET), Beijing, China, 2022, pp. 671-676, doi: 10.1109/ICPET55165.2022.9918305.

[11]. A. M. Abomazid, N. A. El-Taweel and H. E. Z. Farag. «Optimal Energy Management of Hydrogen Energy Facility Using Integrated Battery Energy Storage and Solar Photovoltaic Systems» in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 13, no. 3, pp. 1457-1468, July 2022, doi: 10.1109/TSTE.2022.3161891.

[12]. U. Bossel. «Does a Hydrogen Economy Make Sense?» in *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, no. 10, pp. 1826-1837, Oct. 2006, doi: 10.1109/JPROC.2006.883715.

[13]. G. Li, J. Chen, X. Zheng, C. Xiao and S. Zhou. «Research on Energy Management Strategy of Hydrogen Fuel Cell Vehicles». 2020 Chinese Automation

Congress (CAC), Shanghai, China, 2020, pp. 7604-7607, doi: 10.1109/CAC51589.2020.9326669.

[14]. X. Zhao, Y. Yao, W. Liu, R. Jain and C. Zhao. «A Hydrogen Load Modeling Method for Integrated Hydrogen Energy System Planning». 2023 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Washington, DC, USA, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISGT51731.2023.10066443.

[15]. K. Nigim, J. McQueen and M. Persohn-Costa. «Operational modes of hydrogen energy storage in a micro grid system». 2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), London, ON, Canada, 2015, pp. 473-477, doi: 10.1109/EPEC.2015.7379997.

[16]. Alsalmán A. et al. Users, planners, and governments perspectives: A public survey on autonomous vehicles future advancements. *Transportation Engineering*, 2021, Vol. 3. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100044>.

[17]. Orlov A. A., Nesterenko G. A., Nesterenko I. S. Overview of perspectives of hydrogen energy. Development of science and practice in a globally changing world under the conditions of risks: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference, Moscow, 2022: 173-177. Available from: <https://doi.org/10.34755/IROK.2022.96.53.039>.

[18]. Mestnikov N. P., Davydov G. I., Al-Zakkar A. M. Hydrogen energy in North and Arctic. Textbook on the discipline «General Energy» and the elective «Fundamentals of Energy Saving and Resource Efficiency in the North». Yakutsk: NEFU Publishing House, 2022. [Electronic resource]. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48690434>.

[19]. Malykh E. B., Plotnikov V. A. Hydrogen energy: assessment of development prospects. *Natural Humanities Research*, 2022; 41(3):216-220.

[20]. L. Wang, Z. Dou, Y. Fan and C. Shi. «Research Front and Trend Analysis of Hydrogen Based Integrated Energy System by CiteSpace». 2021 6th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), Shanghai, China, 2021, pp. 1466-1471, doi: 10.1109/ICPRE52634.2021.9635422.

[21]. K. K. T. Thanapalan et al. «Progress in the development of renewable hydrogen vehicles, storage, infrastructure in the UK: Hydrogen Centre in its early years of operation». 2011 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing, Harbin, China, 2011, pp. 738-742, doi: 10.1109/ICICIP.2011.6008347.

[22]. Z. Xiao, Z. Zhang, Y. Yu and M. Ran. «Analysis of the Development Trend of China's Electricity-Hydrogen Energy Technology Research Based on Bibliometrics». 2023 6th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), Guangzhou, China, 2023, pp. 1511-1516, doi: 10.1109/CEEPE58418.2023.10166348.

[23]. H. Li, W. Lv, H. Zhao and C. Chen. «A village integrated energy system operating in electricity market and hydrogen market». 2022 First International Conference on Cyber-Energy Systems and Intelligent

Energy (ICCSIE), Shenyang, China, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCSIE55183.2023.10175270.

[24]. D. Nikolova and D. Stoilov. «Household Energy Efficiency, Diversification of Suppliers and Renewable Hydrogen Production – The Pillars of European Energy Independence». 2022 14th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria, 2022, pp. 1-3, doi: 10.1109/BulEF56479.2022.10020199.

[25]. D. Zhai, J. Zhang, J. Shen and Y. Li. «Optimal Scheduling of Hydrogen Energy Storage IES with Dual-fuel Cells». 2022 7th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), Shanghai, China, 2022, pp. 960-966, doi: 10.1109/ICPRE55555.2022.9960655.

[26]. J. Li and S. Obara. «Study on an energy supply system assuming a pipeline transportation of compressed hydrogen for distributed fuel cell in China». 2019 IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Xi'an, China, 2019, pp. 440-443, doi: 10.1109/PEDG.2019.8807745.

[27]. Y. Fuyuan, T. Xueqin, X. Tong and W. Xinlei. «Adaptability Assessment of Hydrogen Energy Storage System Based on Proton Exchange Membrane Fuel Cell under the Scenarios of Peaking Shaving and Frequency Regulation». 2021 4th Asia Conference on Energy and Electrical Engineering (ACEEE), Bangkok, Thailand, 2021, pp. 84-90, doi: 10.1109/ACEEE51855.2021.9575144.

[28]. M. F. Smitkova, F. Janicek and F. Martins. «Hydrogen Economy : Brief Sumarization of Hydrogen Economy». 2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), Prague, Czech Republic, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICECET55527.2022.9872907.

[29]. W. Pirom and A. Srisiriwat. «Electrical Energy-Based Hydrogen Production via PEM Water Electrolysis for Sustainable Energy». 2022 International Electrical Engineering Congress (iEECON), Khon Kaen, Thailand, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/iEECON53204.2022.9741667.

[30]. S. Zhang, C. Wang, R. Chen, S. Li, L. Liu and H. Dai. «Optimization of System Configuration and Production Simulation for On-grid Green Hydrogen Projects». 2022 5th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE), Beijing, China, 2022, pp. 397-401, doi: 10.1109/REPE55559.2022.9948766.

[31]. B. Ma et al. «Development of Hydrogen Energy Storage Industry and Research Progress of Hydrogen Production Technology». 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Wuhan, China, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510748.

[32]. Y. Song et al. «International Hydrogen Energy Policy Summary and Chinese Policy Analysis». 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Wuhan, China, 2020, pp. 3552-3557, doi: 10.1109/EI250167.2020.9346615.

[33]. W. Chu and Y. Zhang. «The Efficiency and Economic Feasibility Study on Wind-Hydrogen System». 2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference



(iSPEC), Chengdu, China, 2020, pp. 1198-1203, doi: 10.1109/iSPEC50848.2020.9350988.

[34]. A. Ciancio and L. De Santoli. «Assessing the Levelized Cost of Hydrogen Production in a Renewable Hydrogen Community in South Italy». 2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Madrid, Spain, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194654.

[35]. S. Zhang, N. Zhang, X. Zhang, Q. Shi, J. Lu and H. Dai. «Study on the Optimization of System Configuration of Green Hydrogen Projects». 2022 7th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), Shanghai, China, 2022, pp. 1260-1263, doi: 10.1109/ICPRE55555.2022.9960360.

[36]. J. Li and S. Obara. «Study on Hydrogen energy supply system with natural gas pipeline in China». 2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Macao, China, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/APPEEC45492.2019.8994477.

[37]. M. Shatnawi, N. A. Qaydi, N. Aljaberi and M. Aljaberi. «Hydrogen-Based Energy Storage Systems: A Review». 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Paris, France, 2018, pp. 697-700, doi: 10.1109/ICRERA.2018.8566903.

[38]. O. V. Marchenko, S. V. Solomin. «Efficiency of Hybrid Renewable Energy Systems in Russia». International Journal of Renewable Energy Research, vol. 7, pp. 1561-1569, 2017.

[39]. A. Mas'ud. «An Optimal Sizing Algorithm for a Hybrid Renewable Energy System». International Journal of Renewable Energy Research, vol. 7, pp. 1595-1602, 2017.

[40]. K. A. Kavadias, D. Apostolou, J. K. Kaldellis. Modelling and optimisation of a hydrogen-based energy storage system in an autonomous electrical network, Applied Energy, 2017.

[41]. Khalyasmaa, A.; Eroshenko, S.; Bramm, A.; Tran, D.C.; Chakravarthi, T. P.; Hariprakash, R. Strategic planning of renewable energy sources implementation following the country-wide goals of energy sector development. In Proceedings of the International Conference on Smart Technologies in Computing, Electrical and Electronics, Bengaluru, India, 9–10 October 2020; pp. 433-438.

[42]. Matrenin, P.; Safaraliev, M.; Dmitriev, S.; Kokin, S.; Eshchanov, B.; Rusina, A. Adaptive ensemble models for medium-term forecasting of water inflow when planning electricity generation under climate change. Energy Rep. 2022, 8, 439-447.

[43]. Mitrofanov, S.; Svetlichnaya, A.; Arestova, A.; Rusina, A. Development of a Software Module of Intra-Plant Optimization for Short-Term Forecasting of Hydropower Plant Operating Conditions. In Proceedings of the IEEE Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC), Novosibirsk, Russia, 13-15 November 2021.

[44]. Юрченко С. В. Система группового

регулирования активной мощности гидроагрегатов // Современная техника и технологии. 2017. № 3 [Электронный ресурс]. URL: <https://technology.snauka.ru/2017/03/12947> (дата обращения: 28.11.2022).

[45]. D. Tiomo, R. Wamkeue. Dynamic Modeling and Analysis of a Micro Hydro Power Plant for Microgrid Applications // IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2019.

[46]. Kazantsev Y. V., Glazyrin G. V., Khalyasmaa A. I., Shayk S. M., Kuparev M. A. Advanced Algorithms in Automatic Generation Control of Hydroelectric Power Plants. Mathematics. 2022; 10(24):4809. <https://doi.org/10.3390/math10244809>

[47]. Mo, W. K.; Chen, Y. P.; Chen, H. Y.; Liu, Y.; Zhang, Y.; Hou, J.; Gao, Q.; Li, C. Analysis and Measures of Ultralow-Frequency Oscillations in a Large-Scale Hydropower Transmission System. IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron. 2018, 6, 1077-1085.

[48]. Cutululis, N. A.; Farahmand, H.; Jaehnert, S.; Detlefsen, N.; Byriel, I.P.; Sørensen, P. E. Hydropower flexibility and transmission expansion to support integration of offshore wind. In Offshore Wind Farms: Technologies, Design and Operation, 1st ed.; Ng, C., Ran, L., Eds.; Woodhead Publishing: Sawston, UK, 2016; pp. 495-523.

[49]. Farahmand, H.; Jaehnert, S.; Aigner, T.; Huertes-Hernando, D. Nordic hydropower flexibility and transmission expansion to support integration of North European wind power. Wind Energy 2015, 18, 1075-1103.

[50]. Liu, Q.; Chen, G.; Liu, B.; Zhang, Y.; Liu, C.; Zeng, Z.; Fan, C.; Han, X. Emergency Control Strategy of Ultra-low Frequency Oscillations Based on WAMS. In Proceedings of the IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, 21-24 May 2019; pp. 296-301.

[51]. Kazantsev, Y. V.; Glazyrin, G. V.; Shayuk, S. M.; Tanfilyeva, D.; Tanfilyev, O.; Fyodorova, V. Hydro unit active power controller minimizing water hammer effect. In Proceedings of the IEEE Ural Smart Energy Conference (USEC), Ekaterinburg, Russia, 13-15 November 2020.

[52]. Glazyrin, G. V.; Kazantsev, Y. V. Optimal control law for minimization of active power overshoot due to water hammer effect in a hydro unit. In Proceedings of the IEEE 11 International Forum on Strategic Technology (IFOST), Novosibirsk, Russia, 1-3 June 2016; pp. 329-333.

[53]. Gaidukov, J.; Glazyrin, G.; Glazyrin, V.; Eroshenko, S. Control algorithms and optimization method of the hydroelectric power plant's microprocessing joint power control. In Proceedings of the 2020 Ural Smart Energy Conference, Ekaterinburg, Russia, 13-15 November 2020; p. 9281275.

[54]. Rojas, D. G.; Lezama, J. L.; Villa, W. Metaheuristic Techniques Applied to the Optimal Reactive Power Dispatch: A Review. IEEE Lat. Am. Trans. 2016, 14, 2253-2263.

[55]. S. Shah, H. Sun. VSC Based Active Synchronizer for Generators // IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017.

[56]. Y. Peng, X. Zhang. Optimal Operation of Hydropower Station Using Improved Immune Genetic Algorithm // IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering, 2017. pp. 408-411.

[57]. F. Fang, R. Karki. Reliability Implications of Riverflow Variations in Planning Hydropower Systems // IEEE Conference on Technologies for Sustainability, 2018.

[58]. Campaner, R.; Chiandone, M.; Arcidiacono, V.; Milano, F.; Sulligoi, G. Automatic Voltage Control of a Cluster of Hydro Power Plants to Operate as a Virtual Power Plant. In Proceedings of the International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Rome, Italy, 10-13 June 2015.

[59]. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справ. материалы для курсового и диплом. проектирования: [Учеб. пособие для электроэнерг. спец. вузов] / И. П. Крючков, Н. Н. Кувшинский, Б. Н. Неклепаев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергия, 1978. – 456 с.: ил.; 20 см.

[60]. Шовкопляс, С. С. Уточнение параметров схемы замещения группы однофазных автотрансформаторов сверхвысокого напряжения / С. С. Шовкопляс, И. А. Морозов, Е. И. Сацук // Кибернетика энергетических систем: Сборник материалов XL сессии научного семинара по тематике «Диагностика энергооборудования», Новочеркасск, 25-26 сентября 2018 года. – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, 2018. – С. 420-424. – EDN NGEKDE.

[61]. D. Tiomo, R. Wamkeue. Dynamic Modeling and Analysis of a Micro Hydro Power Plant for Microgrid Applications // IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2019.

[62]. Saka, B.; Aibinu, A.M.; Mohammed, Y.S.; Olatunji, D.E. Voltage Stability of the Power System using Genetic Algorithm: A Review. In Proceedings of the 2021 1st International Conference on Multidisciplinary Engineering and Applied Science (ICMEAS), Abuja, Nigeria, 15-16 July 2021.

[63]. Khalyasmaa, A.; Eroshenko, S.; Arestova, A.; Mitrofanov, S.; Rusina, A.; Kolesnikov, A. Integrating GIS technologies in hydro power plant cascade simulation model. E3S Web Conf. 2020, 191, 02006.

[64]. Liu, B.; Liao, S.; Cheng, C.; Wu, X. Multi-Core Parallel Genetic Algorithm for the Long-Term Optimal Operation of Large-Scale Hydropower Systems. In Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress, West Palm Beach, FL, USA, 22-26 May 2016; pp. 220-230

[65]. Robert, Q.; Planque, J. L. Robust Digital Automatic Reactive Power Regulator for Hydro Power Plants. In Proceedings of the 2007 International Conference on Clean Electrical Power, Capri, Italy, 21-23 May 2007; pp. 175-179.

[66]. «IEEE Draft Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Parameter Verification with Applications in Power System Stability Analyses» in IEEE P1110/D07, July 2019, vol., no., pp. 1-101, 23 July 2019.

[67]. Q. Zhang, H. Liu, Y. Bai, J. Wang and Y. Qu. «A Novel Analysis Scheme for Static Voltage Stability of Distribution Network with DFIG and SVC». 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, China, 2018, pp. 201-206, doi: 10.1109/IAEAC.2018.8577705.

[68]. O. V. Gazizova, G. P. Kornilov and A. P. Sokolov. «Development of a System for Regulating the Excitation of Synchronous Generators of Factory Power Plants Connected to a Powerful Energy System». 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, 2022, pp. 229-233, doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906730.

[69]. Jie, Z.; Shengchun, L.; Yao, R.; Liang, D.; Zhanshan, Y.; Yongfei, M. Reactive power optimization for AVC system based on decoupled interior point method. In Proceedings of the 2022 14th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), Changsha, China, 15-16 January 2022; pp. 131-133.

[70]. Z. Hu. «Static Voltage Stability Analysis under Different Accident Conditions». 2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), Hubei, China, 2019, pp. 206-209, doi: 10.1109/IGBSG.2019.8886227.

[71]. Runoff passing simulation model for assessing the efficiency of the water-power conditions of an HPP cascade / A. G. Rusina, A. V. Beloglazov, C. A. Sovban, D. V. Kornilovich. – DOI 10.1007/s10749-023-01477-0. – Text: direct // Power Technology and Engineering. – 2022. – Vol. 56, iss. 1. – P. 88-95.

[72]. Qin LIU. Emergency Control Strategy of Ultra-low Frequency Oscillations Based on WAMS / Qin LIU, Gang CHEN, Baisi LIU, Yudong ZHANG, Chuyu LIU, Zhuolin ZENG, Chengwei FAN, Xiaoyan HAN // IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia). – 2019. – P. 296-301.

[73]. Исследование и разработка алгоритмов группового регулирования активной и реактивной мощности ГЭС: диссертация ... кандидата технических наук: 05.14.02 / Казанцев Юрий Валентинович; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»]. – Новосибирск, 2021. – 198 с.: ил.

[74]. Wang, Y.; Jiang, Q. Reactive power optimization of distribution network based on primal-dual interior point method and simplified branch and bound method. In Proceedings of the 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, Chicago, IL, USA, 14-17 April 2014.

*Транслитерация по BSI*





## ЭНЕРГОКОМПЛЕКСЫ НА ОСНОВЕ ВИЭ

## RES BASED POWER COMPLEXES

Статья поступила в редакцию 04.03.24 Ред. Пер. № 313-003-24

The article has entered in publishing office 04.03.24 Ed. Reg. No. 309-003-24

УДК 621.314.1

## СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПониЖАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

*Котин Д. А.<sup>1</sup>, Иванов И. А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
пр. К. Маркса, 20, 630073, Новосибирск, Россия; d.kotin@corp.nstu.ru

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
пр. К. Маркса, 20, 630073, Новосибирск, Россия; i.a.ivanov@corp.nstu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.028-041

Заключение совета рецензентов: 18.03.24

Заключение совета экспертов: 21.03.24

Принято к публикации: 30.03.24

В данной работе рассматривается проблема синтеза системы управления понижающего преобразователя, выпаленного по схеме Buck преобразователь. Предлагаемый метод синтеза регулятора системы управления позволяет учесть при проектировании регулятора колебания и значительные изменения входного и выходного напряжения в процессе стабилизации напряжения. Это достигается за счет использования в алгоритмах расчета параметров регуляторов системы управления линеаризованных моделей объекта управления. В данной работе предлагается использовать линеаризацию рядом Тейлора, но результаты работы позволяют заменить расчет данного параметра на любой другой метод. Также производить анализ использования разработанного непрерывного регулятора и полученных на его основе переоборудованных дискретных регуляторов. На основе проделанной работы был получен обобщенный метод синтеза регулятора для понижающего преобразователя напряжения в непрерывной и дискретной области. Данные регуляторы обладают свойствами адаптивности, которая выражена самоподстройкой коэффициентов регулятора. За счет этого достигается возможность использовании полученной системы управления на широком диапазоне значений входного и выходного напряжения стабилизатора постоянного напряжения.

**Ключевые слова:** синтез регулятор, ПИД-регулятор, самоподстройка коэффициентов регулятора, Buck преобразователь, SimInTech, двухконтурная система, нелинейность .

*Котин Д. А., Иванов И. А. Синтез системы управления понижающего преобразователя, учитывающей нелинейность объекта управления // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 03(420) 2024, с.28-41*

*Kotin D. A., Ivanov I. A. Synthesis of a control system for a buck converter that takes into account the nonlinearity of the control object // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 03(420) 2024, pp. 28-41*



# SYNTHESIS OF A CONTROL SYSTEM FOR A BUCK CONVERTER, ACCOUNTING FOR THE NONLINEARITY OF THE CONTROL OBJECT

*Kotin D. A.<sup>1</sup>, Ivanov I. A.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, K. Marx Ave., 20, 630073, Novosibirsk, Russia; d.kotin@corp.nstu.ru

<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University, K. Marx Ave., 20, 630073, Novosibirsk, Russia; i.a.ivanov@corp.nstu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.028-041

Referred: 18.03.24

Received in revised form: 21.03.24

Accepted: 30.03.24

This paper examines the problem of synthesizing a control system for a buck converter designed according to the Buck converter circuit. The proposed method for synthesizing a control system regulator allows one to take into account, when designing the regulator, oscillations and significant changes in input and output voltage in the process of voltage stabilization. This is achieved through the use of linearized models of the control object in the algorithms for calculating the parameters of the control system regulators. In this work, it is proposed to use Taylor series linearization, but the results of the work make it possible to replace the calculation of this parameter with any other method. Also analyze the use of the developed continuous regulator and the converted discrete regulators obtained on its basis. Based on the work done, a generalized method for synthesizing a regulator for a step-down voltage converter in the continuous and discrete domain was obtained. These regulators have adaptability properties, which is expressed by self-adjustment of the regulator coefficients. Due to this, it is possible to use the resulting control system over a wide range of input and output voltage values of the DC voltage stabilizer.

**Keywords:** controller synthesis, PID controller, self-tuning of controller coefficients, Buck converter, SimInTech, two-cascade system, nonlinearity.



Котин  
Денис Алексеевич  
Kotin  
Denis Alexievich

#### Сведения об авторе:

**Место работы:** «Новосибирский государственный технический университет», заведующий кафедры «Электропривода и автоматизации промышленных установок».

**Образование:** Новосибирский государственный технический университет, 2007 г.

**Ученая степень:** доцент.

**Область научных интересов:** системы автоматического управления, силовые преобразователи.

**Публикации:** 45 статей, 8 учебных пособий, 10 патентов, 75 тезисов.

#### About the author:

**Place of employment:** «Novosibirsk State Technical University», Head of the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations.

**Education:** Novosibirsk State Technical University, 2007.

**Academic degree:** associate professor

**Scientific interests area:** automatic control systems, power converters.

**Publications:** 45 articles, 8 books, 10 patents, 75 theses.



Иванов  
Илья Алексеевич  
Ivanov  
Ilya Alexievich

#### Сведения об авторе:

**Место работы:** «Новосибирский государственный технический университет», ассистент кафедры «Электропривода и автоматизации промышленных установок».

**Образование:** Новосибирский государственный технический университет, 2020 г.

**Область научных интересов:** системы автоматического управления, силовые преобразователи.

**Публикации:** 7 статей, 2 учебных пособия, 28 патентов, 54 тезиса.

#### About the author:

**Place of employment:** «Novosibirsk State Technical University», assistant at the Department of Electric Drives and Automation of Industrial Installations.

**Education:** Novosibirsk State Technical University, 2020.

**Scientific interests area:** automatic control systems, power converters.

**Publications:** 7 articles, 2 books, 28 patents, 54 theses.



## Введение

Стабилизаторы постоянного напряжения имеют большое распространение в современных системах электроснабжения, основанных на принципах распределённой генерации и применения интеллектуальной системы энергоснабжения. При этом основное их применение в системах электроснабжения автономных потребителей, встречается в системах microgrid с промежуточной шиной постоянного тока. Это вызвано тем, что в данных системах требуется только стабилизация уровня напряжения источника энергии

для реализации требуемого уровня на общей промежуточной шине постоянного тока.

Задача стабилизации напряжения включает в себя как повышение напряжения первичной стороны преобразователя, так и понижение напряжения первичной стороны для достижения требуемого уровня выходного напряжения преобразователя.

В качестве объекта предлагается рассмотреть понижающий преобразователь, выполненный по схеме buck преобразователя, рисунок 1.

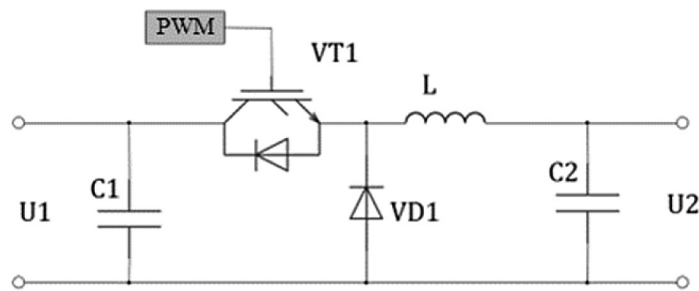


Рис. 1. Понижающий DC/DC преобразователь

Fig. 1. Buck DC/DC converter

Этот преобразователь может реализовать режим как непрерывного тока, так и режим с бестоковой паузой. Режим бестоковой паузы реализуется следующим образом: ключ VT1, при подаче на него сигнала с источника ШИМ сигнала, замыкает контур тока на дроссель  $L$ , происходит накопление энергии в дросселе  $L$ . В этот же промежуток времени происходит заряд конденсатора  $C_2$  через дроссель  $L$ . При снятии управляющего воздействия с VT1, накопленная порция энергии в дросселе  $L$  и конденсаторе  $C_2$  начинает передаваться на выход преобразователя. При исчерпании энергии в дросселе  $L$  образуется бестоковая пауза перед следующим циклом передачи энергии в емкость выходного фильтра  $C_2$ .

Преимущество данной схемы перед другими схемами повышающих преобразователей заключается в ее простоте, за счет чего упрощается организация управления полупроводниками и снижаются потери в общей системе.

Но так как задача стабилизации напряжения является динамической задачей, то на качество стабилизации большое влияние оказывает регулятор, синтезированный для преобразователя.

В настоящее время широкое распространение получают современные методики синтеза регуляторов, но в большинстве случаев их превосходство над регуляторами, синтезированными классическим методом, незначительно или полностью отсутствует. Так в работе N. D. Bhat и др. [1] происходит сравнение регулятора на нечеткой логике и ПИ-регулятора, при-

чем системы управления являются одноконтурными, происходит регулирование только уровня напряжения. Из результатов работы видно, что оба регулятора находятся в 5 % зоне ошибки регулирования, а время переходного процесса отличается на сотые миллисекунды. В работе W. J. Gil-González и др. [2] сравниваются ПИ-регулятор с proportional-integral passivity-based controller регулятором. Результаты работы показывают практически полное отсутствие выигрыша от использования модифицированного регулятора. Т. К. Roy и др. [3] в своей работе сравнили ПИ-регулятор с nonlinear adaptive backstepping controller. Модифицированный регулятор ускоряет процесс стабилизации выходного сигнала, уменьшая величину перерегуливания системы, но с точки зрения длительности переходного процесса значительные изменения отсутствуют. Идентичные результаты были получены в работах Oscar Danilo Montoya Giraldo [4] и Prabhu Omer [5].

Опираясь на данный анализ [1-5], мы можем предположить, что использование классических методов является рациональным. Данный вывод подтверждается работами других ученых.

Рассмотрим методики синтезов ПИД-регуляторов для системы buck конвертора. Vasilica-Daniela Andries и др. [6] используют прямой метод синтеза дискретного регулятора pole-placement method's. Данный метод позволяет обеспечить стабильный переходной процесс и учесть в определенной степени нелинейность объекта, но требует значительного объема расчетов для определения предельных допустимых



автоколебаний систем, и при высоком порядке может быть затруднительным. В работе Chao-Ying Wang и др. [7] рассматривается синтез ПИД-регулятора и переобувание его методом Тустена. Расчет параметров регулятора осуществляется по модели линеаризованного четырёхполюсника. Данный метод имеет массивный математический аппарат, из-за чего затруднителен для реализации. Авторы Mor Mordechai Peretz и др. [8] рассматривают синтез дискретного регулятора на основное использование «идеальных» переходных процессов при подборе коэффициентов регулятора. Также существуют модифицированные ПИД-регуляторы, в которых динамически рассчитываются параметры регулятора. В работах [9-11] рассматривается самонастройка регуляторов.

Из рассмотренных работ видно, что использование классического регулятора является востребованным. Чаще всего [1-12] в качестве регулятора рассматривается только контур стабилизации напряжения, обеспечивающий качественный переходной процесс напряжения и не рассматривается контур тока и его настройка.

В данной работе мы предлагаем рассмотреть настройку контура тока и контура напряжения buck преобразователя. Провести анализ функционирования цифровых регуляторов, полученных путем переобуования непрерывного регулятора, а также методику и алгоритм самонастройки регулятора для учета влияния нелинейного поведения стабилизатора.

### Список обозначений

$I_2$	Выходной ток преобразователя
$U_1$	Входное напряжения преобразователя
$U_2$	Выходное напряжения преобразователя
$L$	Индуктивность дросселя
$f_{PWM}$	Частота ШИМ сигнала
$D$	Скважность
$D_0$	Рабочая точка скважности
$K_L$	Коэффициент линеаризация нелинейного элемента
$W_L(s)$	Передаточная функция линеаризации нелинейного элемента
$W_I(s)$	Передаточная функция контуру тока
$K_{II}$	Коэффициент интегральной части регулятора тока
$K_{I2}$	Коэффициент обратной связи по току
$\omega_{dl}$	Циклическая частота ШИМ сигнала

$\omega_l$	Частота среза контура регулирования тока
$K_I$	Коэффициент разделения движения контура тока от частоты ШИМ
$C_2$	Емкость выходного фильтра
$W_U(s)$	Передаточная функция контура напряжения
$K_{PU}$	Коэффициент пропорциональной части регулятора напряжения
$K_{IU}$	Коэффициент интегральной части регулятора напряжения
$K_{U2}$	Коэффициент обратной связи по напряжению
$A_1$	Коэффициент формы переходного процесса
$\omega_n$	Частота среза контура регулирования напряжения
$K_U$	Коэффициент разделения движения контура напряжения и тока
$K_f$	Коэффициент фильтра
$W_{ADC}(z)$	Передаточная функция АЦП
$T_{PWM}$	Период ШИМ

### Теоретический анализ

Преобразователь понижающего типа, построенный по принципу Buck преобразователя, представлен на рисунке 1. Так как выбран режим с наличием бестоковой паузы, то согласно ему был произведён синтез алгоритма управления системой стабилизации уровня напряжения.

Опираясь на научные работы в области синтеза систем управления полупроводниковыми преобразователями, произведён синтез двухконтурной системы управления, где внутренний контур отвечает за обеспечение требуемой динамики тока, а внешний – за динамику напряжения.

Проведя анализ поведения тока от соотношения длительности промежутков времени и величин напряжений, получим регулировочную характеристику, описывающую среднее значение тока, протекающего через дроссель, как:

$$I_2 = \frac{1}{2lf_{PWM}} \cdot (U_2 - U_1) \cdot D^2 = K \cdot D^2; \quad (1)$$

где  $l$  – значение индуктивности дросселя,  $f_{PWM}$  – частота ШИМ сигнала,  $D$  – скважность.

Как видно формулы (1), среднее значение тока имеет нелинейную зависимость от значения скваж-



ности транзистора. Для того, чтобы можно было учесть нелинейность, в параметрах регулятора используется классический метод линеаризации малым приращением, который заключается в определении производной функции относительно рабочей точки, или значения тангенса угла касательной к данной точке:

$$K_L = \left. \frac{dI_2}{dD} \right|_{D_0} = 2KD_0; \tag{2}$$

где  $D_0$  – значение скважности рабочей точки.

С учётом (2), видно, что передаточная функция объекта будет представлять из себя пропорциональное звено:

$$W_I(s) = \frac{I_2(s)}{D(s)} = K_L = 2KD_0 = \frac{D_0}{lf_{PMW}} \cdot (U_2 - U_1); \tag{3}$$

Рабочее значение скважности можно определить следующим образом:

$$D_0 = \frac{U_2}{U_1}$$

Следовательно коэффициент линеаризации примет вид:

$$K_L = \frac{1}{lf_{PMW}} \cdot \frac{U_2(U_2 - U_1)}{U_1} = f(U_1, U_2). \tag{4}$$

Так как объект имеет передаточную функцию в виде пропорционального звена, то наиболее эффективным методом является синтез контура управления, использующего настройку на технический оптимум, при стандартной настройке фильтра Баттерворта, что даст в итоге суммарную функцию контура тока с учётом обратной отрицательной связи в виде апериодического звена первой степени. Помимо этого, так как данная система является дискретной системой регулирования за счет использования в системе ШИМ, то необходимо выполнить условие теоремы Котельникова, или теоремы отсчёта, которая определяет отношение постоянных времени системы регулирования с частотой ШИМ сигнала. Выполнение данной теоремы позволяет произвести расчет коэффициентов регуляторов, считая, что вся система линейна. На основании вышесказанного, построим структурную схему регулятора, рисунок 2.

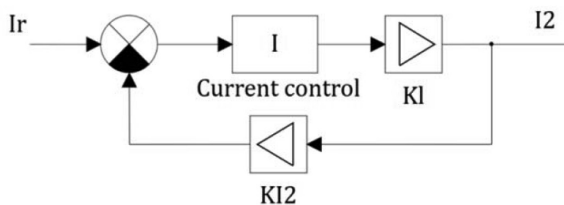


Рис. 2. Структурная схема регулятора тока  
Fig. 2. Block diagram of the current regulator

Передаточная функция контура имеет вид:

$$W_I(s) = \frac{1}{\frac{K_{I2}}{K_L K_{II} K_{I2}} s + 1}; \tag{5}$$

где  $K_{I2}$  – коэффициент обратной связи по току,  $K_{II}$  – коэффициент интегральной части регулятора.

Для выполнения теоремы отсчета определим новую частоту среза системы управления:

$$\omega_{dI} = 2\pi f_{\text{ШИМ}}; \tag{6}$$

$$\omega_I = \frac{\omega_{dI}}{K_I}; \tag{7}$$

где  $\omega_d$  – частота среза, определяемая частотой ШИМ;  $\omega_I$  – частота среза контура управления;  $K_I$  – коэффициент разделения частот среза, выбираемый при настройке регулятора.

После определения новой частоты среза определим желаемую передаточную функцию:

$$W_I(s) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_I} s + 1}; \tag{8}$$

Приравняв соответствующие друг другу коэффициенты из (5) и (8), определим коэффициент интегрального звена:

$$K_{II} = \frac{\omega_I}{K_{I2} K_L}; \tag{9}$$

Для определения  $K_I$ , можно как произвести расчет её значения из функции, так и построить регуляционную характеристику и определить тангенс угла наклона касательной.

Проведём синтез внешнего контура управления стабилизатором напряжения, а именно, синтез контура регулирования напряжения.

Опираясь на все вышеописанные принципы и условия синтеза контура регулирования, проведем анализ данного контура. Так как постоянная времени передаточной функции выходного фильтра (С2) преобразователя значительно больше постоянной времени контура тока, то исключив влияние апериодической составляющей контура тока, можно оставить только пропорциональную часть данного звена, а именно значение коэффициента усиления звена. В получившейся системе при использовании настройки на технический оптимум, регулятор будет представлен только в виде пропорционального регулятора, это, возможно, не позволит обеспечить качественный переходный процесс. Поэтому в качестве решения предлагается произвести настройку на модульный оптимум, т.е. добавить в регулятор интегральную составляющую.

С учётом этого получим структурную схему контура напряжения, рисунок 3.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

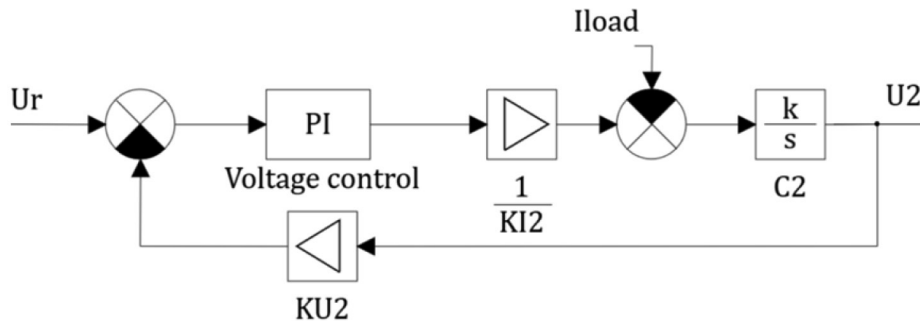


Рис. 3. Структурная схема контура напряжения

Fig. 3. Block diagram of the voltage circuit

Тогда передаточная функция контура напряжения имеет вид:

$$W_U(s) = \frac{\frac{K_{PU}}{C_2 \cdot K_{I2}} s + \frac{K_{IU}}{C_2 \cdot K_{I2}}}{s^2 + \frac{K_{PU} K_{U2}}{C_2 \cdot K_{I2}} s + \frac{K_{IU} K_{U2}}{C_2 \cdot K_{I2}}}; \quad (10)$$

где  $K_{U2}$  – коэффициент обратной связи по напряжению.

Для определения значения коэффициентов регулятора, приравняем знаменатель передаточной функции (10) к нормированному полиному:

$$N(s) = s^2 + A_1 \omega_n s + \omega_n^2; \quad (11)$$

где  $A_1$  – коэффициент формы переходного процесса.

При использовании стандартной биномиальной настройки:

$$\omega_n = \frac{\omega_I}{K_U}; \quad (12)$$

$$A_1 = 2. \quad (13)$$

На основании (8) – (12) производится расчет коэффициентов регулятора приравнением коэффициентов, стоящих при  $s$  с одинаковыми степенями, получим:

$$K_{IU} = \frac{K_{I2} C_2 \omega_n^2}{K_{U2}}; \quad (14)$$

$$K_{PU} = \frac{A_1 K_{I2} C_2 \omega_n}{K_{U2}}. \quad (15)$$

На основе зависимостей (14) и (15) произведём настройку регулятора напряжения. Так же, как и при настройке регулятора тока, настройка происходит за счет выбора желаемой частоты среза контура.

Для компенсации возникновения полюсов в системе воспользуемся фильтром, где постоянная времени рассчитывается следующим образом:

$$K_f = \frac{K_{PU}}{K_{IU}}. \quad (16)$$

Согласно описанной методике и зависимостям (1) – (16) был разработан регулятор уровня напряжения, представленный на рисунке 4.

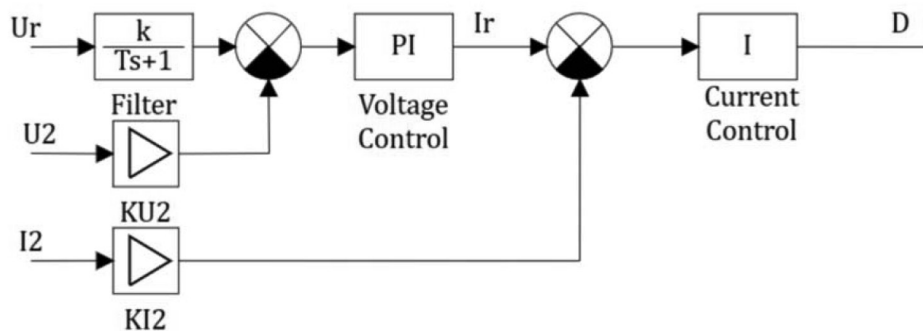


Рис. 4. Разработанный регулятор напряжения

Fig. 4. Designed voltage regulator

Следуя вышеозвученному принципу расчетов параметров регуляторов системы управления Виск преобразователем, можно произвести расчет коэффици-

циентов двухконтурной системы управления.

Для получения цифрового регулятора, с учётом вышеуказанного, достаточно воспользоваться мето-

дом переоборудования регулятора. Данный метод заключается в том, что производится аппроксимация линейной функции для получения точек решётчатой функции. Для того, чтобы не изменять порядок сте-

пени регулятора, воспользуемся методами прямого преобразования Эйлера, обратного преобразования Эйлера и методом Тустена. В таблице 1 представлены формы для расчёта параметров регуляторов.

Таблица 1

Параметры регуляторов

Table 1

Regulator parameters

Тип системы	Регулятор тока	Регулятор напряжения	
	И	П	И
Непрерывный регулятор	$\frac{\omega_L}{K_{I2}} \cdot \frac{1}{K_L}$	$\frac{A_1 K_{I2} C_2 \omega_n}{K_{U2}}$	$\frac{K_{I2} C_2 \omega_n^2}{K_{U2}}$
Прямой метод Эйлера	$\frac{\omega_L T_{PWM}}{K_{I2}} \cdot \frac{1}{K_L}$	$\frac{A_1 K_{I2} C_2 \omega_n}{K_{U2}}$	$\frac{T_{PWM} K_{I2} C_2 \omega_n^2}{K_{U2}}$
Обратный метод Эйлера	$\frac{\omega_L T_{PWM}}{K_{I2}} \cdot \frac{1}{K_L}$	$\frac{A_1 K_{I2} C_2 \omega_n}{K_{U2}}$	$\frac{T_{PWM} K_{I2} C_2 \omega_n^2}{K_{U2}}$
Метод Тустена	$\frac{\omega_L T_{PWM}}{2 K_{I2}} \cdot \frac{1}{K_L}$	$\frac{A_1 K_{I2} C_2 \omega_n}{K_{U2}}$	$\frac{T_{PWM} K_{I2} C_2 \omega_n^2}{2 K_{U2}}$

Используя структурную схему, рисунок 6, и алгоритм расчета параметров регуляторов, можно разработать систему управления DC/DC преобразователем постоянного напряжения понижающего типа.

Так как дискретные регуляторы создают управляющее воздействие по значению предыдущего шага, то важно правильно организовать процесс измерения сигнала, поступающего по обратной связи в цифро-

вую систему управления. Для того, чтобы минимизировать ошибки, вызванные наличием помех в канале обратной связи, было принято решение использовать усреднённое восьмикратное значение АЦП. Такое усреднение позволяет исключить как системную ошибку, так и псевдослучайную. Дискретная передаточная функция АЦП примет вид:

$$W_{ADC} = \frac{1 + z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + z^{-4} + z^{-5} + z^{-6} + z^{-7}}{8}; \tag{17}$$

при этом период дискретизации АЦП:

$$T_{ADC} = \frac{T_{PWM}}{8}.$$

Использование дискретной передаточной функции (17) возможно и в линейной системе для достижения той же цели.

Проведя анализ синтеза систем управления для полупроводникового преобразователя, видно, что на рисунке 4 отсутствуют свойственные данным сис-

темам ограничивающие элементы, представленные виде нелинейного звена насыщения. Наличие таких звеньев в системах с интегральными составляющими регулятора, может вызвать накопление ошибки на входе ограничивающего звена, что приведет к значительному ухудшению быстродействия системы.

С учетом модификации регуляторов методами компенсации интегральной составляющей и исключением интегрирующей составляющей, получим структуру регулятора, представленную на рисунке 5.



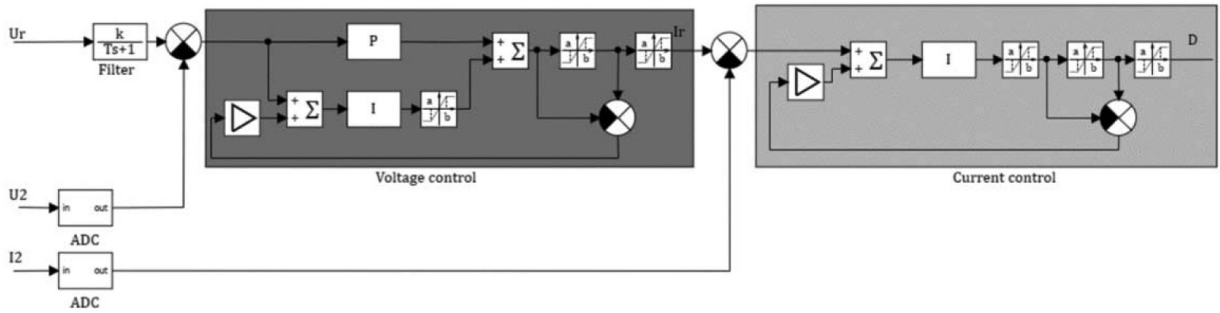


Рис. 5. Модифицированная система управления стабилизатором напряжения  
 Fig. 5. Modified voltage stabilizer control system

**Результат**

Для изучения работы предложенных алгоритмов управления в системе с понижающим стабилизатором напряжения была произведена разработка имитационной (математической) модели в программной среде SimInTech. Параметры объекта представлены в таблице 2.

Для изучения работы предложенных алгоритмов управления в системе с понижающим стабилизатором напряжения была произведена разработка имитационной (математической) модели в программной среде SimInTech. Параметры объекта представлены в таблице 2.

Параметры объекта

Таблица 2

Object parameters

Table 2

$L$ , мкГн	$C_1$ , мкФ	$C_2$ , мкФ	$f_{PIM}$ , кГц	$P_p$ , кВт
10	6000	6000	6000	60

Параметры системы управления представлены в таблице 3.

Параметры системы управления

Таблица 3

Control system parameters

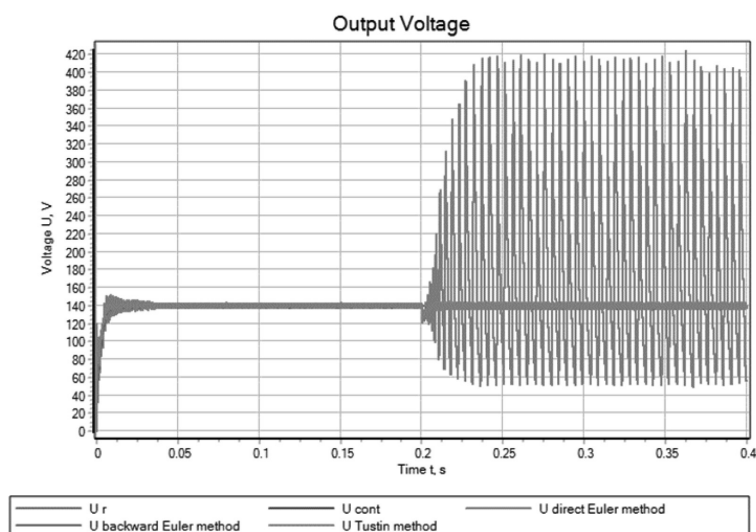
Table 3

Линейная система	$1,38801K_L^{-1}$	11,309734	5329,5864
Прямой метод Эйлера	$0,00023133546K_L^{-1}$	11,309734	0,8882644
Обратный метод Эйлера	$0,00023133546K_L^{-1}$	11,309734	0,8882644
Метод Тустена	$0,00011566773K_L^{-1}$	11,309734	0,4441322

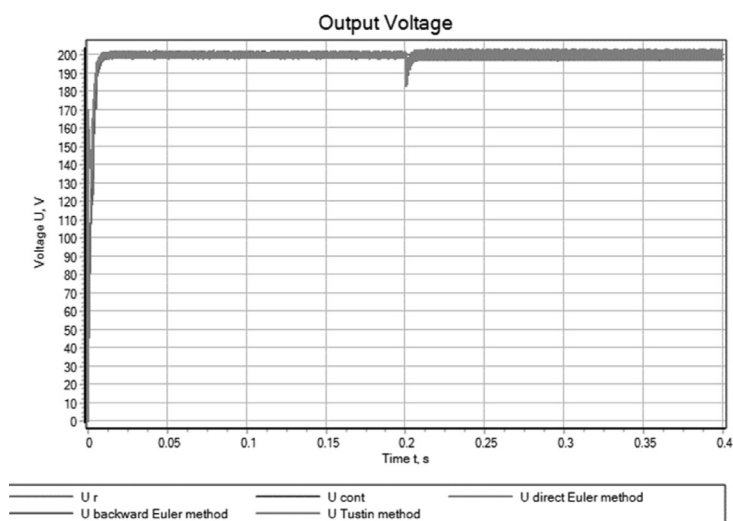
Используя данные параметры, проведем исследование предлагаемой системы с шагом на задание напряжения в 60 В, начиная с 140 В и заканчивая 440 В при входном напряжении 540 В, причем в первый промежуток времени до 0,2 секунды система работа-

ет на мощность в 30 кВт, а в 0,2 секунды происходит ступенчатое увеличение нагрузки в 2 раза, до 60 кВт. Результаты моделирования представлены на рисунках 6-11.

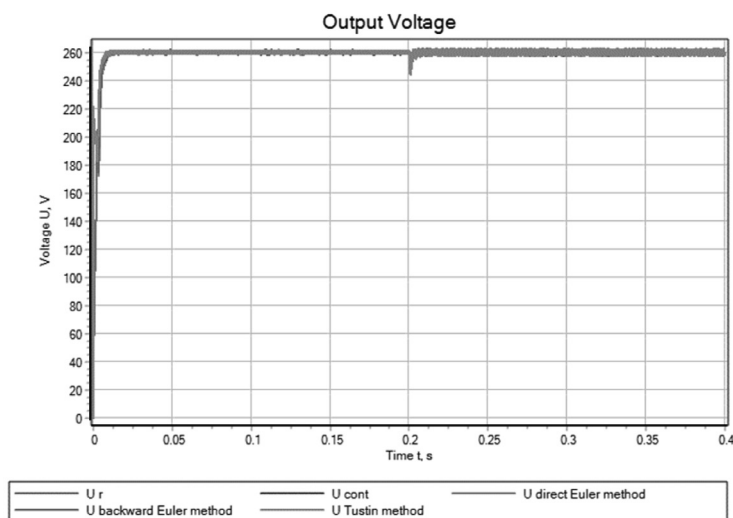




**Рис. 6.** Задание выходного напряжения 140 В  
**Fig. 6.** Setting the output voltage to 140 V



**Рис. 7.** Задание выходного напряжения 200 В  
**Fig. 7.** Setting the output voltage to 200 V



**Рис. 8.** Задание выходного напряжения 260 В  
**Fig. 8.** Setting the output voltage to 260 V



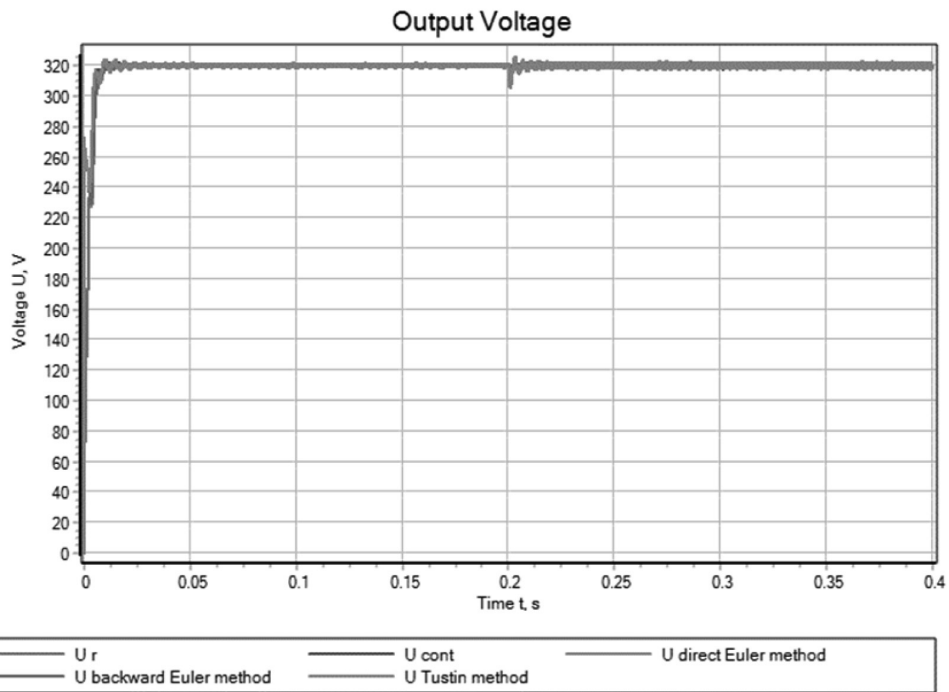


Рис. 9. Задание выходного напряжения 320 В  
 Fig. 9. Setting the output voltage to 320 V

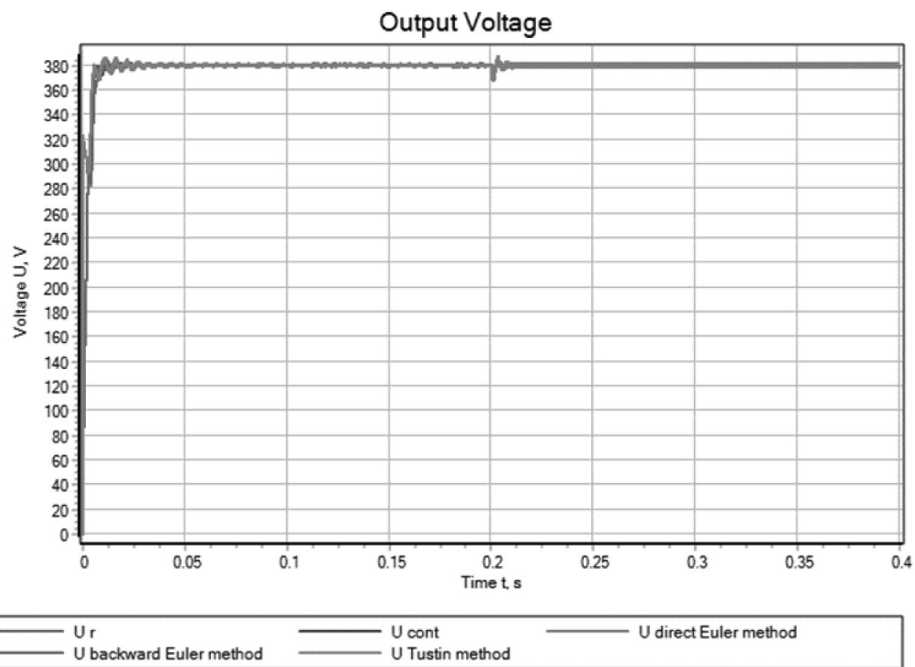
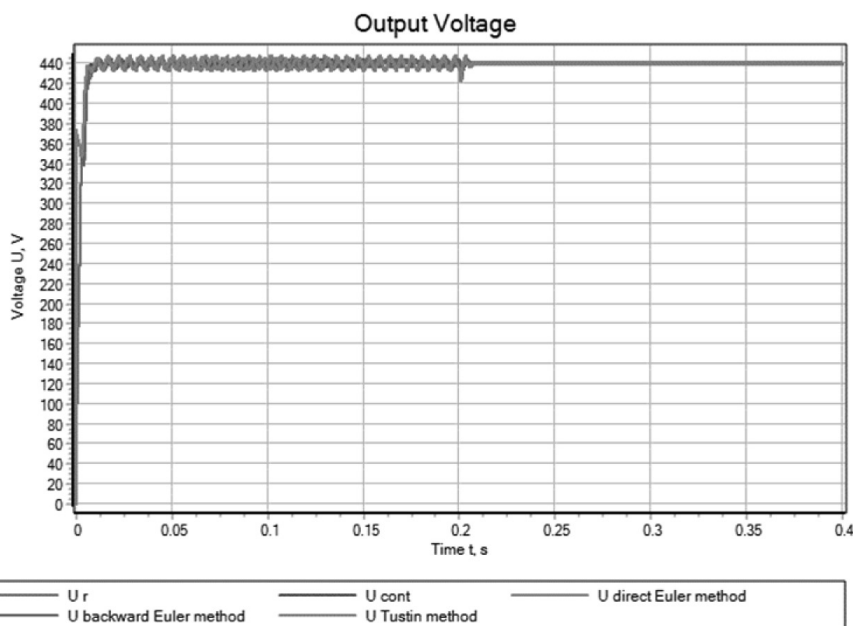


Рис. 10. Задание выходного напряжения 380 В  
 Fig. 10. Setting the output voltage to 380 V





**Рис. 11.** Задание выходного напряжения 440 В  
**Fig. 11.** Setting the output voltage to 440 V

Разработанные регуляторы были спроектированы так, чтобы время переходного процесса составляло 0,005 секунды. Фактическое время переходных

процессов представлено на рисунках 6-11, для напряжения – в таблице 4.

Время переходных процессов

Таблица 4

Table 4

Transient times

Непрерывная система, сек	0,0044	0,005	0,0049	0,0052	0,0054	0,0055
Прямой метод Эйлера, сек	0,0065	0,0056	0,0042	0,0048	0,0052	0,0052
Обратный метод Эйлера, сек	0,0044	0,005	0,0049	0,005	0,0054	0,0056
Метод Тустена, сек	0,0042	0,0042	0,0039	0,004	0,0044	0,0042

Из таблицы 4 видно, что наибольшим быстродействием обладает система с регулятором, модифицированным методом Тустена, который на всем диапазоне напряжения установки реализует наиболее быстрый переходной процесс, а наихудшей динамикой обладает регулятор, рассчитанный по прямому методу Эйлера. Непрерывный регулятор и регулятор, рассчитанный методом обратного преобразования Эйлера, обладают идентичными динамическими показателями.

При применении всех типов рассмотренных регуляторов наблюдается затухающий колебательный

процесс, но во всех случаях величина перерегулирования не выходит за границу 5 % ошибки регулирования. Из данного утверждения выбивается только один сценарий, представленный на рисунке 6, при задании напряжения в 140 В и увеличении мощности нагрузки до номинальной мощности в 60 кВт. В данном случае регулятор, спроектированный методом прямого преобразования Эйлера, выводит систему в автоматические колебания с недопустимым значением амплитуды, что говорит о том, что система с данным типом регулятора в этом случае будет неустойчивой.

## Заключение

В данной статье был представлен метод разработки двухконтурной системы стабилизации напряжения для преобразователя постоянного напряжения, выполненного по схеме buck преобразователя. Данный алгоритм предлагает учесть в системе управления нелинейность объекта путем использования регуляционной кривой и вычисления на её основе первого члена ряда Тейлора для контура стабилизации тока преобразователя. На основе этого был определён непрерывный регулятор для проектируемой системы, а также его модифицированные версии для цифровых регуляторов. Был проведен анализ работы рассматриваемых четырёх регуляторов. Данный анализ показал,

что глобально между регуляторами нет отличий, кроме того, что регулятор, модифицированный методом Тустена, имеет наибольшее быстродействие по сравнению со всеми остальными – от 26 % до 55 %, а регулятор, рассчитанный методом прямого преобразования Эйлера, имеет худшее быстродействие. Также необходимо отметить возникновение неустойчивости при использовании регулятора, модифицированного прямым методом Эйлера при сочетании задания низкого напряжения и номинального значения мощности. Исходя из этого, наиболее удачным регулятором является регулятор, модифицированный методом Тустена.

## Список литературы

- [1]. A. El-Shahat and S. Sumaiya. «DC-Microgrid System Design, Control, and Analysis», *Electronics*, vol. 8, no. 2, p. 124, Jan. 2019, doi: 10.3390/electronics8020124.
- [2]. D. E. Olivares et al. «Trends in Microgrid Control» *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905-1919, 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2295514.
- [3]. S. A. Gorji, H. G. Sahebi, M. Ektesabi and A. B. Rad. «Topologies and Control Schemes of Bidirectional DC-DC Power Converters: An Overview». *IEEE Access*, vol. 7, pp. 117997-118019, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2937239.
- [4]. B. E. Noriega, R. T. Pinto, and P. Bauer. «Sustainable DC-microgrid control system for electric-vehicle charging stations» in 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2013, pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2013.6634620.
- [5]. A. Alfergani, A. Khalil, and Z. Rajab. «Networked control of AC microgrid» *Sustain. Cities Soc.*, vol. 37, pp. 371-387, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.scs.2017.11.010.
- [6]. N. Tomin et al. «Design and optimal energy management of community microgrids with flexible renewable energy sources». *Renew. Energy*, vol. 183, pp. 903-921, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2021.11.024.
- [7]. M. A. Hossain, H. R. Pota, M. J. Hossain, and A. M. O. Haruni. «Active power management in a low-voltage islanded microgrid». *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 98, pp. 36-47, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.11.019.
- [8]. Y. Pan, S. Mei, F. Liu, W. Wei, C. Shen, and J. Hu, «Admissible Region of Large-Scale Uncertain Wind Generation Considering Small-Signal Stability of Power Systems». *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 1611-1623, 2016, doi: 10.1109/TSTE.2016.2570286.
- [9]. X. Lu, J. M. Guerrero, K. Sun, and J. C. Vasquez. «An Improved Droop Control Method for DC Microgrids Based on Low Bandwidth Communication With DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy». *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 4, pp. 1800-1812, 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2266419.
- [10]. S. Hamasaki, R. Mukai, and M. Tsuji. «Control of power leveling unit with super capacitor using bidirectional buck/boost DC/DC converter» in 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2012, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICRERA.2012.6477316.
- [11]. P. O. Kriett and M. Salani. «Optimal control of a residential microgrid». *Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 321-330, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.03.049.
- [12]. Y. Xue, C. Zhang, F. Jiang, W. Dou, H. Zhang and C. Yang. «Optimal capacity allocation method of integrated energy system considering renewable energy uncertainty». *Front. Energy Res.*, vol. 10, 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.1016756.
- [13]. N. D. Bhat, D. B. Kanse, S. D. Patil, and S. D. Pawar. «DC/DC Buck Converter Using Fuzzy Logic Controller» in 2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), 2020, pp. 182-187. doi: 10.1109/ICCES48766.2020.9138084.
- [14]. W. J. Gil-González, O. D. Montoya, A. Garces, F. M. Serra, and G. Magaldi. «Output Voltage Regulation For DC-DC Buck Converters: a Passivity-Based PI Design» in 2019 IEEE 10th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS), 2019, pp. 189-192. doi: 10.1109/LASCAS.2019.8667557.
- [15]. T. K. Roy, M. F. Pervej, F. K. Tumpa, and L. C. Paul. «Nonlinear adaptive controller design for velocity control of a DC motor driven by a DC-DC buck converter using backstepping approach» in 2016 2nd International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering (ICECTE), 2016, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICECTE.2016.7879598.
- [16]. O. D. Montoya Giraldo, A. Garcés Ruiz, I. Ortega Velázquez, and G. R. Espinosa Pérez. «Passivity-Based Control for Battery Charging/Discharging Applications by Using a Buck-Boost DC-DC Converter» in 2018 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), 2018, pp. 89-94. doi: 10.1109/GreenTech.2018.00025.
- [17]. P. Omer, J. Kumar, and B. S. Surjan, «Design



of robust PID controller for Buck converter using Bat algorithm» in 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853209.

[18]. M. Rezkallah, A. Chandra, B. Singh, and S. Singh, «Microgrid: Configurations, Control and Applications». IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 2, pp. 1290-1302, 2019, doi: 10.1109/TSG.2017.2762349.

[19]. J. M. Blanes, R. Gutiérrez, A. Garrigós, J. L. Lizán, and J. M. Cuadrado. «Electric Vehicle Battery Life Extension Using Ultracapacitors and an FPGA Controlled Interleaved Buck-Boost Converter». IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 12, pp. 5940-5948, 2013, doi: 10.1109/TPEL.2013.2255316.

[20]. A. K. Podder et al. «Feasibility Assessment of Hybrid Solar Photovoltaic-Biogas Generator Based Charging Station: A Case of Easy Bike and Auto Rickshaw Scenario in a Developing Nation». Sustainability, vol. 14, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14010166.

[21]. A. S. Al-Araji. «Development of an On-Line Self-Tuning FPGA-PID-PWM Control Algorithm Design for DC-DC Buck Converter in Mobile Applications». J. Eng., vol. 23, no. 8, Art. no. 8, Jul. 2017, doi: 10.31026/j.eng.2017.08.07.

[22]. M. Jang, M. Ciobotaru and V. G. Agelidis. «Design and Implementation of Digital Control in a Fuel Cell System». IEEE Trans. Ind. Inform., vol. 9, no. 2, pp. 1158-1166, 2013, doi: 10.1109/TII.2012.2221724.

[23]. L. V. Bellinaso, H. H. Figueira, M. F. Basquera, R. P. Vieira, H. A. Gründling and L. Michels. «Cascade Control With Adaptive Voltage Controller Applied to Photovoltaic Boost Converters». IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 55, no. 2, pp. 1903-1912, 2019, doi: 10.1109/TIA.2018.2884904.

[24]. J. -H. Lee et al. «Auxiliary Switch Control of a Bidirectional Soft-Switching DC/DC Converter». IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 12, pp. 5446-5457, 2013, doi: 10.1109/TPEL.2013.2254131.

[25]. V. -D. Andries, L. Goras, E. David, A. Buzo and G. Pelz. «On the Pole-Placement Technique for the Design of a DC-DC Buck Converter Discrete PID Control» in 2020 23rd International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS), 2020, pp. 1-4. doi: 10.1109/DDECS50862.2020.9095562.

[26]. J. Wang, S. Li, J. Fan and Q. Li. «Nonlinear disturbance observer based sliding mode control for PWM-based DC-DC boost converter systems» in The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC), 2015, pp. 2479-2484. doi: 10.1109/CCDC.2015.7162338.

[27]. M. M. Peretz and S. Ben-Yaakov. «Time-Domain Design of Digital Compensators for PWM DC-DC Converters». IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 1, pp. 284-293, Jan. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2160358.

[28]. S. M. Ghamari, F. Khavari and H. Molaei. «Adaptive backstepping controller design for DC/DC buck converter optimised by grey wolf algorithm».

IET Energy Syst. Integr., vol. n/a, no. n/a, doi: 10.1049/esi2.12098.

[29]. K. E. Dagher. «Modified Elman Neural-PID Controller Design for DC-DC Buck Converter System Based on Dolphin Echolocation Optimization». Al-Khwarizmi Eng. J., vol. 14, no. 3, Art. no. 3, Sep. 2018, doi: 10.22153/kej.2018.01.009.

[30]. N. Ghanbari, P. M. Shabestari, A. Mehrizi-Sani and S. Bhattacharya. «State-Space Modeling and Reachability Analysis for a DC Microgrid» in 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2019, pp. 2882-2886. doi: 10.1109/APEC.2019.8721914.

[31]. Y. Pan, L. Chen, X. Lu, J. Wang, F. Liu and S. Mei. «Stability Region of Droop-Controlled Distributed Generation in Autonomous Microgrids». IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 2, pp. 2288-2300, 2019, doi: 10.1109/TSG.2018.2849084.

[32]. A. Chadha and M. K. Kazimierczuk. «Small-Signal Modeling of Open-Loop PWM Tapped-Inductor Buck DC-DC Converter in CCM». IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 68, no. 7, pp. 5765-5775, Jul. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.2996157.

[33]. Y. Li, Y. Peng and X. Wang. «Seamless switching power sharing control method in a hybrid DC-AC microgrid by the isolated two-stage converter based on SST». IET Power Electron., vol. 14, no. 7, pp. 1384-1396, 2021, doi: 10.1049/pel2.12135.

[34]. V. Yousefzadeh, A. Babazadeh, B. Ramachandran, E. Alarcon, L. Pao and D. Maksimovic. «Proximate Time-Optimal Digital Control for Synchronous Buck DC-DC Converters». IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, no. 4, pp. 2018-2026, 2008, doi: 10.1109/TPEL.2008.924843.

[35]. S. -K. Kim and C. K. Ahn. «Proportional-Derivative Voltage Control With Active Damping for DC/DC Boost Converters via Current Sensorless Approach». IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs, vol. 68, no. 2, pp. 737-741, 2021, doi: 10.1109/TCSII.2020.3008432.

[36]. S. D. Gadekar and M. Murali. «Optimizing Electric Vehicle Charging with Moth Flame Control Algorithm of Boost-KY Converter». Probl. Reg. Energ., no. 4 (60), pp. 126-140, 2023, doi: 10.52254/1857-0070.2023.4-60.10.

[37]. M. S. Reza et al. «Optimal Algorithms for Energy Storage Systems in Microgrid Applications: An Analytical Evaluation Towards Future Directions». IEEE Access, vol. 10, pp. 10105-10123, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3144930.

[38]. A. Elserougi, I. Abdelsalam, A. Massoud and S. Ahmed. «A Non-Isolated Hybrid-Modular DC-DC Converter for DC Grids: Small-Signal Modeling and Control». IEEE Access, vol. 7, pp. 132459-132471, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2941249.

[39]. C. -Y. Wang, Y. -C. Ou, C. -F. Wu and M. -T. Shiue. «A voltage-mode DC-DC buck converter with digital PID controller» in 2015 12th International

al Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2015, pp. 2322-2326. doi: 10.1109/FSKD.2015.7382315.

[40]. D. P. Nam, B. M. Thang and N. T. Thanh. «Adaptive Tracking Control for a Boost DC-DC Converter: A Switched Systems Approach» in 2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), 2018, pp. 702-705, doi: 10.1109/GTSD.2018.8595580.

[41]. Y. I. Son and I. H. Kim. «Complementary PID Controller to Passivity-Based Nonlinear Control of Boost Converters With Inductor Resistance». IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 20, no. 3, pp. 826-834, 2012, doi: 10.1109/TCST.2011.2134099.

[42]. K. Sakai and Y. Ishida. «An Improved Anti-windup Control Using a PI Controller» in 2015 3rd International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation (AIMS), Dec. 2015, pp. 197-201. doi: 10.1109/AIMS.2015.39.

[43]. D. Kotin and I. Ivanov. «The Stable Operation Analysis of the DC Converter System into a Microgrid System, Taking into Account the Parameters of the Energy Source and the Own Parameters of the DC Convert-

er». Preprints, Dec. 09, 2022. doi: 10.20944/preprints202212.0173.v1.

[44]. D. Kotin and I. Ivanov. «Research and Analysis of Stable Operation Mode of Generating Unit for Autonomous Consumer in Microgrid System». Rochester, NY, Jun. 29, 2022. doi: 10.2139/ssrn.4149515.

[45]. D. A. Kotin and I. A. Ivanov. «Investigation of the Stability and Frequency Properties of a Generating Complex when Operating on an Autonomous Load» in PROCEEDINGS OF THE 2021 15TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC-TECHNICAL CONFERENCE ON ACTUAL PROBLEMS OF ELECTRONIC INSTRUMENT ENGINEERING, APEIE 2021, Novosibirsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 190-195. doi: 10.1109/APEIE52976.2021.9647494.

[46]. I. Ivanov and D. Kotin. «DETERMINATION OF UNSTABLE AREA OPERATION OF DC/DC CONVERTER IN POWER SUPPLY SYSTEM OF AN AUTONOMOUS CONSUMER», vol. 16, no. 1, 2024.

[47]. D. Maksimovic and R. Zane. «Small-Signal Discrete-Time Modeling of Digitally Controlled PWM Converters». IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 6, pp. 2552-2556, 2007, doi: 10.1109/TPEL.2007.909776.

*Транслитерация по BSI*





## АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

## ATOMIC ENERGY

АТОМНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ATOMIC-HYDROGEN ENERGY

Статья поступила в редакцию 05.03.24 Ред. Пер. № 379-003-24

The article has entered in publishing office 05.03.24 Ed. Reg. No 379-003-24

УДК 62-622:621.039

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ТОВАРНОГО ВОДОРОДА НА АЭС. СРАВНЕНИЕ С АВТОНОМНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

**Юрин В. Е., Егоров А. Н.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр

«Саратовский научный центр Российской академии наук»

410028, Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, 24,

тел. (845-2)27-14-36, факс (845-2)27-14-36, e-mail: www.ean@gmail.com, oepnan@inbox.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.042-056

Заключение совета рецензентов: 14.03.24 Заключение совета экспертов: 20.03.24 Принято к публикации: 29.03.24

В связи с увеличением доли энерговыработки атомных электростанций и появлением новых требований системного оператора Единой энергетической системы (ЕЭС) РФ встает вопрос о повышении эффективности работы АЭС на переменном режиме. При этом работа АЭС экономически целесообразна с максимальным коэффициентом использования установленной мощности по причине значительных капиталовложений при низкой цене на ядерное топливо. Возможным решением регулирования отпускаемой электроэнергии во внепиковые часы энергопотребления является направление ее избытка на производство водорода с дальнейшей его реализацией потребителям без уменьшения мощности энергоблока АЭС. Согласно проведенному анализу, большинство предприятий, являющихся потенциальными потребителями водорода с АЭС, имеют собственные модульные установки для его производства. В работе проведен сравнительный анализ централизованного производства водорода на АЭС и на местах его потребления. Суточный период производства водорода на АЭС ограничен ночным периодом, когда есть избыток генерирующих мощностей в энергосистеме. При этом местное производство водорода может осуществляться равномерно в течение суток. Это приводит к удорожанию производства водорода на АЭС за счет более объемной системы хранения и увеличения числа компрессорных и электролизных установок. Для АЭС потребуются значительные затраты на транспортировку генерируемого газа. При этом фактором преимущества АЭС становится стоимость потребляемой электроэнергии, принятой на уровне себестоимости ее производства. Для промышленных потребителей тариф на электроэнергию значительно выше. В работе проведена сравнительная оценка себестоимости производства водорода на АЭС и на месте его потребления с учетом диапазона системных условий. Дополнительно принята сбытовая надбавка к себестоимости произ-

Юрин В. Е., Егоров А. Н. Исследование эффективности производства товарного водорода на АЭС. Сравнение с автономным производством малой мощности // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 03(420) 2024, с. 42-56

Yurin V. E., Egorov A. N. Investigation of the efficiency of commercial hydrogen production at NPP. Comparison with autonomous low capacity production // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 03(420) 2024, pp. 42-56



водства водорода на АЭС. Выделены зоны конкурентной эффективности реализации водородного комплекса на АЭС, в которых производство водорода на месте его потребления требует больших затрат, чем покупка товарного водорода с АЭС. На основе определенного конкурентного диапазона сбытовой надбавки к цене продажи водорода на АЭС и принятых исходных условий проведена оценка накопленного чистого дисконтированного дохода и срока окупаемости установки по производству водорода при его реализации на АЭС на продажу.

**Ключевые слова:** атомная энергетика, водородная энергетика, электролиз, транспорт водородного топлива, коэффициент использования установленной мощности, технико-экономическая эффективность, себестоимость.

## INVESTIGATION OF THE EFFICIENCY OF COMMERCIAL HYDROGEN PRODUCTION AT NPP. COMPARISON WITH AUTONOMOUS LOW CAPACITY PRODUCTION

*Yurin V. E., Egorov A. N.*

Federal state budgetary institution federal research centre  
«Saratov scientific centre of the Russian academy of sciences»  
st. Rabochaya, 24, Saratov, Russia, 410028,

tel. (845-2)27-14-36, fax (845-2)27-14-36, e-mail: [www.ean@gmail.com](mailto:www.ean@gmail.com), [oepran@inbox.ru](mailto:oepran@inbox.ru)

*doi: 10.15518/isjaee.2024.03.042-056*

Referred: 14.03.24

Received in revised form: 20.03.24

Accepted: 29.03.24

The increase in the share of energy output from nuclear power plants and the emergence of new requirements of the system operator of the Unified Energy System (UES) of the Russian Federation raise the question of increasing the efficiency of nuclear power plants in alternating mode. At the same time, the operation of nuclear power plants is economically feasible with a maximum utilization rate of installed capacity due to significant capital investments and the low price of nuclear fuel. A possible solution to regulating the level of supplied electricity during off-peak hours of energy consumption is to direct its excess to produce hydrogen with its further sale to consumers without reducing the power of the power unit. According to the analysis, most enterprises that are potential consumers of hydrogen from nuclear power plants have their own modular installations for its production. In the work, a comparative analysis of centralized hydrogen production at nuclear power plants and hydrogen production at places of its consumption was carried out. The daily period of hydrogen production at nuclear power plants is limited to the night period, when there is an excess of generating capacity in the energy system. In this case, local hydrogen production can be carried out evenly throughout the day. This leads to an increase in the cost of hydrogen production at nuclear power plants due to a larger storage system and an increase in the number of compressor and electrolysis units. Nuclear power plants will require significant costs to transport the generated gas. At the same time, the advantage of a nuclear power plant is the cost of consumed electricity, taken at the level of the cost of its production. For industrial consumers, the electricity tariff is significantly higher. In the work, a comparative assessment of the cost of hydrogen production at nuclear power plants and at the site of its consumption was carried out taking into account a range of system conditions. A sales premium to the cost of hydrogen production at nuclear power plants was additionally adopted. Zones of competitive efficiency in the implementation of the hydrogen complex at nuclear power plants have been identified, in which the production of hydrogen at the site of its consumption requires greater costs than the purchase of commercial hydrogen from nuclear power plants. Based on the competitive range of the sales premium to the selling price of hydrogen at nuclear power plants and the accepted initial conditions, an assessment of the accumulated net present value and payback period of the hydrogen production plant was carried out during its production at nuclear power plants for sale.

**Keywords:** nuclear energy, hydrogen energy, electrolysis, hydrogen fuel transport, installed capacity utilization factor, technical and economic efficiency, cost.







Юрин  
Валерий Евгеньевич  
Yurin  
Valeriy Evgenievich

**Сведения об авторе:** доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук».

**Образование:** Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина, 2012 г.

**Область научных интересов:** энергетические системы на органическом топливе, водородная энергетика, ядерная и радиационная безопасность, тепловые аккумуляторы.

**Публикации:** 105

**Author information:** doctor of technical science in Engineering, Leading Researcher at Institution Federal Research Centre «Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences»

**Education:** Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 2012.

**Research area:** energy systems on organic fuel, hydrogen energy, nuclear and radiation safety, heat accumulators.

**Publications:** 105



Егоров  
Александр Николаевич  
Egorov  
Aleksandr Nicolaevich

**Сведения об авторе:** кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук».

**Образование:** Саратовский государственный технический университет, 2010 г.

**Область научных интересов:** водородная энергетика, атомная энергетика, энерго- и ресурсосберегающие, экологически чистые химико-технологические процессы, моделирование технических систем, термодинамические процессы в технических системах, процессы тепло- и массообмена, возобновляемые источники и системы прямого преобразования энергии.

**Публикации:** 95

**Author information:** Ph.D. in Engineering, Senior Researcher at Institution Federal Research Centre «Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences».

**Education:** Saratov State Technical University, 2010.

**Research area:** hydrogen energy, nuclear energy, energy resources savings, ecological clean and chemical-technological processes, modeling of technical systems, thermodynamics processes in technical systems, processes thermal and mass exchange, renewable and systems of direct transform energy.

**Publications:** 95

## Введение

Согласно Энергетической стратегии РФ на период до 2035 г., атомные станции будут обязаны участвовать в регулировании неравномерности суточного энергопотребления в Единой энергетической системе (1). Работа АЭС на пониженном режиме приведет к снижению конкурентоспособности атомных электростанций ввиду их экономически целесообразной работы с максимальным коэффициентом использования установленной мощности по причине значительных капиталовложений при низкой цене на ядерное топливо, в связи с чем АЭС предпочтительнее эксплуатировать на базовой нагрузке (рис. 1).

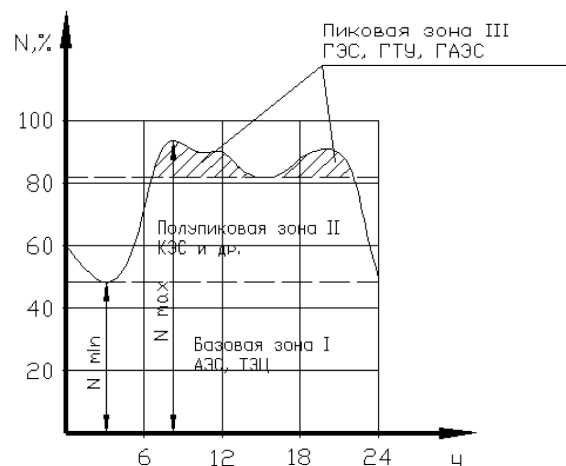


Рис. 1. Типовой график нагрузки сети с выделением рабочих зон

Fig. 1. Typical network load diagram with highlighting work zones

Однако в связи с увеличением доли энерговыработки АЭС и появлением новых требований системного оператора ЕЭС РФ, появляется необходимость поиска эффективных решений работы АЭС на переменном режиме. В данной работе предлагается вариант регулирования отпускаемой электроэнергии во внепиковые часы нагрузки путем направления ее избытка на производство водорода методом электролиза с дальнейшей его реализацией потребителям. Ранее был выполнен, в том числе авторами статьи, цикл работ по исследованию использования водорода в энергетике, в том числе на АЭС для повышения параметров свежего пара или генерации дополнительного количества пара с целью выработки дополнительной электроэнергии в часы повышенной нагрузки энергопотребления [2-5]. Однако использование водородно-

го топлива на АЭС влечет за собой весомые затраты на обеспечение безопасности станции, обоснование которой при работе с водородным комплексом является сложной и актуальной проблемой [6-7]. В связи с этим в настоящей статье рассматривается продажа водородного топлива, полученного на АЭС методом электролиза, стороннему потребителю. Это исследование важно и для полного понимания экономической эффективности водородного энергокомплекса, так как водород может производиться в количестве, превосходящем потребности энергокомплекса, а избыток может продаваться потребителям, что позволит значительно снизить удельные затраты в водородный комплекс благодаря укрупнению производства. При этом энергоблоки АЭС продолжают работу с постоянной нагрузкой.

### Список обозначений

#### Буквы русского алфавита

ЕЭС	Единая энергетическая система
ФИЦ СНЦ РАН	Федеральный исследовательский центр «Саратовский научный центр Российской академии наук»
АЭС	Атомная электростанция
ТВК	Товарный водородный комплекс
КЭС	Конденсационная электростанция
ТЭЦ	Теплоэлектроцентраль
ГЭС	Гидроэлектростанция
ГТУ	Газотурбинная установка
ГАЭС	Гидроаккумулирующая электростанция
АО	Акционерное общество
г.	Город
БА	Бак-аккумулятор
ПГ	Парогенераторы
ПАО	Публичное акционерное общество
НПЗ	Нефтеперерабатывающий завод
ООО	Общество с ограниченной ответственностью
ВСГ	Водородсодержащий газ
ЭУ	Электролизная установка
ФВ	Ф – фильтропрессорный, В – водородный
М	Модернизированный
ОАО	Открытое акционерное общество
СПП	Сепаратор и промежуточный пароперегреватель
СЭУ	Стационарная электролизная установка

НЧДД	Накопленный чистый дисконтированный доход
Буквы латинского алфавита	
$H_2$	Водород
$O_2$	Кислород
SR	separator and reheater
SG	steam generators
LOHC	Liquid organic hydrogen carriers
Размерности	
м	метр
с	секунда
км	километр
Долл. (\$)	доллар
сут	сутки
т	тонна
кг	килограмм
$^{\circ}C$	градус Цельсия
мм	миллиметр
A	ампер
B	вольт
ч (h)	час
г.	год
млн	миллион
кВт (kW)	киловатт
руб. (rub.)	рубль
тыс.	тысяча
%	процент
МВт (MW)	мегаватт
МПа	мегапаскаль
м <sup>3</sup>	кубический метр



## 1. Потребители водорода на примере Саратовской области

В рамках статьи был проведен укрупненный анализ предприятий Саратовской области – потенциальных потребителей водорода в регионе. Регион выбран по причине расположения в нем Балаковской атомной

станции и ряда крупных промышленных предприятий, наибольшая концентрация которых находится в г. Балаково и г. Саратов. Полученные данные представлены в таблице 1.

Потребители водорода в Саратовском регионе

Таблица 1

Table 1

Hydrogen consumers in the Saratov region

Наименование организации	Расположение	Описание	Применение
Металлургический завод «Электросталь»	г. Балаково	«Электросталь» является одним из основных поставщиков исходных заготовок для производства лопаток, дисков, валов и колец для газотурбинных двигателей	Водород используется при получении металлургического сырья прямым восстановлением железа [8]
Балаковский филиал АО «Апатит»	г. Балаково	Специализируется на производстве фосфорсодержащих удобрений (один из лидеров по объемам выпуска в Европе) и кормовых фосфатов (один из лидеров по объемам выпуска в России кормового монокальцийфосфата)	Водород используется при производстве аммиака и азотсодержащих удобрений [9]
Балашовский текстильный комбинат – АО «Балтекс»	г. Балашов	Производит ткани синтетические и смесовые. В настоящее время ООО «Балтекс» является предприятием, специализирующимся на выпуске капроновых тканей и полиамидных нитей [11]	Водород используется при производстве полиамидных нитей
ООО «Саратоворгсинтез»	г. Саратов	Нефтехимическое предприятие, ведущий производитель нитрила акриловой кислоты, ацетонитрила и цианида натрия в России [12-13]	Водород используется при производстве продукции
ПАО «Саратовский НПЗ»	г. Саратов	Нефтеперерабатывающий завод, специализирующийся на выпуске неэтилированных бензинов, дизельного топлива, мазута всех основных марок, битума, вакуумных газойлей, технической серы [14]	Водород необходим при гидрокрекинге нефтяных фракций. На большинстве промышленных установок гидрокрекинга концентрация циркулирующего ВСГ поддерживается на уровне 80-85 %
АО «Саратовстройстекло»	г. Саратов	Один из основных производителей листового стекла в России [15]	Водород используется при создании восстановленной атмосферы при производстве стекла и кварца [16]
Саратовский резервуарный завод	г. Саратов	Предоставляет услуги: проектирование и производства емкостного оборудования, монтаж и сдача в эксплуатацию резервуарных парков под хранение и перевалку различных типов сред, инженерные изыскания, а также создание и внедрение систем автоматизации для производств [17]	Водород используется при сварке ответственного оборудования
Саратовский Жировой Комбинат	г. Саратов	Выпускает маргариновую продукцию и промышленные жиры, хозяйственное мыло. Является одним из крупнейших производителей отрасли в стране [18]	Водород используется при производстве продукции
Российские Железные Дороги	–	Российская государственная компания – владелец инфраструктуры общего пользования и крупнейший перевозчик Российской сети железных дорог [19-20]	Водород планируется к использованию в качестве топлива для поезда на базе рельсового автобуса [21]



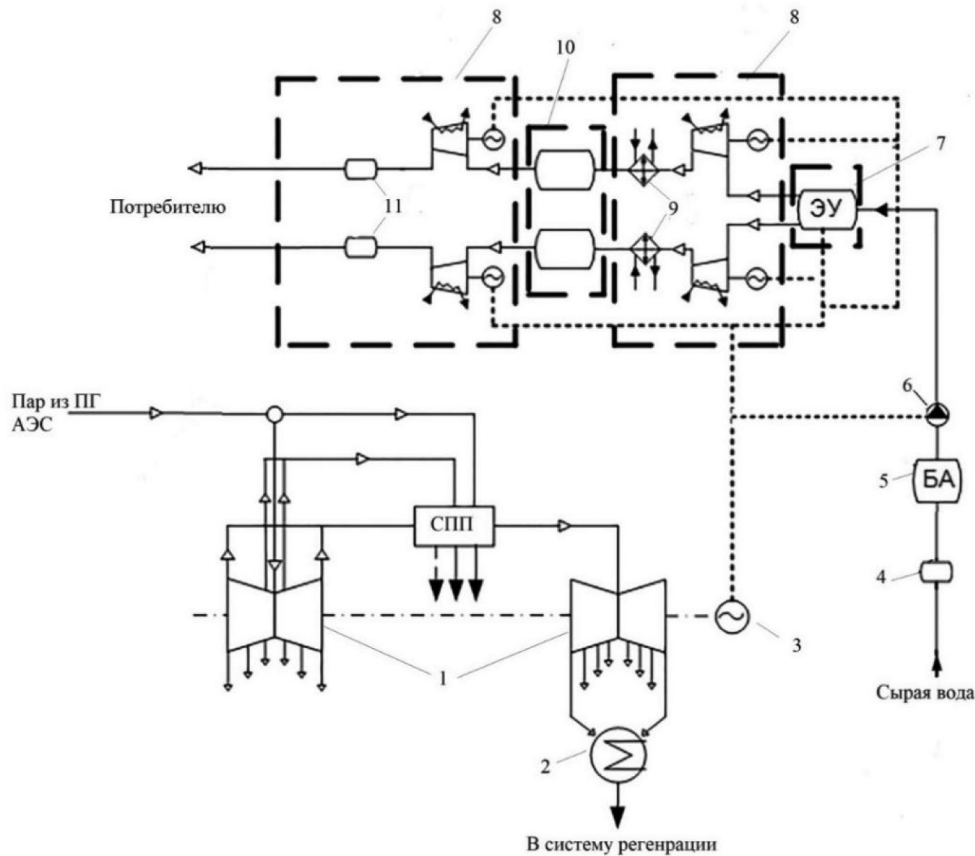
Стоит отметить, что электролиз позволяет получить водород высокой чистоты и на основе предварительного анализа должен удовлетворять требованиям представленных в таблице 1 предприятий и многих прочих производственных процессов. Однако

дальнейшее развитие вопроса создания водородной инфраструктуры в конкретном регионе требует взаимодействия с конкретными потребителями с уточнением требований к поставляемому водороду.

## 2. Производство водорода на АЭС

Авторами была предложена схема комбинирования АЭС с товарным водородным комплексом (ТВК) с целью производства водородного топлива на прода-

жу или для генерации дополнительной электроэнергии. Схема установки по производству водорода на базе АЭС приведена на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема комбинирования АЭС с ТВК: 1 – паровая турбина АЭС; 2 – конденсатор; 3 – электрогенератор; 4 – система химводоочистки; 5 – бак-аккумулятор (БА); 6 – электронасос; 7 – система электролиза воды; 8 – система компримирования водорода и кислорода; 9 – концевые охлаждающие теплообменники; 10 – система хранения водорода и кислорода на основе емкостей; 11 – промежуточные емкости водорода и кислорода; СПП – сепаратор с промежуточным перегревателем; ЭУ – электролизная установка; ПГ АЭС – парогенераторы АЭС

**Fig. 2.** Scheme of combining a nuclear power plant with a commercial hydrogen complex: 1 – steam turbine of the nuclear power plant unit; 2 – capacitor; 3 – electric generator; 4 – chemical water treatment system; 5 – storage tank; 6 – electric pump; 7 – electrolysis installation; 8 – hydrogen and oxygen compression system; 9 – end cooling heat exchangers; 10 – hydrogen and oxygen storage system; 11 – intermediate tanks of hydrogen and oxygen; SR – separator and reheater; SG – steam generators

Сырая вода направляется в систему химводоочистки 4, где очищается до необходимого качества, затем направляется в бак-аккумулятор 5, откуда подается на систему электролиза воды 7. В электролизере происходит процесс электролиза воды – процесс образования водорода и кислорода на катодах и анодах электролизера под действием электрического тока, забираемого с шин электрогенератора АЭС 3. После чего поток разделяется на водород и кислород и на-

правляется в систему компримирования 8, где газы сжимаются и охлаждаются до необходимой температуры (для уменьшения удельного объема). Потом газы попадают в систему хранения 10, где находятся до реализации. В случае необходимости передачи водорода или кислорода потребителю, газы из 10 подаются на компрессоры, а затем на промежуточные емкости 11, после чего могут быть реализованы потребителю.



### 3. Электролизные установки для получения водорода

Согласно проведенному анализу, большинство предприятий имеет тенденцию на приобретение модульных установок для производства водорода непосредственно на своей территории [12, 18, 22-23]. В работе проведен сравнительный анализ производства водорода на АЭС и непосредственно на предприятиях-потребителях водорода. На основе оценки

рынка проанализированы технические и стоимостные характеристики некоторых модульных установок. Рассматриваемые установки используют щелочной электролит, чистота получаемых газов не менее 98,5 %. Технические характеристики установок типа ФВ ОАО «Уралхиммаш» приведены в таблице 2 [24]:

Основные характеристики электролизных установок типа ФВ

Таблица 2

Main characteristics of FV type electrolysis plants

Table 2

Наименование показателей	ФВ-180	ФВ-250М	ФВ-500М
Мощность, кВт	1080	1470	3000
Рабочее давление, МПа	0,01	0,01	0,01
Рабочая температура, °С	85±5	85±5	85±5
Сила тока на электролизере, А	7500-8000	7800-8200	7800-8200
Напряжение на электролизере, В	120	180,4	365
Чистота газов, %			
водород	99,5	99,5	99,5
кислород	98,5	98,5	98,5
Производительность, м <sup>3</sup> /ч			
по водороду	172	260	536
по кислороду	86	130	268
Габаритные размеры, мм			
длина	5000	7950	13500
ширина	3410	3410	3400
высота	6380	6380	6380
Масса электролизера, кг	44600	59420	10136

Для АЭС принят вариант производства водорода на 10-ти установках ФВ-500М. Принято, что ТВК на АЭС работает в часы спада электрической нагрузки в течение 9 часов. Тогда количество ежесуточно генерируемого водорода составит – 6,127 т водорода в сутки. Комплекс работает 330 суток в году.

С целью проведения сравнительного анализа такое же количество генерируемого газа принято для вариантов производства водорода непосредственно у потребителя/-лей для вариантов: 1 потребитель – 6,127 т водорода; 15 потребителей по 0,408 т водорода у каждого. Продолжительность производства во-

дорода на месте потребления принята соответственно 22,5 и 20 ч. На реализацию различных технологических процессов по обслуживанию комплекса приняты соответственно 4 и 1,5 ч.

В альтернативном варианте производства того же количества водорода на месте его потребления у 15-ти потребителей требуется использование у каждого потребителя менее мощной электролизной установки. Для расчетов рассмотрена установка СЭУ-40 [25], основные характеристики которой представлены в таблице 3:

Основные характеристики электролизной установки СЭУ-40

Таблица 3

Main characteristics of the SEU-40 electrolysis plant

Table 3

Мощность, кВт	300
Сила тока, подводимая к электролизеру, А	1000
Напряжение на электролизере, В	200
Рабочее давление, МПа	1,0
Рабочая температура, °С	85±5
Чистота газов, %:	

водорода	99,7
кислорода	99,5
Производительность, м <sup>3</sup> /ч:	
водорода	41
кислорода	20,5
Габаритные размеры, мм	
длина	4100
ширина	1060
высота	1780
Масса электролизера, кг	7435

Тогда для производства такого же количества водорода, как на АЭС, будет достаточно 4-х установок ФВ-500М у одного потребителя, а для пятнадцати потребителей – трех электролизных установки типа СЭУ-40 на каждом производстве.

В настоящей работе кислород принят как побочный продукт, т.е. не идущий на продажу или на собственное производство. Соответственно, также не учитывались затраты на хранение, компримирование

и транспортировку кислорода. Учет кислорода как товарной продукции или производственного газа планируется в дальнейших исследованиях для диапазона системных условий, так как он производится вместе с водородом, как побочный продукт, и может быть также реализован на продажу при тех же затратах на электролизное оборудование и электроэнергию в процессе производства водорода.

#### 4. Транспортировка водорода

Одной из основных проблем реализации идеи централизованного производства водорода на АЭС является транспортировка до предприятия-потребителя. Основными видами транспортировки водорода являются: доставка газа с помощью транспорта (в том числе водного), по трубопроводу, располагающемуся вдоль сети действующих газопроводов природного газа, а также перемещение в криогенных цистернах в сжиженном виде [26-27]. Однако последний вариант трудно реализуем, поскольку, во-первых, температура кипения водорода составляет -252,9 °С, то есть его необходимо охладить практически до абсолютного нуля. Во-вторых, необходимо поддерживать данную температуру в течение всего времени транспортиров-

ки газа, что является очень энергоемким и весьма затратным процессом.

Работы [28-33] содержат анализ и технико-экономическую оценку различных методов транспортировки водорода, включая автоцистерны для жидкого водорода, трубчатые прицепы для газообразного водорода при различных уровнях давления в диапазоне от 250 до 540 бар и трубопроводный транспорт. Таким образом, стоит рассматривать транспортировку водорода по трубопроводу, либо земным или водным транспортом в баллонах. На рис. 3 [26] представлены графики нормированной стоимости транспортировки водорода по данным 2019 г. и прогнозируемая стоимость в 2030 г.

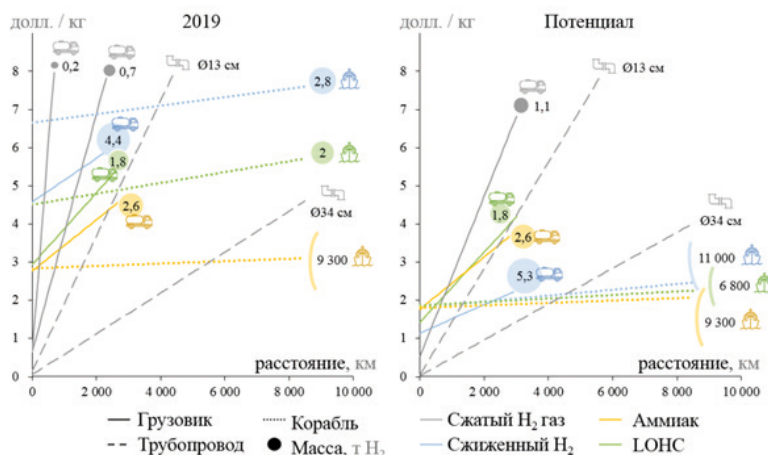


Рис. 3. Нормированная стоимость транспортировки водорода

Fig. 3. Levelized cost of hydrogen transportation

Как видно из рисунка 3, на данный момент в сжатом виде наиболее дешевая транспортировка водорода возможна по трубопроводу диаметром 13 см. При таких параметрах трубопровода скорость транспортируемого газообразного водорода требуемого объема не будет превышать 2 м/с при равномерном потреблении газа в течение суток, что удовлетворяет ГОСТ Р 55472-2019, СП 42-101-2003.

На основе исследования стоимости доставки водорода Аналитическим центром при правительст-

ве РФ [26], представленным на рис. 3, принято, что доставка водорода осуществляется через газопровод. Капиталовложения в газопровод рассчитывались на примере Балаковской АЭС. Длина газопроводов принята равной расстоянию от АЭС до города Балаково, т.е. 12,5 км. Удельная стоимость принимается равной 10000 руб./м, стоимость газопроводов учтена в итоговых капиталовложениях в ТВК. Затраты, согласно [26], составят 70 руб./кг (курс доллара принят 70 руб./долл.) или 15 млн руб. в год.

## 5. Капитальные вложения в системы производства водорода

На основе методики расчета, подробно изложенной в [34-36], с учетом вышеприведенных исходных данных, получены следующие результаты расчета капитальных вложений в основные элементы водо-

родного комплекса при установке на АЭС и на месте потребления водорода [37] (Таблица 4). Стоимость постройки зданий, доставки и монтажа материалов принята в размере 37 % от стоимости.

Капитальные вложения в основные элементы водородного комплекса, млн руб.

Таблица 4

Capital investments in the main elements of the hydrogen complex, million rubles

Table 4

Место производства H <sub>2</sub>	На АЭС	На месте потребления	
		1 потребитель	15 потребителей
Система компримирования водорода	10,41: 1. Закачка в систему хранения – 5,64 2. Прокатка по трубопроводу – 4,77	2,26	0,169
Система хранения водорода	28,42	9,47	0,632
Электролизные установки	1126 [21]	450,4 [21]	261,4 [21]
Газопровод	125	–	
<b>Всего</b>	<b>1290</b>	<b>462,2</b>	<b>262,2</b>

При этом учтено, что при производстве водорода на АЭС в часы снижения энергопотребления, за 9 ч потребуются обеспечить запас водорода, равный его суммарному объему, произведенному непосредственно на месте потребления. Это связано с тем, что, согласно разработанному способу, период производства водорода на АЭС ограничен ночным периодом, когда есть избыток генерирующих мощностей в энергосистеме. В то же время местное производство водорода может осуществляться равномерно в течение суток. Сравнение производств в равных условиях приводит к удорожанию ТВК на АЭС в сравнении с местным производством за счет более объемной системы хранения и увеличения числа компрессорных и электролизных установок. При этом, при реализации ТВК на

АЭС, запасенный водород может быть транспортирован равномерно в течение суток, что обеспечит аналогичные условия для конечного потребителя.

Годовые эксплуатационные затраты на АЭС, также найденные с использованием методики [34-36], составили 367,5 млн руб. Принято конечное давление транспортируемых газов 4,2 МПа, что является оптимальным для выбранных параметров газопровода. В данном случае применяются компрессорные установки типа 2ГМ4-20/42-161 и 2М16-20/42-161 [39]. Кроме того, прокатка водорода через трубопровод перед продажей конечному потребителю осуществляется в том числе с использованием дневной электроэнергии по соответствующему тарифу, что также увеличивает эксплуатационные затраты в ТВК.

## 6. Тарифы на электроэнергию

Для расчетов экономической эффективности реализации ТВК на АЭС, цена электроэнергии, используемой для производства водорода, принята равной ее себестоимости на АЭС. Себестоимость производства электроэнергии на АЭС на основе анализа энергетического рынка принята на уровне 1,9 руб./кВт·ч.

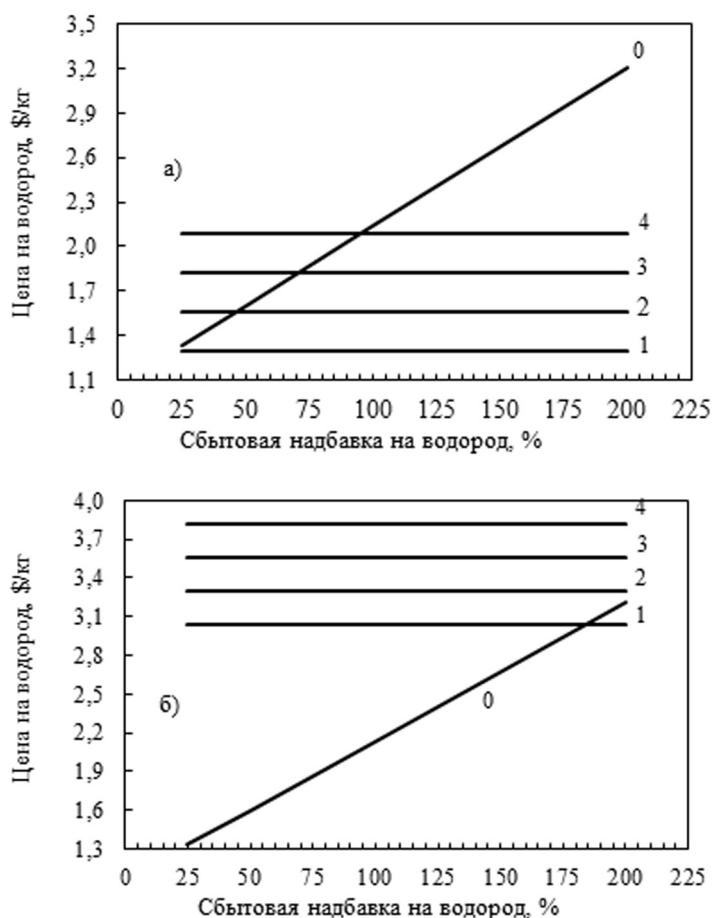
Среднесуточный тариф на электроэнергию для предприятий местного производства водорода принят в диапазоне 4-7 руб./кВт·ч [40]. Динамика полупикового тарифа принята на основе Прогноза Минэкономразвития России по долгосрочному социально-экономическому развитию РФ [41]. Норма дисконта принята равной 11,28 %.

## 7. Сравнительный экономический анализ способов производства водорода: централизованного на АЭС и местного непосредственно у потребителя

В качестве системы хранения водорода рассмотрены цилиндрические емкости со сферическими днищами объемом 100-800 м<sup>3</sup>. Учтены затраты на подготовку химочищенной воды, электролита и охлаждающей воды, а также на продувку азотом при производстве водорода.

Проведена сравнительная оценка себестоимости производства водорода на ТВК на АЭС и на месте его

потребления с учетом принятых условий. Дополнительно принята сбытовая надбавка к себестоимости производства водорода на АЭС, т.к. предполагается, что водород производится на АЭС на продажу с целью получения станцией дополнительной прибыли. Результаты оценки в зависимости от сбытовой надбавки к цене продажи водорода на АЭС представлены на рисунке 4:



**Рис. 4.** Стоимость водорода на одном предприятии (а) и на комплексе из пятнадцати предприятий (б) при покупке на АЭС (0) и при собственном производстве: 1, 2, 3, 4 – себестоимость производства водорода на месте его использования при среднесуточном тарифе на электроэнергию 4, 5, 6, 7 руб./кВт·ч, соответственно

**Fig. 4.** The cost of hydrogen at one enterprise (a) and at a complex of fifteen enterprises (b) when purchased at a nuclear power plant (0) and during its own production: 1, 2, 3, 4 – the cost of producing hydrogen at the site of its use at an average daily tariff for electricity 4, 5, 6, 7 rub./kWh, respectively



Из рисунка 4а были выделены зоны конкурентной эффективности реализации ТВК на АЭС, в которых производство водорода на месте его потребления у одного потребителя требует больших затрат, чем покупка товарного водорода с АЭС. При среднесуточном тарифе на электроэнергию 4 руб./кВт·ч, себестоимость водорода на месте его потребления оказывается ниже, чем цена при его покупке с АЭС. При среднесуточном тарифе на электроэнергию 5 / 6 / 7 руб./кВт·ч (зоны 1 / 2 / 3 на рис. 5а, соответственно) для потребителя покупка водорода на АЭС целесообразна при сбытовой надбавке до 47 / 71 / 96 %, соответственно.

Как видно из рисунка 4б, распределение производства водорода на несколько предприятий (что имеет место в реальной ситуации) существенно увеличивает себестоимость производства водорода на месте его использования в связи со значительным ростом удельных капиталовложений, в особенности, в электролизные установки при уменьшении объемов производства. При этом, на основе проведенного анализа производств, использующих водород, в реальности

будет значительно большее дробление на потребителей, которое логично усилит отрицательный эффект. Это значительно расширяет конкурентные преимущества производства товарного водорода на АЭС. Так, при среднесуточном тарифе на электроэнергию 4 руб./кВт·ч (зона 1 на рис. 5б, соответственно) покупка водорода на АЭС целесообразна при сбытовой надбавке до 185 % соответственно. При этом при среднесуточном тарифе на электроэнергию 5, 6 и 7 руб./кВт·ч покупка водорода на АЭС целесообразна при сбытовой надбавке более 200 %. Таким образом, даже при минимальном выбранном среднесуточном тарифе на электроэнергию, появляются условия для конкурентной эффективности реализации ТВК на АЭС.

На основе полученных диапазонов сбытовой надбавки к цене продажи водорода на АЭС и принятых исходных условий, проведена оценка накопленного чистого дисконтированного дохода (НЧДД) от реализации ТВК на АЭС за расчетный период 25 лет, а также определен срок окупаемости. Результаты представлены на рисунках 5 и 6:

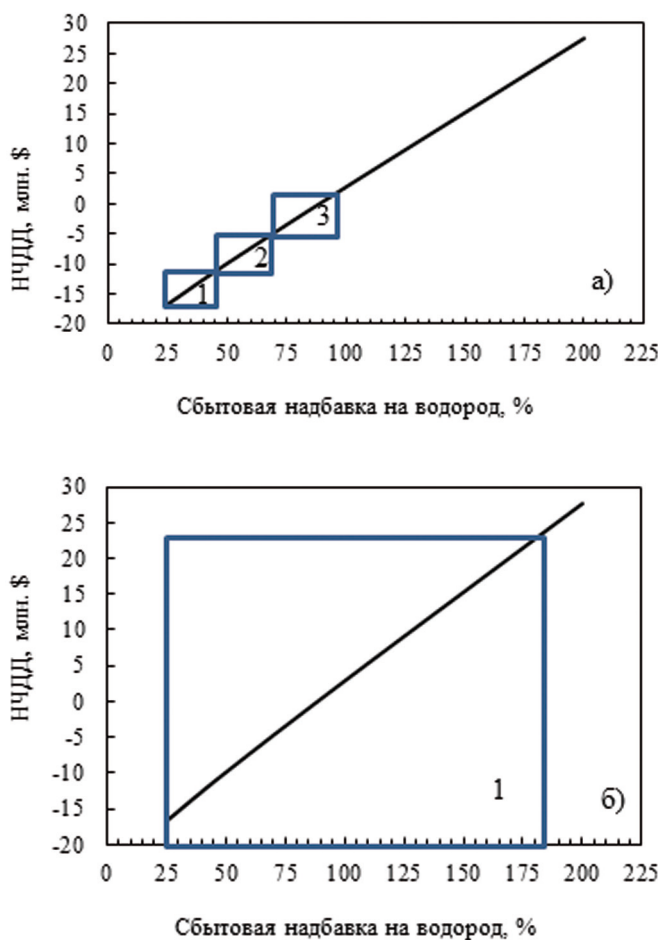
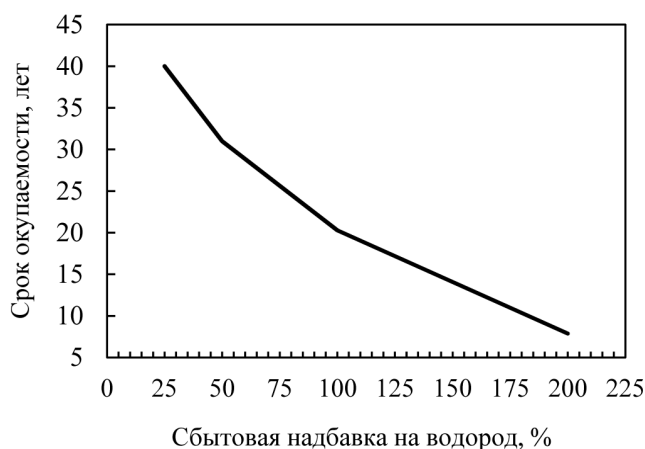


Рис. 5. НЧДД для ТВК на АЭС при сравнении с производством на 1-м предприятии (а) и на 15-ти предприятиях (б) 1, 2, 3 – зоны эффективности ТВК на АЭС

Fig. 5. Accumulated net present value for the commercial hydrogen complex at NPPs when compared with production at the 1 enterprise (a) and at 15 enterprises (b) 1, 2, 3 – efficiency zones of the commercial hydrogen complex at NPPs



**Рис. 6.** Срок окупаемости ТВК на АЭС  
**Fig. 6.** Payback period for commercial hydrogen complex at nuclear power plants

Как видно из рисунков 5 и 6, для принятых условий реализация ТВК на АЭС позволяет достичь НЧДД до 27,6 млн \$ при минимальном для выбранного диапазона анализа сроке окупаемости 7,9 лет при 200 % надбавке к стоимости водорода. При этом положительный НЧДД достигается при надбавке к стоимости водорода не менее 85 %. Дополнительно на рисунке 5 отмечены зоны эффективности АЭС, соответствующие сбытовой надбавке к цене водорода, при которой обеспечивается конкурентное преимущество перед производством водорода на месте его потребления.

Таким образом, полученные результаты пока-

зывают условия эффективности реализации ТВК на АЭС и зоны конкурентоспособности по сравнению с местным производством водорода. Методика и полученные результаты могут быть использованы для научного обоснования и дальнейшего развития технологий экологически чистого производства водорода на АЭС. Методика проведенного исследования позволяет потребителю водорода сравнить приобретение собственного оборудования для производства водорода с покупкой водорода на АЭС, а также позволяет потенциальному инвестору оценить целесообразность реализации производства водорода на АЭС.

### Заключение

Эффективным решением регулирования отпускаемой с атомных электростанций электроэнергии во внепиковые часы энергопотребления, является направление ее избытка на производство водорода с дальнейшей его реализацией потребителям без уменьшения тепловой мощности энергоблоков. В работе проведен сравнительный анализ трех вариантов: централизованного производства водорода на АЭС, а также на местах потребления для одного и пятнадцати потребителей при одинаковом объеме суммарного производства-потребления водорода. Получены результаты оценки себестоимости производства водорода на АЭС с учетом надбавки для продажи и на месте его потребления с учетом диапазона системных

условий. Выделены зоны конкурентной эффективности реализации водородного комплекса на АЭС, в которых производство водорода на месте его потребления требует больших затрат, чем покупка на АЭС. На основе определенного конкурентного диапазона сбытовой надбавки к цене продажи водорода на АЭС и принятых исходных условий, проведена оценка накопленного чистого дисконтированного дохода и срока окупаемости комплекса производства водорода на АЭС на продажу. Как показало исследование для выбранных условий, реализация ТВК на АЭС позволяет достичь НЧДД до 27,6 млн \$ при минимальном для выбранного диапазона анализа сроке окупаемости 7,9 лет при 200 % надбавке к стоимости водорода.

### Список литературы

[1]. Юрин В. Е., Егоров А. Н. Первичное регулирование частоты тока в энергосистеме атомными электростанциями на основе водородно-теплого аккумулирования // Альтернативная энергетика и эко-

логия. – 2021. – № (01-03). – С. 21-33

[2]. Yurin V. E., Egorov A. N. Multi-channel general reservation of NPP own needs on the basis of combination with autonomous hydrogen energy complex. International

Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – V. 60. – pp. 1068-1076. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.225

[3]. Egorov A. N., Yurin V. E. Comprehensive methodology for identifying tariff zones of efficiency of hydrogen-thermal accumulation system at the NPP // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – V. 46. – I. 69. – pp. 34097-34104. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.030

[4]. Байрамов А. Н. Оценка эффективности перспективных вариантов схем комбинирования АЭС с водородным комплексом // Энергетик. – 2023. – № 2. – С. 8-13.

[5]. Bayramov A. N. Comprehensive assessment of system efficiency and competitiveness of nuclear power plants in combination with hydrogen complex // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – V. 48. – I. 70. – pp. 27068-27078

[6]. Li Y. Life cycle cost and sensitivity analysis of a hydrogen system using low-price electricity in China // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – V. 42. – I. 4. – pp. 1899-1911

[7]. Stoots C. M. High-temperature electrolysis for large-scale hydrogen production from nuclear energy – Experimental investigations // International Journal of Hydrogen Energy. – 2010. – V. 35. – I. 10. – pp. 4861-4870

[8]. Rosner F., Papadias D., Brooks K. Green steel: design and cost analysis of hydrogen-based direct iron reduction // Energy Environ. Sci. – 2023. – V. 16. pp. 4121-4134. DOI: 10.1039/D3EE01077E

[9]. Воробьев Н. И. Технология связанного азота и азотных удобрений: – Минск: БГТУ, 2011. – 216 с.

[10]. Информация о компании // АО «Апатит»: официальный сайт. Режим доступа: [https://www.phosagro.ru/about/holding\\_balakov/](https://www.phosagro.ru/about/holding_balakov/)

[11]. Информация о компании // АО «Балтекс»: официальный сайт. Режим доступа: <https://www.newbaltex.ru/>

[12]. Информация о компании // ООО «Саратоворгсинтез»: официальный сайт. Режим доступа: <https://saratov.lukoil.ru/ru/About/GeneralInformation>

[13]. Тендер от компании «Саратоворгсинтез» на закупку технических газов – № 48682624. – Т-112

[14]. Информация о компании // ПАО «Саратовский НПЗ»: официальный сайт. Режим доступа: <https://sarnpz.rosneft.ru/about/Glance/OperationalStructure/Perera-botka/sarnpz>

[15]. Информация о компании // АО «Саратовстройстекло»: официальный сайт. Режим доступа: <https://xn--80aagmthhtbendhfdjde.xn--p1ai/>

[16]. Ланин А. В., Голант К. М., Николин И. В. Взаимодействие молекулярного водорода с легированным кварцевым стеклом сердцевины оптических волокон при повышенных температурах // Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74. – № 12. – С. 61-66.

[17]. Информация о компании // Саратовский ре-

зервуарный завод: официальный сайт. Режим доступа: <https://sarrz.ru/>

[18]. Информация о компании // Саратовский Жировой Комбинат: официальный сайт. Режим доступа: <https://solpro.ru/about/companies/szk/>

[19]. Информация о компании // Российские железные дороги: официальный сайт. Режим доступа: <https://www.rzd.ru/>

[20]. Григорович Д. Н. Формирование предложений по использованию водородного топлива на железнодорожном транспорте с учетом анализа зарубежного опыта бюллетень объединенного ученого совета ОАО РЖД. – 2013. – № 6. – С. 37-50.

[21]. Пресс-служба АО «РЖД»: Водород разгонит поезд // Гудок: официальный сайт. 2021. Режим доступа: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1554543&archive=2021.02.26%2026.06.2021.%20№32>

[22]. Тендер от компании «Электросталь» на поставку установки по производству водорода – № 47853740

[23]. Тендер от компании «Стройстекло» на поставку установки по производству водорода – № 32110927105

[24]. Аминов Р. З., Байрамов А. Н., Шацкова О. В. Оценка эффективности водородных циклов на базе внепиковой электроэнергии АЭС // Теплоэнергетика. – 2009. – № 11. – С. 41-45

[25]. НТП 24-94. Нормы технологического проектирования производства водорода методом электролиза воды. – Москва, 1994. – 37 с.

[26]. Водородная энергетика. Дивизион Наука и инновации / Аналитический центр при правительстве РФ // Водородный бюллетень. – 2020. – № 89. – С. 22-23

[27]. Алексева О. К., Козлов С. И., Фатеев В. Н. Транспортировка водорода. Альтернативное топливо. – 2011. – № 3(21). – С. 18-24

[28]. Cheng W., Cheng F. A techno-economic study of the strategy for hydrogen transport by pipelines in Canada // Journal of Pipeline Science and Engineering. – In Press. DOI: 10.1016/j.jpse.2023.100112

[29]. Oney F., Veziroglu T. N., Dulger Z. Evaluation of pipeline transportation of hydrogen and natural gas mixtures // Int. J. Hydrogen Energy. – 1994. – V. 19. – № 10. – pp. 813-822.

[30]. Reddi K. Techno-economic analysis of conventional and advanced high-pressure tube trailer configurations for compressed hydrogen gas transportation and refueling // International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – V. 43. – I. 9. – pp. 4428-4438.

[31]. Bellotti D. Thermo-economic comparison of hydrogen and hydro-methane produced from hydroelectric energy for land transportation // International Journal of Hydrogen Energy. – 2015. – V. 40. – I. 6. – pp. 2433-2444.

[32]. Lahnaoui A. Optimizing hydrogen transportation system for mobility via compressed hydrogen trucks // International Journal of Hydrogen

Energy. – 2019. – V. 44 – I. 35. – pp. 19302-19312.

[33]. Otto M. Optimal hydrogen carrier: Holistic evaluation of hydrogen storage and transportation concepts for power generation, aviation, and transportation // *Journal of Energy Storage*. – 2022. – V. 55. – Part D. – 105714.

[34]. Аминов Р. З., Байрамов А. Н. Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями. – М.: Наука, 2016. – 254 с.

[35]. Юрин В. Е., Егоров А. Н. Прогнозная экономическая эффективность комбинирования АЭС с автономным водородным энергокомплексом // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2019. – № 13-15. – С.40-51

[36]. Егоров А. Н., Юрин В. Е. Комплексная методика выявления тарифных зон эффективности многофункциональной системы водородно-теплового аккумулирования на АЭС // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2020. – № 25-27 (347-349). – С. 73-83

[37]. Юрин В. Е., Егоров А. Н., Москаленко А. Б., Муртазов М. А. Методика комплексного исследования эффективности путей совершенствования АЭС на примере сравнительного анализа автономного водородного энергокомплекса. *Труды Академэнерго*. – 2020. – № 2. – С. 77-96

[38]. Байрамов А. Н. Разработка научных основ повышения эффективности АЭС при комбинировании с водородным комплексом / Саратов: СГТУ им. Гагарина Ю. А., 2022. – 397 с.

[39]. Краснодарский компрессорный завод. Режим доступа: <https://kkzav.ru/porshnevye-kompressory/gazy>

[40]. Тарифы на электроэнергию для средних предприятий. Отчет компании ООО «Т2С-Энерго» за 2023 г. Режим доступа: <https://time2save.ru/tarify-na-elektroenergiu-dlya-srednih-predpriyatiy>

[41]. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на пери-

## References

[1]. Yurin V. E., Egorov A. N. Primary regulation of current frequency in the power system by nuclear power plants based on hydrogen-thermal accumulation // *Alternative energy and ecology*. – 2021. – № (01-03). – С. 21-33

[2]. Yurin V. E., Egorov A. N. Multi-channel general reservation of NPP own needs on the basis of combination with autonomous hydrogen energy complex. *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2024. – V. 60. – pp. 1068-1076. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.225

[3]. Egorov A. N., Yurin V. E. Comprehensive methodology for identifying tariff zones of efficiency of hydrogen-thermal accumulation system at the NPP // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2021. – V. 46. – I. 69. – pp. 34097-34104. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.030

[4]. Bayramov A. N. Evaluation of the effectiveness of promising options for combining nuclear power plants with a hydrogen complex // *Energetik*. – 2023. – No. 2. – P. 8-13.

[5]. Bayramov A. N. Comprehensive assessment of system efficiency and competitiveness of nuclear power plants in combination with hydrogen complex // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2023. – V. 48. – I. 70. – pp. 27068-27078

[6]. Li Y. Life cycle cost and sensitivity analysis of a hydrogen system using low-price electricity in China // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2017. – V. 42. – I. 4. – pp. 1899-1911

[7]. Stoots C. M. High-temperature electrolysis for large-scale hydrogen production from nuclear energy – Experimental investigations // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2010. – V. 35. – I. 10. – pp. 4861-4870

[8]. Rosner F., Papadias D., Brooks K. Green

steel: design and cost analysis of hydrogen-based direct iron reduction // *Energy Environ. Sci*. – 2023. – V. 16, pp. 4121-4134. DOI: 10.1039/D3EE01077E

[9]. Vorobiev N. I. Technology of bound nitrogen and nitrogen fertilizers: – Minsk: BSTU, 2011. – 216 p.

[10]. Information about the company // JSC Apatit: official website. Access mode: [https://www.phosagro.ru/about/holding\\_balakovo/](https://www.phosagro.ru/about/holding_balakovo/)

[11]. Information about the company // Baltex JSC: official website. Access mode: <https://www.newbaltex.ru/>

[12]. Information about the company // Saratovorgsintez LLC: official website. Access mode: <https://saratov.lukoil.ru/ru/About/GeneralInformation>

[13]. Tender from the Saratovorgsintez company for the purchase of technical gases – № 48682624. T-112

[14]. Information about the company // PJSC Saratov Oil Refinery: official website. Access mode: <https://sarnpz.rosneft.ru/about/Glance/OperationalStructure/Perera-botka/sarnpz>

[15]. Information about the company // JSC Saratovstroysteklo: official website. Access mode: <https://xn--80aagmthtbtendhfdjde.xn--p1ai/>

[16]. Lanin A. V., Golant K. M., Nikolin I. V. Interaction of molecular hydrogen with doped quartz glass of the optical fiber core at elevated temperatures // *Journal of Technical Physics*. – 2004. – T. 74. – No. 12. – P. 61-66.

[17]. Information about the company // Saratov Reservoir Plant: official website. Access mode: <https://sarrz.ru/>

[18]. Information about the company // Saratov Fat Plant: official website. Access mode: <https://solpro.ru/about/companies/szk/>

[19]. Information about the company // Russian Railways: official website. Access mode: <https://www.rzd.ru/>





[20]. Grigorovich D. N. Formation of proposals for the use of hydrogen fuel in railway transport, taking into account the analysis of foreign experience, bulletin of the joint academic council of Russian Railways. – 2013. – No. 6. – P. 37-50.

[21]. Press service of JSC Russian Railways: Hydrogen will accelerate trains // Gudok: official website. 2021. Access mode: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1554543&archive=2021.02.26.26.06.2021>. № 32

[22]. Tender from the Elektrostal company for the supply of a hydrogen production plant – № 47853740

[23]. Tender from the Stroysteklo company for the supply of a hydrogen production plant – № 32110927105

[24]. Aminov R. Z., Bayramov A. N., Shatskova O. V. Assessing the efficiency of hydrogen cycles based on off-peak electricity from nuclear power plants // Thermal Energy. – 2009. – № 11. – P. 41-45

[25]. NTP 24-94. Standards for technological design of hydrogen production by water electrolysis. – Moscow, 1994. – 37 p.

[26]. Hydrogen energy. Division Science and Innovation / Analytical Center for the Government of the Russian Federation // Hydrogen Bulletin. – 2020. – № 89. – P. 22-23

[27]. Alekseeva O. K., Kozlov S. I., Fateev V. N. Hydrogen transportation. Alternative fuel. – 2011. – № 3(21). – P. 18-24

[28]. Aminov R. Z., Bayramov A. N. Combining hydrogen energy cycles with nuclear power plants. – M.: Science, 2016. – 254 p.

[29]. Cheng W., Cheng F. A techno-economic study of the strategy for hydrogen transport by pipelines in Canada // Journal of Pipeline Science and Engineering. – In Press. DOI: 10.1016/j.jpse.2023.100112

[30]. Oney F., Veziroglu T.N., Dulger Z. Evaluation of pipeline transportation of hydrogen and natural gas mixtures // Int. J. Hydrogen Energy. – 1994. – V. 19. – № 10. – pp. 813-822.

[31]. Reddi K. Techno-economic analysis of conventional and advanced high-pressure tube trailer configurations for compressed hydrogen gas transportation and refueling // International Journal of Hydrogen Energy.

– 2018. – V. 43. – I. 9. – pp. 4428-4438.

[32]. Bellotti D. Thermo-economic comparison of hydrogen and hydro-methane produced from hydroelectric energy for land transportation // International Journal of Hydrogen Energy. – 2015. – V. 40. – I. 6. – pp. 2433-2444.

[33]. Lahnaoui A. Optimizing hydrogen transportation system for mobility via compressed hydrogen trucks // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – V. 44 – I. 35. – pp. 19302-19312.

[34]. Otto M. Optimal hydrogen carrier: Holistic evaluation of hydrogen storage and transportation concepts for power generation, aviation, and transportation // Journal of Energy Storage. – 2022. – V. 55. – Part D. – 105714

[35]. Yurin V. E., Egorov A. N. Predicted economic efficiency of combining nuclear power plants with an autonomous hydrogen energy complex // Alternative energy and ecology. – 2019. – № 13-15. – P. 40-51

[36]. Egorov A. N., Yurin V. E. Integrated methodology for identifying tariff zones of efficiency of a multifunctional hydrogen-thermal storage system at nuclear power plants // Alternative energy and ecology. – 2020. – № 25-27 (347-349). – P. 73-83

[37]. Yurin V. E., Egorov A. N., Moskalenko A. B., Murtazov M. A. Methodology for a comprehensive study of the effectiveness of ways to improve nuclear power plants using the example of a comparative analysis of an autonomous hydrogen energy complex. Proceedings of Academenergo. – 2020. – № 2. – P. 77-96

[38]. Bayramov A. N. Development of scientific foundations for increasing the efficiency of nuclear power plants when combined with a hydrogen complex / Saratov: SSTU im. Gagarina Yu. A., 2022. – 397 p.

[39]. Krasnodar compressor plant. Access mode: <https://kkzav.ru/porshnevye-kompressory/gazy>

[40]. Electricity tariffs for medium-sized enterprises. Report of the company T2S-Energo LLC for 2023. Access mode: <https://time2save.ru/tarify-na-elektroenergiu-dlya-srednih-predpriyatij>

[41]. Forecast of long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period until 2030. Order of the Government of the Russian Federation dated 06.10.2021 N 2816-p.

Транслитерация по BSI







## АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

## ATOMIC ENERGY

АТОМНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ATOMIC-HYDROGEN ENERGY

Статья поступила в редакцию 11.03.24 Ред. Рег. № 322-003-24

The article has entered in publishing office 11.03.24 Ed. Reg. No. 322-003-24

УДК 620.93

## МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ НУЖД АРКТИКИ

*Секретарев Ю. А.<sup>1</sup>, Мятеж Т. В.<sup>1</sup>, Любченко В. Я.<sup>1</sup>,  
Зубова Н. В.<sup>1</sup>, Безменов С. В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия.  
e-mail: tatianamyateg@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.057-070

Заключение совета рецензентов: 20.03.24

Заключение совета экспертов: 25.03.24

Принято к публикации: 30.03.24

Рассмотрены возможности осуществления «водородного перехода» в локальной энергетике Арктики на основе применения концепций технологий, дружественных окружающей среде и социотехнологического транзита по критерию максимизации прибыли. Актуальность работы обусловлена реформированием электроэнергетической отрасли, которое подразумевает поэтапный переход к конкурентной модели рынка, когда каждый производитель будет заинтересован в максимизации собственной прибыли и самостоятельно определять объемы производства электрической и тепловой энергии на базе современных технологий. В статье рассмотрены возможности использования водорода, получаемого на базе природного газа, в топливных элементах в системах децентрализованного электро- и теплоснабжения. Определены условия конкурентоспособности новой технологии по сравнению с централизованными системами и децентрализованными на базе мини-ТЭЦ с газотурбинными или газопоршневыми двигателями. Показано, что системы на базе топливных элементов, использующие природный газ в качестве топлива, не являются энергосберегающими технологиями, но позволяют сократить выбросы углекислого газа и других загрязнителей в окружающую среду. Массовое применение топливных элементов в децентрализованных системах энергоснабжения возможно только при снижении их стоимости менее 100 долл./кВт.

**Ключевые слова:** энергетика, возобновляемые источники энергии, водород, социотехнический транзит, промежуточная техника, топливный элемент, локальные сообщества.

*Секретарев Ю. А., Мятеж Т. В., Любченко В. Я., Зубова Н. В., Безменов С. В. Модель оптимизации режимов работы автономных систем энергоснабжения на основе водородных технологий для нужд Арктики // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 03(420) 2024, с. 57-70*

*Sekretarev Y. A., Myateg T. V., Lyubchenko V. Ya., Zubova N. V., Bezmenov S. V. Model of optimization of operating modes of autonomous energy supply systems based on hydrogen technology for the needs of Arktika // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 03(420) 2024, pp. 57-70*



# MODEL OF OPTIMIZATION OF OPERATING MODES OF AUTONOMOUS ENERGY SUPPLY SYSTEMS BASED ON HYDROGEN TECHNOLOGY FOR THE NEEDS OF ARCTIC

*Sekretarev Y. A.<sup>1</sup>, Myateg T. V.<sup>1</sup>, Lyubchenko V. Ya.<sup>1</sup>,  
Zubova N. V.<sup>1</sup>, Bezmenov S. V.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia  
e-mail: tatianamyateg@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.057-070

Referred: 20.03.23

Received in revised form: 25.03.23

Accepted: 30.03.23

The possibilities of implementing a «hydrogen transition» in the local energy sector of the Arctic are considered based on the application of the concepts of environmentally friendly technologies and socio-technological transit according to the criterion of profit maximization. The relevance of the work is due to the reform of the electric power industry, which implies a phased transition to a competitive market model, when each manufacturer will be interested in maximizing its own profit and independently determine the volume of production of electrical and thermal energy based on modern technologies. The article discusses the possibilities of using hydrogen produced from natural gas in fuel cells in decentralized electricity and heat supply systems. The conditions for the competitiveness of the new technology in comparison with centralized systems and decentralized ones based on mini-CHPs with gas turbine or gas piston engines have been determined. It has been shown that fuel cell systems using natural gas as fuel are not energy-saving technologies, but can reduce emissions of carbon dioxide and other pollutants into the environment. Massive use of fuel cells in decentralized energy supply systems is possible only if their cost is reduced to less than \$100/kW.

**Keywords:** energy, renewable energy sources, hydrogen, sociotechnical transit, intermediate technology, fuel cell, local communities.



Секретарев  
Юрий Анатольевич

Sekretarev  
Yuri A.

## Сведения об авторе:

**Место работы:** ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры «Системы электроснабжения предприятий».

**Образование:** ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

**Научное звание:** профессор.

**Ученая степень:** доктор технических наук.

**Область научных интересов:** Управление режимами работы тепловых электрических станций, гидроэнергетика, оптимизация режимов работы смешанных энергосистем, экспертные системы в области энергетики, исследование надежности энергетических объектов, оценка их остаточного ресурса, системный анализ, ремонтное обслуживание оборудования.

**Публикации:** более 400 научных трудов, в том числе 10 монографий, 55 изобретений.

## Author information:

**Place of employment:** Novosibirsk State Technical University, Department of Power Supply Systems

**Education:** Novosibirsk State Technical University.

**Scientific title:** Professor.

**Academic degree:** Doctor of Technical Sciences.

**Scientific interests area:** Management of operating modes of thermal power plants, hydropower engineering, optimization of operating modes of mixed energy systems, expert systems in the field of energy, research into the reliability of energy facilities, assessment of their residual life, system analysis, equipment repair maintenance.

**Publications:** more than 400 scientific works, including 10 monographs, 55 inventions.



Мятеж  
Татьяна  
Владимировна

Myatezh  
Tatiana V.

**Сведения об авторе:**

**Место работы:** ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», доцент кафедры «Системы электроснабжения предприятий».

**Образование:** ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

**Научное звание:** доцент.

**Ученая степень:** кандидат технических наук.

**Область научных интересов:** синергетические модели управления и оптимизации режимов работы смешанных энергосистем, исследование режимов работы гидроэлектростанций и тепловых электрических станций, системный анализ и экспертные системы, нейронные сети, возобновляемые источники энергии, вопросы качества электроснабжения, энергосбережение, теория надежности, анализ и исследование несинусоидальности и несимметрии нагрузки.

**Публикации:** 60 научных статей и докладов на конференциях, 2 монографии, 15 учебных, и учебно-методических пособий, 5 изобретений.

**Information about the author:**

**Place of work:** Novosibirsk State Technical University, Department of Power Supply Systems.

**Education:** Novosibirsk State Technical University.

**Scientific title:** Assistant Professor.

**Academic degree:** Candidate of Technical Sciences.

**Awards and scientific awards:** Synergetic models of control and optimization of operating modes of mixed energy systems, study of operating modes of hydroelectric power plants and thermal power plants, system analysis and expert systems, neural networks, renewable energy sources, issues of power supply quality, energy saving, reliability theory, analysis and study of non-sinusoidality and asymmetry.

**Research interests:** Research of thermophysical and physicochemical processes in heat power engineering and metallurgical heat engineering, development of physical foundations of non-traditional and renewable energy sources.

**Publications:** 60 scientific articles and conference reports, 2 monographs, 15 educational and teaching aids, 5 inventions.



Любченко  
Валентина Яковлевна

Lyubchenko  
Valentina Ya.

**Сведения об авторе:**

**Место работы:** ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», доцент кафедры «Системы электроснабжения предприятий».

**Образование:** ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

**Научное звание:** доцент.

**Ученая степень:** кандидат технических наук.

**Область научных интересов:** математическое моделирование в энергетике, оптимизация режимов работы энергообъектов, технологии блокчейн.

**Публикации:** 80 публикаций, 2 монографии, 25 учебных, и учебно-методических пособий.

**Information about the author:**

**Place of work:** Novosibirsk State Technical University, Department of Power Supply Systems.

**Education:** Novosibirsk State Technical University.

**Scientific title:** Assistant Professor.

**Academic degree:** Candidate of Technical Sciences.

**Research interests:** mathematical modeling in the energy sector, optimization of operating modes of energy facilities, blockchain technologies.

**Publications:** 80 publications, 2 monographs, 25 educational and teaching aids.





Зубова  
Наталья  
Владиславовна  
Zubova Natalya V.

**Сведения об авторе:**

**Место работы:** ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», доцент кафедры «Системы электроснабжения предприятий».

**Образование:** ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

**Ученая степень:** кандидат технических наук.

**Область научных интересов:** возобновляемые источники энергии, автономные системы электроснабжения, нечеткая логика, системы управления объектами возобновляемой энергетики

**Публикации:** 56 публикаций, в т.ч. 14 в изданиях, индексируемых Scopus.

**Information about the author:**

**Place of employment:** Novosibirsk State Technical University, Department of Power Supply Systems

**Education:** Novosibirsk State Technical University.

**Academic degree:** Candidate of Technical Sciences.

**Research interests:** renewable energy sources, autonomous power supply systems, fuzzy logic, control systems for renewable energy facilities

**Publications:** 56 publications, including 14 in journals indexed by Scopus.



Безменов  
Степан Викторович  
Bezmenov Stepan V.

**Сведения об авторе:**

**Место работы:** ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», магистрант 2-го года обучения кафедры «Системы электроснабжения предприятий».

**Образование:** Новосибирский государственный технический университет.

**Information about the author:**

**Place of employment:** Novosibirsk State Technical University, 2nd year master's student in the department of «Power Supply Systems».

**Education:** Novosibirsk State Technical University.



**Введение**

Свыше 65 % территории Российской Федерации относится к зоне децентрализованного электроснабжения, в которой работает более 6000 электростанций (7,5 % от установленной мощности национальной энергетики) для надежного и бесперебойного энергоснабжения 15 млн человек, проживающих на данной территории. Большую часть зоны децентрализованного электроснабжения составляют арктические территории Российской Федерации. Исследования экономической истории Арктики в XX–XXI веках выявили две чередующиеся формы территориального развития: централизованные программы развития «пустых» пространств и эволюционное развитие на основе самоорганизации местных сообществ [1, 2].

Актуальность проблемы энергосбережения, экологичности, экономичности и обеспечение рациональной работы систем энергоснабжения, а также их надежность на протяжении всего срока эксплуатации диктуется приоритетными направлениями развития России и мирового сообщества в целом.

В последние годы водород все чаще становится ключевой фигурой в ходе дебатов о проблемах глобального климата. Сейчас широко обсуждается воз-

можность применения «зеленого водорода» в тяжелой промышленности или транспортном секторе – но в энергетической отрасли использование водорода имеет едва ли не больший потенциал.

Производители газопоршневых установок (ГПУ), работающих на природном газе, также уделяют все большее внимание разработке новых продуктов, которые в недалеком будущем будут способны функционировать с учетом возможного увеличения доли использования водорода в энергосистеме. Производителю ГПУ 2G Energy AG, находящемуся в г. Хеек (Германия) удалось не только модернизировать свои станции для работы с определенной долей водорода, но и разработать ряд продуктов для работы со 100 % водородным топливом. Таким образом, в условиях энергетического перехода, именно когенерационные установки позволяют собирать воедино разрозненные прежде части: требования к достижению климатической нейтральности, с одной стороны, и стабильную надежность энергоснабжения, с другой.

Перспективы применения солнечных и ветряных установок, даже с учетом того, что последние были разработаны для работы в условиях с низкими тем-



пературами, оказываются сомнительными из-за их стохастического характера. Это обуславливает актуальность применения водородных технологий на базе топливных элементов как альтернативу традицион-

ных генерирующих источников из-за больших потерь мощности в сетях ввиду большой удаленности регионов крайнего Севера, а также их неэкологичности.

**Таблица сокращений и обозначений**

ГПУ	Газопоршневые установки
КПД	Коэффициент полезного действия
ТЭ	Топливный элемент
PEM-Proton Exchange Membrane	Мембрана с протонной проводимостью
УВ топливо	Углеводородное топливо
НПО	Научно-производственное объединение
ГМК	Горно-металлургическая компания
СПГ	Сжиженный природный газ
СМП	Северный морской путь
ГД	Газопоршневой двигатель
ТЭС	Тепловая электростанция
ТЭЦ	Теплоэлектроцентраль
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
Мини-ТЭЦ	Мини теплоэлектроцентраль – теплосиловые установки, служащие для совместного производства электрической и тепловой энергии в агрегатах единичной мощностью до 25 МВт
2G Energy AG	Холдинговая компания, которая занимается производством комбинированных тепло- и электростанций (CHP) для децентрализованного производства и поставок энергии
EnergyNet	Интернет энергии (Internet of Energy) – экосистема производителей и потребителей энергии, которые беспрепятственно интегрируются в общую инфраструктуру и обмениваются энергией. Это один из глобальных рынков Национальной технологической инициативы, объявленной в 2014 Президентом Российской Федерации в качестве одного из стратегических направлений развития технологического лидерства страны

SOFC	Solid oxide fuel cell – твердооксидный топливный элемент
PEMFS	Proton-exchange membrane fuel cells – твердо-полимерные топливные элементы
ПОМ	Парциальное окисление метана
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell – топливный элемент на основе расплавленного карбоната (соли натрия или лития)
AFC	Alkaline fuel cell – это тип топливного элемента, в котором в качестве электролитной среды используется щелочной электролит, обычно гидроксид калия (KOH) или гидроксид натрия (NaOH)
PAFC	Phosphoric acid fuel cells – тип топливных элементов, в которых в качестве электролита используется жидкая фосфорная кислота
ЩТЭ	Щелочные топливные элементы
ПОМТЭ	Топливные элементы/ячейки с прямым окислением метанола
ФКТЭ	Топливные элементы на основе фосфорной кислоты
РКТЭ	Топливные элементы на расплаве карбоната
ТОТЭ	Твердооксидный топливный элемент
КОН водный раствор	Водный раствор гидроксида калия
ЭХГ	Электрохимический генератор
УВ	Углеводородное топливо
НАСА	Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства
ppm	Parts per million – промилля, представляет собой одну миллионную долю
РКК «Энергия»	Ведущее российское ракетно-космическое предприятие «Энергия»
НПО «Квант»	Научно-производственное объединение «КВАНТ»
ГМК «Норильский никель»	Российская горно-металлургическая компания, крупнейший в мире производитель никеля и палладия







АвтоВАЗ	Советская и российская автомобилестроительная компания
Persistence Market Research	Инновационный и специализированный поставщик аналитических отчетов и консультационных услуг
Westinghouse Electric Corp	Одна из ведущих электротехнических компаний Соединенных Штатов Америки, существовавшая с 1886 года по 1997 год
Siemens Westinghouse Power Corporation	Электротехническая компания в Соединенных Штатах Америки
Программа Apollo	Программа пилотируемых полетов к Луне
Apollo-Soyuz	Проект совместного экспериментального полёта
Gemini	Американский пилотируемый космический корабль
Skylab	Первая и единственная национальная орбитальная станция США, предназначенная для технологических, астрофизических, медико-биологических исследований, а также для наблюдения Земли
Space Shuttle	Американский многоразовый транспортный космический корабль
программа «Буран»	Космическая программа советской многоразовой транспортной космической системы
Bloomenergy	Американская компания производит и продает твердооксидные топливные элементы
Ballard	Канадская компания – производитель протон-обменных топливных элементов
Vaillant	Немецкая компания, один из лидеров в области производства оборудования для котельных
UTC Power	Производитель высококачественной полупроводниковой продукции для производителей электронной техники в различных сегментах рынка
Plug Power	Американская компания, занимающаяся разработкой систем водородных топливных элементов, которые заменяют обычные аккумуляторы в оборудовании и транспортных средствах, работающих на электричестве
Ceres Power	Британский разработчик технологии твердооксидных топливных элементов для использования в распределенных энергосистемах, направленных на декарбонизацию городов, фабрик, центров обработки данных и зарядки электромобилей



Siemens	Немецкий конгломерат, работающий в области электротехники, электроники, энергетического оборудования, транспорта, медицинского оборудования и светотехники, а также специализированных услуг в различных областях промышленности, транспорта и связи
DMFC	Метанольный топливный элемент
RFC	Регенеративный топливный элемент
ONSI corp.	Orion Network Systems, Incorporation
EPRI	Energy Power Research Institution – Электроэнергетический исследовательский институт
США	Соединенные штаты Америки
СПГ	Сжиженный природный газ
ЕС	Европейский союз
СМП	Северный морской путь
ЯНАО	Ямало-Ненецкий автономный округ
ЛЭП	Линии электропередачи
ГК	Генерирующая компания
Nafion-H	Полимерная пленка
Мини ГТУ-ТЭЦ	Газотурбинная мини-теплоэлектроцентраль
ТЭК	Топливо-энергетический комплекс
$B(P_i)$	Расход топлива на $i$ -той ТЭС
$B$	Суммарный расход топлива в энергосистеме
$\min$	Минимум целевой функции
$\pi$	Суммарные потери активной мощности
MR	Marginal Revenue – предельный доход
MC	Marginal Cost – предельные издержки
$P_{ii}$	Электрическая мощность потребителя
$D$	Спрос на электроэнергию
$P_{opt}$	Цена продажи, соответствующая оптимальному объему производства

$\Xi_{\text{опт}}$	Оптимальный объем вырабатываемой электроэнергии
Ед. прод.	Единицы продукции
P	Цена продажи
Э	Вырабатываемая электроэнергия
Пэ	Прибыль от производства электроэнергии
П <sub>Q</sub>	Прибыль от производства тепловой энергии
П <sub>Σ</sub>	Суммарная прибыль от производства обоих видов энергии
ТП-170	Марка котла
ТП-81	Марка котла
ЦКТИ-75-39	Марка котла
H <sub>2</sub> O	Химическая формула воды

CH <sub>4</sub>	Химическая формула метана
CnHm	Углеводороды
ZrO <sub>2</sub>	Оксид циркония
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Оксид иттрия
O <sub>2</sub>	Кислород
CO	Оксид углерода
H <sub>2</sub>	Водород
CO <sub>2</sub>	Диоксид углерода
H <sub>2</sub> S	Сероводород
COS	Оксид-сульфид углерода
Nox	Окислы азота
MgNb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Магноколумбит

## 1. Топливные элементы как основа водородной энергетики будущего

Водород, подобно электроэнергии, является энергоносителем, но не энергоресурсом, поскольку он не существует в естественном виде в природе. Получение водорода основано на использовании сырья: воды, углеводородов или других природных материалов, содержащих водород в связанном виде. Но лишь в комбинации с ядерной энергией или возобновляемыми источниками энергии водород может рассматриваться как достаточно «чистый» энергоноситель. В способах производства водорода доминирует риформинг метана (почти 50 %), около трети производится в нефтепереработке, 18 % – путем газификации угля и только 4 % – электролизом воды [3]. Водород воспламеняется при концентрации от 4 до 74,5 % (возгорание метана происходит при концентрациях от 2,1 до 9,5 %), хотя взрывные концентрации для водорода значительно выше, чем для природного газа (между 18,3 и 59 % в концентрации с воздухом для водорода, по сравнению с 6,3-14 % для метана) [4].

Согласно умеренному сценарию специалистов Центра EnergyNet, принятому в качестве базового, к 2025 г. мировой рынок водородной энергетики должен достичь 26 млрд долл., при этом в период 2025-2040 гг. цены на водородное топливо должны снижаться с

4 тыс. до уровня 2 тыс. долл. за тонну. Согласно прогнозам компании PersistenceMarketResearch, в период 2020-2025 гг. среднегодовой рост мирового рынка водорода в целом составит 6,1 % и к концу 2025 г. стоимость рынка достигнет 200 млрд долл. [5]. Основные перспективы водорода как энергоносителя связаны с использованием топливных элементов.

Для стационарной энергетики наибольшее распространение получили твердотельные оксидные топливные элементы, отличающиеся простотой конструкции (рис. 2), но пока что они функционируют при достаточно высоких температурах – 700-1000 °С. Такие высокие температуры позволяют использовать относительно «грязное», неочищенное топливо.

На данный момент из известных топливных элементов наибольшее распространение и применение в области стационарных систем нашли SOFC, MCFC и PEMFC. Основными поставщиками на Европейский рынок топливных элементов для стационарного применения являются Ballard, Vaillant, UTC Power, PlugPower, Nuvera (PEMFC), CeresPower, Bloomenergy, Siemens.

Зависимости химических реакций разнятся по видам применяемых топливных элементов (табл. 1)

Types of fuel cells

Тип ТЭ		Природа электролита	Рабочая температура	Анодная реакция	Катодная реакция
Английский	Русский				
AFC	ЩТЭ	Водный раствор КОН	60-150 °С	$H_2+2OH=2H_2O+2e^-$	$0,5O_2+2H_2O+2e^-=2OH^-$
PEMFC	ПОМТЭ	Полимерная пленка Nafion-H	60-120 °С	$H_2=2H^++2e^-$	$0,5O_2+2H^++2e^-=H_2O$
PAFC	ФКТЭ	$H_3PO_4$	160-220 °С	$H_2=2H^++2e^-$	$0,5O_2+2H^++2e^-=H_2O$
MCFC	PKTЭ	Расплав карбонатов $K_2CO_3+Li_2CO_3$	600-700 °С	$H_2+CO_3^{2-}=H_2O+CO_2+2e^-$	$0,5O_2+CO_2+2e^-=CO_3^{2-}$
SOFC	ТОТЭ	Твердый раствор $ZrO_2$ (8 мол. % $Y_2O_3$ )	850-1000 °С	$H_2+O_2=H_2O+2e^-$	$0,5O_2+2e^-=O^{2-}$

Основным недостатком технологии использования ТЭ является высокая стоимость устройства. Однако, заметный прогресс в снижении стоимости ТЭ отмечен в последние годы, когда нижняя граница удельных затрат для коммерческих установок сократилась с 4000 долл./кВт в 2002 г. до 1600 долл./кВт в настоящее время [6]. Анализ многочисленных публикаций по применению ТЭ показывает следующие пороговые значения их коммерциализации [7]: транспортные средства 50 долл./кВт, рассредоточенные системы энергоснабжения населения 300-1500 долл./кВт, то же для коммерческих потребителей 1200-3000 долл./кВт, стационарные электростанции 1000-1500 долл./кВт, портативные и микроустройства для электропитания 5000-10000 долл./кВт.

По данным обзора [8], усилия компаний-разработчиков ТЭ распределены следующим образом:

PEM и SOFC – по 30 %, PAFC – 25 %, MCFC – 15 %. Около половины всех работ по ТЭ сосредоточены в США, свыше одной трети – в Японии и 15 % – в ЕС. Интерес к ТЭ определяется теми потенциальными преимуществами, которые они имеют перед традиционными энергетическими технологиями: практически чистый и надежный источник энергии, способный работать как в централизованных, так и в децентрализованных системах энергоснабжения; большое разнообразие способов получения основного реагента (водорода) на основе как органических топлив, так и безуглеродных технологий; высокая эффективность процесса преобразования топлива в электроэнергию; возможность организации теплоснабжения потребителей на базе утилизированного тепла; практическое отсутствие шума; низкая рабочая температура и быстрый старт.

## 2. «Водородный переход» в системах энергоснабжения

ТЭ могут внести коренные изменения в систему энергоснабжения потребителей. В настоящее время делается ставка на централизованное энергоснабжение, сложившееся в прошлом столетии. Однако развитие централизованных систем связано с необходимостью транспортировки энергоносителей, что, в конечном счете, ведет к росту потерь энергии в этом сегменте энергетического производства. Особенно ощутимыми стали эти потери в системах теплоснабжения – 20-30 % и более. Поэтому вновь возникает интерес к децентрализованным системам энергоснабжения, позволяющим приблизить производство энергии к ее потребителям. Создание новых источников электрической и тепловой энергии с повышенными технико-экономическими показателями делает децентрализованные системы вполне конкурентоспособными, особенно в отдаленных северных регионах Арктики, расположенных вдали от мест прокладки электрических и тепловых сетей.

С достаточной степенью уверенности уже сейчас

можно выделить сразу несколько энергоэкономических ниш, где в первую очередь могут появиться ТЭ.

Одним из направлений их применения может стать автономное электроснабжение полностью электрифицированных домов децентрализованного энергоснабжения. Это, в частности, автономные системы энергоснабжения, явным примером которых являются отдаленные арктические регионы.

Арктика во многом была и остается «полигоном» инновационного развития для экономики России и ее топливно-энергетического комплекса. Так как многие арктические шельфовые месторождения значительно удалены от береговой линии (65-200 км и более), осложняется передача электроэнергии по ЛЭП. Поэтому одним из перспективных вариантов электроснабжения подводных комплексов добычи является создание автономных источников электроснабжения, работа которых не будет зависеть от наличия ресурсной базы или погодных условий. Таким образом, перспективы использования топливных эле-

ментов в условиях Арктики бесспорны и очевидны. Эффективность применения децентрализованных систем энергоснабжения зависит от трех факторов: стоимости энергии от централизованного источника, цены энергоресурсов, используемых для производства электро- и теплоэнергии в установках децентрализованного энергоснабжения, и стоимости технологии для децентрализованного энергоснабжения.

Одновременно нельзя недооценивать серьезные

проблемы, требующие решения до того, как ТЭ станет массовой технологией. Это прежде всего снижение затрат как на ТЭ, так и инфраструктуру, необходимую для производства, хранения и транспорта водорода. В связи с этим, решение вопросов электроснабжения объектов Арктики на современном этапе делает актуальным также решение вопросов, связанных с повышением эффективности функционирования существующих генерирующих объектов.

### 3. Сравнительный анализ энергетической эффективности ТЭ в децентрализованных и централизованных системах энергоснабжения

Ниже рассмотрены условия эффективного применения ТЭ в системах децентрализованного электро- и теплоснабжения, что особенно актуально для условий Крайнего Севера.

Как известно, существующие технологии на базе газотурбинной установки ГТУ или газопоршневого двигателя (ГД), сжигающих природный газ в качестве топлива, с утилизацией тепла (мини ГТУ-ТЭЦ), могут также вполне успешно решать эту задачу. Для таких технологий достаточно хорошо известны технико-экономические параметры, что позволяет на их основе надежно оценить параметры новой технологии на базе ТЭ, при которых она сможет конкурировать с традиционными технологиями энергоснабжения.

В качестве централизованной системы принята схема комбинированного электро- и теплоснабжения на базе такого централизованного источника, как теплоэлектроцентраль (ТЭЦ). Расчеты выполнены для объекта, потребляющего электрическую и тепловую энергию с соотношением максимумов электрической и тепловой нагрузок от 1:0,5 до 1:5. Удельные инвестиции в систему мини-ТЭЦ составляют от 400 до 900 долл./кВт. Что касается ТЭ, то здесь ожидается значительный прорыв в снижении стоимости технологии. В представленных расчетах эти оценки приняты в размере от 100 до 1000 долл./кВт.

Для традиционного генерирующего источника энергоснабжения использована разработанная авторами усовершенствованная оптимизационная модель, основанная на равенстве предельных доходов предельным издержкам, а также разработана стратегия управлением генерирующим объектом [9]. Необходимо отметить, что даже с учетом приведенных авторами оптимизационных расчетов в отношении традиционного источника энергоснабжения, водородная энергетика позволяет получить лучшие показатели энергетической эффективности [10].

Сопоставление децентрализованных технологий с централизованной системой показывает, что в определенном диапазоне величины участия в максимуме электрической нагрузки новые технологии могут оказаться более энергетически эффективными, чем в случае централизации энергоснабжения. Как показано на рис. 1, минимальный расход топлива в системе наблюдается при низких значениях мощностей новых технологий (для ТЭ до 30 % и для мини-ТЭЦ до 40 %).

Не менее важны экологические аспекты: для систем с ТЭ выбросы сокращаются на 20 % в диапазоне мощностей от 20 до 60 %, а для мини-ТЭЦ – на 30 % при мощностях 50-60 % от максимума спроса (рис. 2).

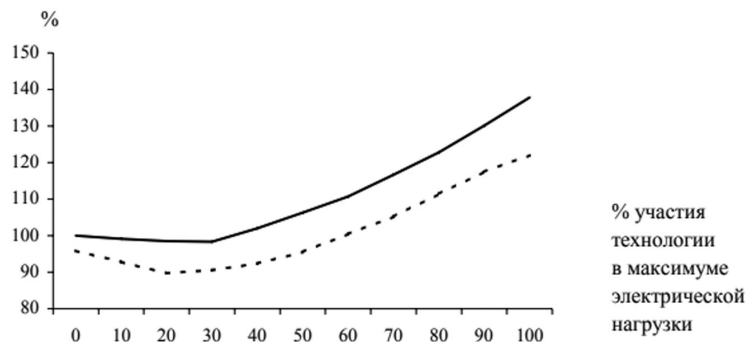
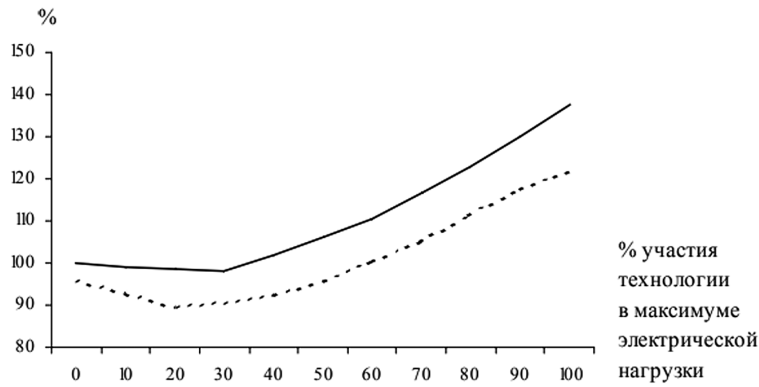


Рис. 1. Суммарный расход энергоресурсов. – топливный элемент, --- мини-ТЭЦ

Fig. 1. Total energy consumption. – fuel cell, --- mini-CHP



**Рис. 2.** Сопоставление выбросов CO<sub>2</sub> при соотношении максимальных электрических и тепловых нагрузок 1:3.

— топливный элемент, --- мини-ТЭЦ

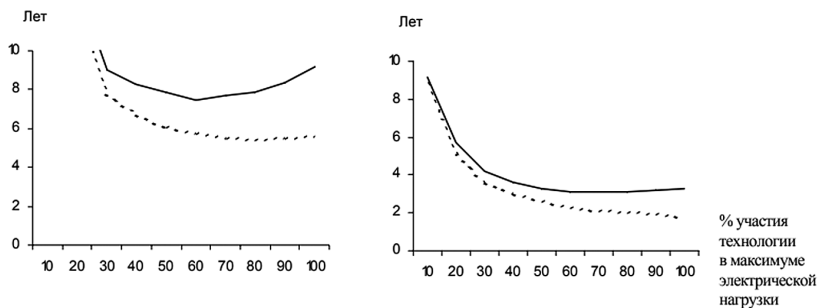
**Fig. 2.** Comparison of CO<sub>2</sub> emissions with a ratio of maximum electrical and thermal loads of 1:3.

— fuel cell, --- mini-CHP

При анализе экономической эффективности новых технологий децентрализованного энергоснабжения ставилась задача определения оптимальных параметров технологий на базе ТЭ и ГТУ (или ГД). В качестве критерия оценки эффективности использован показатель срока окупаемости инвестиционных затрат у потребителя за счет экономии затрат при отказе от использования централизованной схемы энергоснабжения.

На рис. 3 показано влияние доли участия новых технологий в обеспечении максимума электрической

нагрузки на срок окупаемости инвестиций. Расчеты показывают, что при увеличении мощности новых технологий срок окупаемости сокращается, достигая своего минимального значения при мощностях ТЭ около 60 % в случае потери летнего тепла и 80 %, когда летнее тепло продается на сторону. Для системы с ТЭ при стоимости ТЭ 500 долл./кВт трудно ожидать, что срок окупаемости инвестиций даже в случае продажи летнего тепла будет ниже пяти лет. При выбросах летнего тепла в атмосферу срок окупаемости увеличивается до семи лет и более.



**Рис. 3.** Зависимость срока окупаемости технологий децентрализованного энергоснабжения от доли участия в максимуме электрической нагрузки при соотношении максимальных электрических и тепловых нагрузок в размере 1:3.

— потери летнего тепла, --- продажа летнего тепла

**Fig. 3.** Dependence of the payback period of decentralized energy supply technologies on the share of participation in the maximum electrical load with a ratio of maximum electrical and thermal loads of 1:3.

— summer heat loss, --- sale of summer heat

Для мини-ТЭЦ в этом случае срок окупаемости составляет не более двух-трех лет при доле новой технологии свыше 50 % (нижнее значение относится к ситуации с продажей летнего тепла). Таким образом, технология мини-ТЭЦ на базе ГТУ или ГД при усред-

ненных значениях ожидаемых экономических параметров является более экономически эффективной.

На рис. 4 приведены результаты оценки влияния стоимости сетевой электроэнергии и природного газа на сроки окупаемости систем децентрализованного

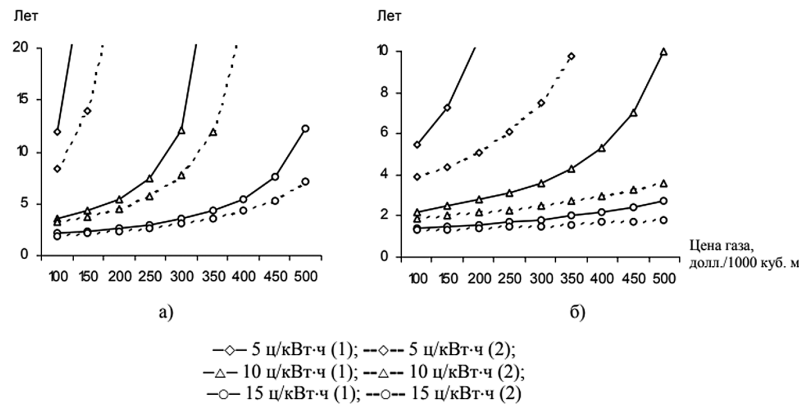
International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»



энергоснабжения, которые подтверждают сделанный ранее вывод о более высокой экономической эффек-

тивности технологии на базе мини-ТЭЦ по сравнению с ТЭ.



**Рис. 4.** Зависимость срока окупаемости системы с ТЭ (а) и ГТУ-ТЭЦ (б) от стоимости газа и электроэнергии в случае потерь летнего тепла (1) и его реализации потребителям (2)

**Fig. 4.** Dependence of the payback period of a system with thermal power plants (a) and gas turbine unit-CHP (b) on the cost of gas and electricity in the event of losses of summer heat (1) and its sale to consumers (2)

Важный вывод из сравнения этих графиков состоит в том, что для полноценной конкуренции ТЭ с мини-ТЭЦ в системах децентрализованного энергоснабжения стоимость ТЭ, работающих на водороде, получаемом из природного газа, должна быть существенно ниже, чем это принимается обычно, т.е. не 500 долл./кВт, а не более 100 долл./кВт. Только в этом случае можно говорить об абсолютной конкурентоспособности систем на базе ТЭ.

### Заключение

Сформулированы наиболее существенные полученные результаты, к которым следует отнести следующее:

1. Произведен анализ и оценка уровня внедрения водородной энергетики в современном мире.
2. Проанализированы климатические особенности и перспективы развития арктического региона с позиций возможности использования водородных технологий.
3. Показаны основные достоинства и недостатки применения водородных технологий на базе топливных элементов, перспективность применения топливных элементов в условиях Арктики.
4. Разработана усовершенствованная оптимизационная модель, основанная на равенстве предель-

ных доходов предельным издержкам для традиционного генерирующего источника энергоснабжения.

5. Проведен сравнительный анализ энергетической эффективности ТЭ в децентрализованных и централизованных системах энергоснабжения на основе ряда параметров: суммарного расхода энергоресурсов, сопоставления выбросов CO<sub>2</sub>, срока окупаемости технологий.

6. На основе исследования сделан вывод, что для полноценной конкуренции ТЭ с мини-ТЭЦ в системах децентрализованного энергоснабжения стоимость ТЭ, работающих на водороде, получаемом из природного газа, должна быть существенно ниже, чем это принимается обычно, т.е. не 500 долл./кВт, а не более 100 долл./кВт.

### Список литературы

- [1]. Хайман Д. Н. Современная микроэкономика: анализ и применение. В 2-х т. Пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1992. – 384 с.
- [2]. Меламед Л. Б., Сулов Н. И. Экономика энергетики: основы теории. – Новосибирск: Издательство СО Российской Академии наук, 2000. – 180 с.
- [3]. Marc A. Rosen and Dr Seama Koochi-Fayegh. Cogeneration and District Energy Systems: Modelling, Analysis and Optimization. 2016. – P. 344.

- [4]. Водородная энергетика: ключевые направления развития, пересмотр планов, инвестиции А. Пашкевич – ведущий маркетолог Группы «ДЕЛОВОЙ ПРОФИЛЬ» СФЕРА. НЕФТЬ И ГАЗ. – 1/2023 (88)

[5]. Sekretarev U. A., Chekalina T. V., Malosemov B. V. Administration Functioning Power Generation Companies by Criterion of Maximization Profit. // Symposium of papers the 6th International Forum on

Strategic Technol-ogy (IFOST-2011), Harbin University of Science and Technology. – Harbin, China, August 22-24, 2011. – Vol. 1, pp. 491-494.

[6]. Секретарев Ю. А. Оптимизация режимов работы генерирующей компании на базе ТЭЦ по выработке электроэнергии на основе критерия максимизации прибыли // Administration functioning power generation companies based on thermal electrical power station on maximization profit criterion. / Ю. А. Секретарев, Т. В. Мятёж (Т. В. Чекалина), Б. Н. Мошкин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 4 (546). – С. 82-88.

[7]. S. F. Ghaderi, A. Azadeh, B. Pourvalikhan Nokhandan, E. Fathi Behavioral simulation and optimization of generation companies in electricity markets by fuzzy cognitive map. – Expert Systems with Applications. – Volume 39, Issue 5, April 2012. – pp. 4635-4646.

[8]. Макконнелл К. Р., Брю С. Л. Экономика: принципы, проблемы и политика. В 2 т.: Пер. с англ. – Москва, 1997.

[9]. Ziqiang Zenga, Ehsan Nasric, Abdol Chinib, Robert Riesb, Jiuping Xu. A multiple objective decision making model for energy generation portfolio under fuzzy uncertainty: Case study of large scale investor-owned utilities in Florida. – Renewable Energy. – Volume 75. – March, 2015. – Pp. 224-242.

[10]. Alireza Fallahia, Reza Ebrahimib, S. F. Ghaderic Measuring efficiency and productivity change in power electric generation management companies by using data envelopment analysis: A case study. – Energy, Volume 36, Issue 11, November 2011. – Pp. 6398-6405.

[11]. Sinkov V. M., Bogoslovsky A. V. Optimization of energy systems modes. – Kyiv: Publishing House «Vishcha School», 1973. – 274 p.

[12]. Moshkin B. N., Sekretarev Yu. A., Chekalina T. V. Determination of the optimal electrical power of a station based on maximizing its income // Collection of scientific papers, ed. Dr. Tech. sciences, prof. A. I. Shalina, part II, Publishing house: NSTU, Novosibirsk, 2002.

[13]. Chekalina T.V. Ensuring of the generating company competitiveness at the energy market due to the assignment of the optimum states of thermal stations. // Proceedings of the 7th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology (KORUS-2003) June 28 – July 6, 2003, Ulsan, Korea, pp. 62-64.

[14]. Venikov V. A., Zhuravlev V. G., Filippova T. A. Optimization of modes of power plants and energy systems. M: «Energoatomizdat», 1990. – 347 p.

[15]. Gornshtein V. M. The most advantageous operating modes of hydroelectric power plants in energy systems. Gosenergoizdat, 1959. – 247 p.

[16]. Gamm A. Z., Golub I. I. Observability of electrical power systems. / Siberia energetic Institute; Rep. ed. Yu. N. Rudenko. – M.: Nauka, 1990. – 200 p.

[17]. Ventzel E. S. Operations research: Objectives, principles, methodology. M: Publishing House «Higher School», 2001. – 206 p.

[18]. Galperin V. M., Ignatiev S. M., Morgunov V. I. Microeconomics. Volume 1. – St. Petersburg: Economic School, 1997.

[19]. Seif Azghandi, Kenneth Mark Hopkinson, Kennard Robert Laviers. Benchmarking approach for empirical comparison of pricing models in DRMS. – The Journal of Engineering, 2016, pp. 8.

[20]. Christos A. Cogeneration: Technologies, Optimization and Implementation. – 2017. – P. 360.

[21]. Стырикович М. А., Синяк Ю. В., Чернавский С. Я. Дальние перспективы развития энергетики. Достижения и перспективы // Энергетика. Топливо, Вып. 3. 1981.

[22]. Padro C. E. C., Hydrogen Basics, Los Alamos National Laboratory, First Annual International Hydrogen Energy Implementation Conference. Santa Fe, New Mexico. February 17, 2005.

[23]. Hydrogen as an energy carrier, Royal Belgian Academy Council of Applied Science, April 2006, www.kvab.be/downloads/CAWET/Hydrogen\_energycarrier.pdf.

[24]. Heydorn B. Frequently asked questions about hydrogen, fuel cells and the hydrogen economy, SRI Consulting Business Intelligence, March 31, 2005. <http://www.sric-bi.com/consulting/briefings/FuelCellFAQ2005-03.pdf>.

[25]. Simbeck D. Long-Term Technology Pathways to Stabilization of Greenhouse Gas Concentrations, Aspen Global Change Institute, Colorado, July 6-13, 2003.

[26]. The Hydrogen and Fuel Cell Investor. Table of Fuel Cell Types, www.h2fc.com/table.html. 7. Padro C.E.G., Putsche V. Survey of the Economics of Hydrogen Technologies, National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-570-27079, September 1999.

[27]. Electric Power Research Institute (EPRI). Technical Brief: 2-MW Direct Carbonate Fuel Cell Demonstration, EPRI-TB-105733, October 1995.

[28]. Mugerwa M. N., Blomen L. J. M. J. Fuel Cell System Economics, Fuel Cell Systems, ed/ Blomen and Mugerwa. N.Y.: Plenum Press. 1993.

[29]. Bohme O., Haus U., Leidlich F., Salge H., Wendt H. Process Engineering and Cost Estimation of MCFC Power Plants, 1994 Fuel Cell Seminar, Program and Abstracts.

[30]. Gas Research Institute (GRI). GRI/EPRI Unite to Commercialize Advanced Fuel Cells for Power Systems, February 25, 1999.

[31]. Jollie D. and Adamson K.-A., Fuel Cell and Hydrogen Activity: Europe and USA, FC Expo, Tokyo, Japan, Jan. 25, 2006, www.fuelcelltoday.com

[32]. White Paper Summary of Interviews with Stationary Fuel Cell Manufacturers, Aug. 2002, stationaryfuelcells.org/DOCUMENTS/PDFdocs/Summary\_InterviewsAug2002.pdf

[33]. Fuel Cells. Renewable energy Policy Project, Oct. 2002, [www.repp.org/hydrogen/index.html](http://www.repp.org/hydrogen/index.html) 15. Adamson K.-A., Fuel Cell Market Survey: Large Stationary Applications 2006, Oct.2, 2006, [www.fuelcelltoday.com](http://www.fuelcelltoday.com)

[34]. Semikashev V. V. Electricity consumption and costs in a fully electrified house (foreign experience), «Electrics», No. 3, 2006.

[35]. Nekrasov A. S., Sinyak Yu. V. Macroeconomic forecast of long-term development of the fuel and energy complex of Russia // Spatial Economics, No. 1, 2005.

[36]. Sinyak Yu. V., Nekrasov A. S. Development of the Russian energy complex in the long term. Materials of the Open Seminar «Economic problems of the energy complex». 63rd meeting, September 27, 2005, M.: INP RAS, 2006. 19. Brodach M. M., Shilkin N. V. The use of fuel cells for energy supply of buildings, part 2, [www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=2404&version=print](http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2404&version=print).

[37]. FSUE MMPP SALYUT. Industrial gas turbine units, [www.salut.ru/output\\_prom\\_gtu.html](http://www.salut.ru/output_prom_gtu.html).

[38]. Водород в системах традиционной и альтернативной энергетики / [и др.]. // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 5, Ч. 1. – С. 10-44. – (Водородная экономика).

[39]. Волощенко Г. Н. Особенности работы высокотемпературного метан-воздушного топливного элемента // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 3, Ч. 2. – С. 10-17. – (Водородная экономика).

[40]. Гольцова Л. Ф. Мировое водородное движение: научные сообщества по водородной энергетике и водородному материаловедению – исторические и современные аспекты (Обзор) // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – № 1. – С. 198-211. – (Водородная экономика).

## References

[1]. Khaiman D. N. Modern microeconomics: analysis and application. In 2 volumes. Trans. from English – M.: Finance and Statistics, 1992. – 384 p.

[2]. Melamed L. B., Suslov N. I. Energy Economics: Fundamentals of Theory. – Novosibirsk: Publishing House of the Russian Academy of Sciences, 2000. – 180 p.

[3]. Marc A. Rosen and Dr Seama Koohi-Fayegh. Cogeneration and District Energy Systems: Modeling, Analysis and Optimization. 2016. – P. 344.

[4]. Hydrogen energy: key areas of development, revision of plans, investments A. Pashkevich – leading marketer of the BUSINESS PROFILE Group SPHERE. OIL AND GAS. – 1/2023 (88)

[5]. Sekretarev U. A., Chekalina T. V., Malosemov B. V. Administration Functioning Power Generation Companies by Criterion of Maximization Profit. // Symposium of papers the 6th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2011), Harbin University of Science and Technology. – Harbin, China, August 22-24, 2011. – Vol. 1, pp. 491-494.

[6]. Sekretarev Yu. A. Optimization of operating modes of a generating company based on thermal power plants for electricity generation based on the profit maximization criterion // Administration functioning power generation companies based on thermal electrical power station on maximization profit criterion. / Yu. A. Sekretarev, T. V. Mutiny (T. V. Chekalina), B. N. Moshkin // News of higher educational institutions. Electromechanics. – 2016. – No. 4 (546). – P. 82-88.

[7]. S. F. Ghaderi, A. Azadeh, B. Pourvalikhan Nokhandan, E. Fathi Behavioral simulation and optimization of generation companies in electricity markets by fuzzy cognitive map. – Expert Systems with Applications. – Volume 39, Issue 5, April 2012. – P. 4635-4646.

[8]. McConnell K. R., Brew S. L. Economics: principles, problems and politics. In 2 vols.: Per. from English – Moscow, 1997.

[9]. Ziqiang Zenga, Ehsan Nasric, Abdol Chinib, Robert Riesb, Jiuping Xu. A multiple objective decision making model for energy generation portfolio under fuzzy uncertainty: Case study of large scale investor-owned utilities in Florida. – Renewable Energy. – Volume 75. – March, 2015. – P. 224-242.

[10]. Alireza Fallahia, Reza Ebrahimib, S. F. Ghaderic Measuring efficiency and productivity change in power electric generation management companies by using data envelopment analysis: A case study. – Energy, Volume 36, Issue 11, November 2011. – P. 6398-6405.

[11]. Sinkov V. M., Bogoslovsky A. V. Optimization of energy systems modes. – Kyiv: Publishing House «Vishcha School», 1973. – 274 p.

[12]. Moshkin B. N., Sekretarev Yu. A., Chekalina T. V. Determination of the optimal electrical power of a station based on maximizing its income // Collection of scientific papers, ed. Dr. Tech. sciences, prof. A. I. Shalina, part II, Publishing house: NSTU, Novosibirsk, 2002.

[13]. Chekalina T. V. Ensuring of the generating company competitive-ness at the energy market due to the assignment of the optimum states of thermal stations. // Proceedings of the 7th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology (KORUS-2003) June 28 – July 6, 2003, Ulsan, Korea, pp. 62-64.

[14]. Venikov V. A., Zhuravlev V. G., Filippova T. A. Optimization of modes of power plants and energy systems. M: «Energoatomizdat», 1990. – 347 p.

[15]. Gornshtein V. M. The most advantageous operating modes of hydroelectric power plants in energy systems. Gosenergoizdat, 1959. – 247 p.

[16]. Gamm A. Z., Golub I. I. Observability of electrical power systems. / Siberia energetic Institute;



Rep. ed. Yu. N. Rudenko. – M.: Nauka, 1990. – 200 p.

[17]. Ventzel E. S. Operations research: Objectives, principles, methodology. M: Publishing House «Higher School», 2001. – 206 p.

[18]. Galperin V. M., Ignatiev S. M., Morgunov V. I. Microeconomics. Volume 1. – St. Petersburg: Economic School, 1997.

[19]. Seif Azghandi, Kenneth Mark Hopkinson, Kennard Robert Laviers. Benchmarking approach for empirical comparison of pricing models in DRMS. – The Journal of Engineering, 2016, pp. 8.

[20]. Christos A. Cogeneration: Technologies, Optimization and Implementation. – 2017. – P. 360.

[21]. Styrikovich M. A., Sinyak Yu. V., Chernavsky S. Ya. Long-term prospects for the development of energy. Achievements and prospects // Energy. Fuel, Vol. 3. 1981.

[22]. Padro C. E. C., Hydrogen Basics, Los Alamos National Laboratory, First Annual International Hydrogen Energy Implementation Conference. Santa Fe, New Mexico. February 17, 2005.

[23]. Hydrogen as an energy carrier, Royal Belgian Academy Council of Applied Science, April 2006, www.kvab.be/downloads/CAWET/Hydrogen\_energycarrier.pdf.

[24]. Heydorn B. Frequently asked questions about hydrogen, fuel cells and the hydrogen economy, SRI Consulting Business Intelligence, March 31, 2005. <http://www.sric-bi.com/consulting/briefings/FuelCellFAQ2005-03.pdf>.

[25]. Simbeck D. Long-Term Technology Pathways to Stabilization of Greenhouse Gas Concentrations, Aspen Global Change Institute, Colorado, July 6-13, 2003.

[26]. The Hydrogen and Fuel Cell Investor. Table of Fuel Cell Types, www.h2fc.com/table.html. 7. Padro C.E.G., Putsche V. Survey of the Economics of Hydrogen Technologies, National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-570-27079, September 1999.

[27]. Electric Power Research Institute (EPRI). Technical Brief: 2-MW Direct Carbonate Fuel Cell Demonstration, EPRI-TB-105733, October 1995.

[28]. Mugerwa M. N., Blomen L. J. M. J. Fuel Cell System Economics, Fuel Cell Systems, ed/ Blomen and Mugerwa. N.Y.: Plenum Press. 1993.

[29]. Bohme O., Haus U., Leidlich F., Salge H., Wendt H. Process Engineering and Cost Estimation of

MCFC Power Plants, 1994 Fuel Cell Seminar, Program and Abstracts.

[30]. Gas Research Institute (GRI). GRI/EPRI Unite to Commercialize Advanced Fuel Cells for Power Systems, February 25, 1999.

[31]. Jollie D. and Adamson K.-A., Fuel Cell and Hydrogen Activity: Europe and USA, FC Expo, Tokyo, Japan, Jan. 25, 2006, www.fuelcelltoday.com

[32]. White Paper Summary of Interviews with Stationary Fuel Cell Manufacturers, Aug. 2002, stationaryfuel-cells.org/DOCUMENTS/PDFdocs/Summary\_InterviewsAug2002.pdf

[33]. Fuel Cells. Renewable energy Policy Project, Oct. 2002, www.repp.org/hydrogen/index.html 15. Adamson K.-A., Fuel Cell Market Survey: Large Stationary Applications 2006, Oct.2, 2006, www.fuelcelltoday.com

[34]. Semikashev V. V. Electricity consumption and costs in a fully electrified house (foreign experience), «Electrics», No. 3, 2006.

[35]. Nekrasov A. S., Sinyak Yu. V. Macroregional forecast of long-term development of the fuel and energy complex of Russia // Spatial Economics, No. 1, 2005.

[36]. Sinyak Yu. V., Nekrasov A. S. Development of the Russian energy complex in the long term. Materials of the Open Seminar «Economic problems of the energy complex». 63rd meeting, September 27, 2005, M.: INP RAS, 2006. 19. Brodach M. M., Shilkin N. V. The use of fuel cells for energy supply of buildings, part 2, www.abok.ru/for\_spec/articles.php?nid=2404&version=print.

[37]. FSUE MMPP SALYUT. Industrial gas turbine units, www.salut.ru/output\_prom\_gtu.html.

[38]. Hydrogen in traditional and alternative energy systems / [etc.]. // Alternative energy and ecology. – 2013. – No. 5, Part 1. – P. 10-44. – (Hydrogen economy).

[39]. Voloshchenko G. N. Features of the operation of a high-temperature methane-air fuel cell // Alternative energy and ecology. – 2013. – No. 3, Part 2. – P. 10-17. – (Hydrogen economy).

[40]. Goltsova L. F. World hydrogen movement: scientific communities on hydrogen energy and hydrogen materials science - historical and modern aspects (Review) // Alternative energy and ecology. – 2014. – No. 1. – P. 198-211. – (Hydrogen economy).

Транслитерация по BSI





ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА

HYDROGEN ECONOMY

НОВЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ  
АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

NEW STRUCTURAL MATERIALS FOR RENEWABLE ENERGY STRUCTURES

Статья поступила в редакцию 11.03.24 Ред. Пер. № 315-003-24

The article has entered in publishing office 11.03.24 Ed. Reg. No. 315-003-24

УДК 621.3.049.779



**ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДЕЛИТЕЛЯ  
НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ НАКОПИТЕЛЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ  
И ВОДОРОДНЫХ БАТАРЕЙ**

**Драгунов В. П.<sup>1</sup>, Остертак Д. И.<sup>1</sup>, Казымов Д. М.<sup>1</sup>, Коваленко Е. Ю.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия.

e-mail: ostertak@corp.nstu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.071-080

Заключение совета рецензентов: 22.03.24

Заключение совета экспертов: 26.03.24

Принято к публикации: 29.03.24

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования бестрансформаторного диодно-конденсаторного делителя напряжения для накопителей кинетической энергии и водородных батарей. Исследовано влияние количества ячеек делителя, длительности цикла, сопротивления нагрузки, обратных емкостей диодов и емкостей дополнительных конденсаторов на максимальное и минимальное напряжение нагрузки в установившемся режиме. Установлено, что при увеличении сопротивления нагрузки коэффициент деления напряжения не сохраняется. В результате при изменении параметров схемы делителя требуется повторная оценка коэффициента деления. Установлено, что такое поведение параметров делителя обусловлено наличием обратных емкостей диодов. Для расчета параметров исследуемых цепей бестрансформаторного диодно-конденсаторного делителя получены аналитические выражения, показано их хорошее согласие с экспериментальными данными. Таким образом, эти выражения могут быть использованы на этапе предварительного проектирования систем, использующих бестрансформаторные диодно-конденсаторные делители напряжения. В целом, проведенный анализ и развиваемый подход позволяют существенно сузить диапазон поиска необходимых параметров системы на этапе предварительного проектирования и сократить время проектирования.

**Ключевые слова:** делитель напряжения, обратная емкость диода, переключаемые конденсаторы, сопротивление нагрузки, энергетический харвестер.

Драгунов В. П., Остертак Д. И., Казымов Д. М., Коваленко Е. Ю. Особенности функционирования делителя напряжения для накопителей кинетической энергии и водородных батарей // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*, 03(420) 2024, с. 71-80

Dragunov V. P., Ostertak D. I., Kazymov D. M., Kovalenko E. Y. Features of the voltage divider for kinetic energy storage devices and hydrogen batteries // *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 03 (420) 2024, pp. 71-80





# FEATURES OF THE VOLTAGE DIVIDER FOR KINETIC ENERGY STORAGE DEVICES AND HYDROGEN BATTERIES

*Dragunov V. P.<sup>1</sup>, Ostertak D. I.<sup>1</sup>, Kazymov D. M.<sup>1</sup>, Kovalenko E. Y.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia  
e-mail: ostertak@corp.nstu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.071-080

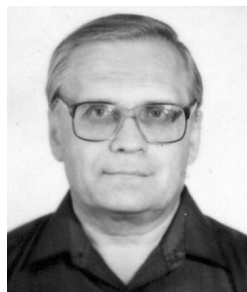
Referred: 22.03.24

Received in revised form: 26.03.24

Accepted: 29.03.24

The results of theoretical and experimental study of a transformerless diode-capacitor voltage divider for kinetic energy harvesters are presented. The influence of the number of the divider cells, cycle duration, load resistance, diode reverse capacitances and capacitances of additional capacitors on the maximum and minimum load voltage in steady-state mode is investigated. It has been found that when the load resistance increases, the voltage division coefficient doesn't remain the same. As a result, if the divider circuit parameters change, it is necessary to re-evaluate the division coefficient. It has been established that such behavior of the divider parameters is due to the presence of the diode reverse capacitances. Analytical expressions were obtained to calculate the parameters of the studied circuits of the transformerless diode-capacitor divider, their good agreement with experimental data is shown. Thus, these expressions can be used at the preliminary design stage of systems using transformerless diode-capacitor voltage dividers. In general, the analysis carried out and the approach being developed make it possible to significantly narrow the range of searching for the necessary system parameters at the preliminary design stage and reduce the design time.

**Keywords:** voltage divider; diode reverse capacitance; switchable capacitors; load resistor; energy harvester.



Драгунов  
Валерий Павлович  
Valery P. Dragunov

## Сведения об авторе:

**Место работы:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники.

**Образование:** Иркутский государственный университет.

**Научное звание:** доцент.

**Ученая степень:** доктор технических наук.

**Область научных интересов:** наноэлектроника, физика низкоразмерных структур, нано- и микросистемная техника.

**Публикации:** более 190 научных трудов, 15 изобретений.

Индекс Хирша РИНЦ – 18

## Author information:

**Place of work:** Novosibirsk State Technical University, professor of the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics.

**Education:** Irkutsk State University.

**Scientific title:** Associate Professor.

**Academic degree:** Doctor of Technical Sciences.

**Scientific interests area:** nanoelectronics, physics of low-dimension structures, nano- and microsystem engineering.

**Publications:** more than 190 scientific works, 15 inventions.

Hirsch index – 18



Остертак  
Дмитрий Иванович  
Dmitriy I. Ostertak

**Сведения об авторе:**

**Место работы:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», заведующий кафедрой полупроводниковых приборов и микроэлектроники.

**Образование:** Новосибирский государственный технический университет (2006).

**Научное звание:** доцент.

**Ученая степень:** кандидат технических наук.

**Область научных интересов:** полупроводниковые технологии, нано- и микросистемная техника.

**Публикации:** более 90 научных трудов, 6 изобретений.

Индекс Хирша РИНЦ – 12

**Author information:**

**Place of work:** Novosibirsk State Technical University, head of the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics.

**Education:** Novosibirsk State Technical University.

**Scientific title:** Associate Professor.

**Academic degree:** Candidate of Technical Sciences.

**Research interests:** semiconductor technology, nano- and microsystem engineering.

**Publications:** more than 90 scientific works, 6 inventions.

Hirsch index – 12



Казымов  
Дмитрий Максимович  
Dmitriy M. Kazymov

**Сведения об авторе:**

**Место работы:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», лаборант-исследователь кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники.

**Образование:** Новосибирский государственный технический университет.

**Область научных интересов:** полупроводниковые технологии, нано- и микросистемная техника.

**Author information:**

**Place of work:** Novosibirsk State Technical University, laboratory assistant of the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics.

**Education:** Novosibirsk State Technical University.

**Research interests:** instrumentation and technological modeling of semiconductor devices and microsystem technology.



Коваленко  
Екатерина Юрьевна  
Ekaterina Y. Kovalenko

**Сведения об авторе:**

**Место работы:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», лаборант-исследователь кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники.

**Образование:** Новосибирский государственный технический университет.

**Область научных интересов:** полупроводниковые технологии, нано- и микросистемная техника.

**Публикации:** 1 публикация в издании, индексируемом Scopus.

**Information about the author: Education:**

**Place of work:** Novosibirsk State Technical University, laboratory assistant of the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics.

**Education:** Novosibirsk State Technical University.

**Research interests:** semiconductor technology, nano- and microsystem engineering.

**Publications:** 1 publication in journal indexed by Scopus.



## Введение

За последние 20 лет получение электрической энергии из источников в окружающей среде для питания маломощных электронных устройств привлекло большое внимание среди ученых [1-14]. Сбор кинетической или механической энергии все чаще исследуется как потенциальный метод замены или продления срока службы батарей и топливных элементов для различных электронных систем [1, 5, 9, 11]. В настоящее время активно разрабатываются и исследуются автономные источники питания на основе электростатических микроэлектромеханических преобразователей энергии (МЭМП), размещаемых непосредственно в месте нахождения автономных устройств [15-21].

Для передачи электрической энергии, полученной с помощью МЭМП, в нагрузку преобразователь объединяется с соответствующими электрическими цепями включения [22-26]. Такая система в целом представляет собой микрогенератор (МГ). Разработка и совершенствование МЭМП и МГ направлены в первую очередь на увеличение генерируемой электрической мощности. Для увеличения вырабатываемой электрической мощности чаще всего разрабатываются МГ с максимально возможным рабочим напряжением, поскольку энергия, которую можно накопить в конденсаторе и, соответственно, извлечь из него, пропорциональна квадрату напряжения на нем [27-32].

Однако большинство современных электронных устройств используют напряжения питания в диапазоне от 3 до 15 В, поэтому подключение их непосредственно к «высоковольтному» МГ требует наличия согласующего устройства, понижающего его выходное напряжение [33-35].

Для понижения выходного напряжения МГ используются диоды Зенера [36-38], периодическое подключение МГ к нагрузке (ШИМ-преобразование)

[39], схемы на основе переключаемых конденсаторов [37, 40]. Интересное решение было предложено и исследовано в [41], где используется как понижение напряжения, так и периодическое подключение к нагрузке, что позволяет изменять длительность подключения МГ к нагрузке и, соответственно, среднее напряжение на нагрузке за период преобразования. Однако в предложенных схемах в любом случае одновременно со снижением напряжения происходит потеря части вырабатываемой энергии. Поэтому продолжается поиск новых схем для решения этой проблемы.

В случае электростатических МГ требуется преобразование высокого переменного напряжения в низкое постоянное. Такое преобразование может быть осуществлено с помощью трансформатора. Однако это значительно ухудшит массогабаритные показатели МГ. В связи с этим наиболее перспективным представляется бестрансформаторное преобразование переменного напряжения в постоянное.

В литературе имеется ряд работ по бестрансформаторным делителям напряжения [42, 43]. Однако в них предполагается, что первичный источник напряжения имеет бесконечную мощность (бесконечная шина питания), в то время, как электростатические МГ развивают значительно меньшую мощность.

В данной работе представлены результаты исследования по разработке делителя напряжения на переключаемых конденсаторах для электростатических микроэлектромеханических генераторов и других автономных электронных систем с пониженным выходным напряжением. Особый акцент сделан на качественном представлении и аналитических моделях, описывающих поведение системы в зависимости от параметров.

Таблица сокращений

Таблица сокращений	
Аббревиатуры	
МГ	Микрогенератор
МЭМП	Микроэлектромеханический преобразователь
ШИМ	Широтно-импульсная модуляция
Буквы греческого алфавита	
$\Delta t$	Промежуток времени, в течение которого все выключатели выключены так, чтобы не было перекрытия включенных пар
$\tau_{ch}$	Длительность этапа заряда
$\tau_{dis}$	Длительность этапа разряда
Буквы латинского алфавита	
$C_1$	Емкость первого конденсатора

$C_i$	Емкость одного из конденсаторов делителя напряжения
$C_L$	Выходной конденсатор
$C_s$	Буферный конденсатор
$D_{ch}$	Заряжающий диод
$D_{dis}$	Разряжающий диод
$gv$	Безразмерный параметр, характеризующий зависимость максимального напряжения на нагрузке от цикла работы делителя
$N$	Коэффициент деления для делителя напряжения
$R_L$	Сопротивление нагрузки
$Sw_0$	Нулевой переключатель
$Sw_1$	Первый переключатель
$Sw_2$	Второй переключатель

$Sw_3$	Третий переключатель
$Sw_4$	Четвертый переключатель
$T$	Длительность цикла
$V_0$	Входное напряжение
$V_{L,max,m}$	Максимальное напряжение на нагрузке
$V_{L,min,m}$	Минимальное напряжение на нагрузке
<i>Физические величины</i>	
$c$	секунда, единица измерения времени

В	Вольт, единица измерения электрического напряжения
Ом	Ом, единица измерения сопротивления
пА	$10^{-12}$ Ампер, единица измерения электрического тока
нФ	$10^{-9}$ Фарад, единица измерения электрической емкости
пФ	$10^{-12}$ Фарад, единица измерения электрической емкости

### 1. Физико-математическая модель

Для анализа работы делителя напряжения с первичным источником питания ограниченной мощности была использована схема, представленная на рис. 1. Она содержит  $N$  конденсаторов  $C_i$ ,  $(N - 1)$  заряжающих диодов  $D_{ch}$  и  $2N$  разряжающих диодов  $D_{dis}$ .

В этой схеме в те промежутки времени, когда включены переключатели  $Sw_3$  и  $Sw_4$ , включен и переключатель  $Sw_0$ . Здесь конденсатор  $C_s$  заряжается от идеального источника напряжения  $V_0$ . Затем выключатели  $Sw_0$ ,  $Sw_3$  и  $Sw_4$  выключаются, а выключатели  $Sw_1$  и  $Sw_2$  включаются. При этом конденсатор  $C_s$  подключается к делителю и отдает ему часть своего заряда.

Используя модель идеальных диодов и предполагая, что все конденсаторы  $C_i$  одинаковы и равны  $C_1$ , можно показать, что при периодическом подключении переключателей с периодом  $T$  зависимость максимального напряжения на  $R_L$  (в начале цикла) от номера цикла работы делителя может быть

представлена в виде

$$V_{L,max,m} = V_0 \frac{NC_s}{C_1 + NC_s} \frac{C_1}{NC_1 + C_L} \frac{1 - gv^m}{1 - gv}$$

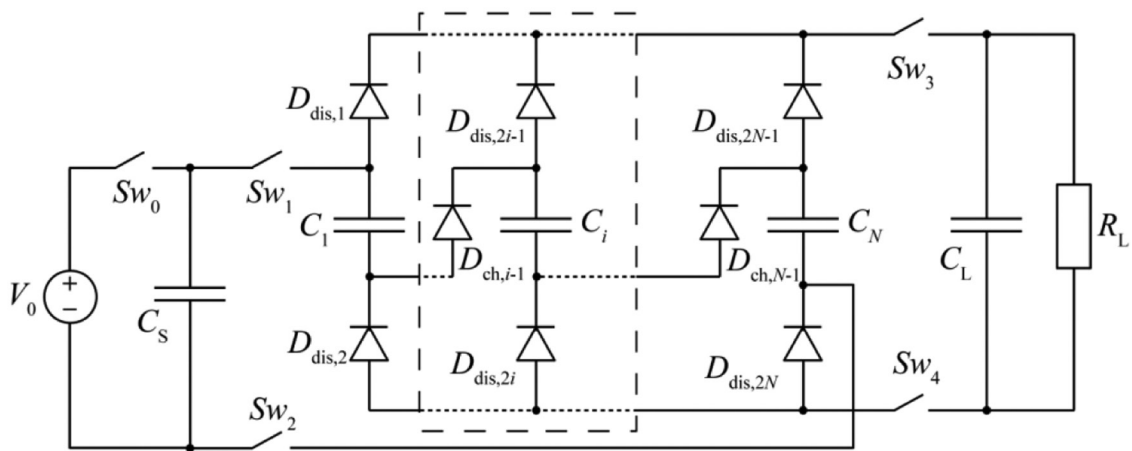
где

$$gv = \frac{1}{C_1 N + C_L} \left( \frac{C_1^2 N}{C_1 + NC_s} + C_L \exp\left(\frac{-(T - \tau_{dis})}{R_L C_L}\right) \right) \times \exp\left(\frac{-\tau_{dis}}{R_L (C_1 N + C_L)}\right)$$

$m$  – номер цикла,  $T = (\tau_{ch} + \tau_{dis} + \Delta\tau)$  – длительность цикла.

В течение рабочего цикла напряжение нагрузки будет изменяться от максимального до минимального значения

$$V_{L,min,m} = V_{L,max,m} \exp\left(\frac{-\tau_{dis}}{R_L (C_1 N + C_L)}\right) \exp\left(\frac{-(T - \tau_{dis})}{R_L C_L}\right)$$



**Рис. 1.** Электрическая схема бестрансформаторного N-ступенчатого диодно-конденсаторного делителя напряжения с первичным источником питания ограниченной мощности  
**Fig. 1.** The electric circuit of the transformerless diode-capacitor voltage divider with a primary power source of unlimited power

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»



## 2. Экспериментальное исследование

Для проведения экспериментальных исследований была собрана измерительная установка, соответствующая схеме делителя напряжения, приведенной на рис. 5. Емкость конденсаторов делителя  $C_1$  и нагрузочного конденсатора  $C_L$  составляла 1 нФ, емкость  $C_s = 15,6$  нФ. Напряжение первичного источника питания составляло 10 В. Длительность цикла преобразования варьировалась от 0,05 до 0,2 с. Фотография измерительной установки приведена на рис. 2.

На рис. 3 приведены зависимости максимального

и минимального напряжений на  $R_L$  в установившемся режиме от сопротивления нагрузки, измеренного (маркеры) и рассчитанного (линии) при  $V_0 = 10$  В,  $\tau_{ch} = \tau_{dis} = 0,048$  с,  $T = 0,1$  с для делителя с  $N = 3$ .

Из рис. 3 видно, что при больших сопротивлениях нагрузки зависимости асимптотически приближаются к напряжению  $V_0$ , но не к напряжению  $V_0/N$ , т.е. делитель работает не так, как предсказывается в литературе. Неожиданным оказалось резкое увеличение выходного напряжения при  $R_L > 10^{10}$  Ом.

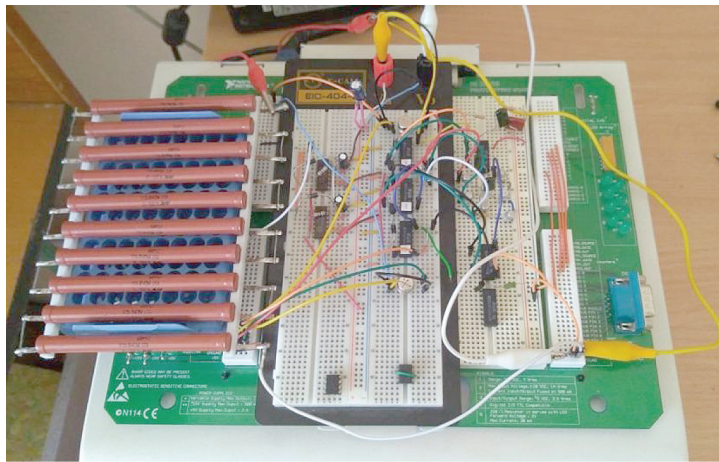


Рис. 2. Фотография экспериментальной установки  
Fig. 2. Photograph of the experimental setup

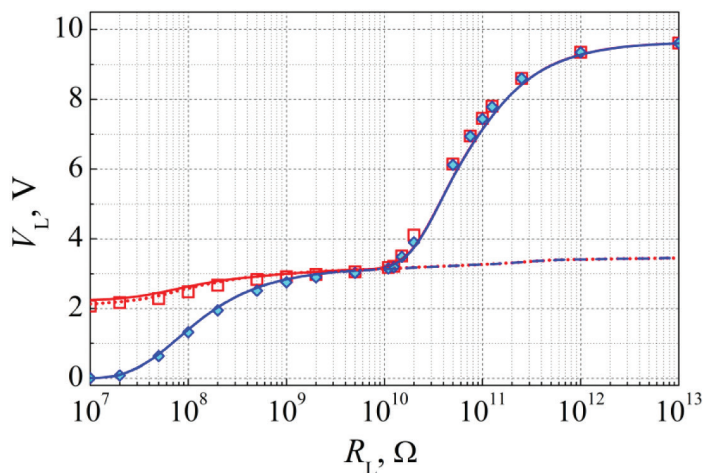


Рис. 3. Зависимости максимального (красный) и минимального (синий) напряжений на  $R_L$  в установившемся режиме от сопротивления нагрузки. Маркеры – экспериментальные данные, линии – расчеты

Fig. 3. The dependences of the maximum (red) and minimum (blue) voltages on  $R_L$  in steady-state mode versus the load resistance. Markers – experimental data, lines – calculations

## Заключение

В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований обнаружено, что при увеличении сопротивления нагрузки зависимости напряжения на нагрузке асимптотически стремятся не к значению  $V_0/N$ , а к значению  $V_0$ . То есть коэффициент деления напряжения не остается неизменным при изменении сопротивления нагрузки. В результате при изменении параметров схемы делителя необходимо каждый раз заново оценивать коэффициент деления. Установлено, что такое поведение параметров делителя обусловлено наличием обратных емкостей диодов. Получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать параметры исследуемых схем бестрансформаторных диодно-конденсаторных делителей на

основе переключаемых конденсаторов. Показано хорошее согласие между теоретическими и экспериментальными данными. Таким образом, данные аналитические выражения могут быть использованы на этапе предварительного проектирования систем с использованием бестрансформаторных диодно-конденсаторных делителей напряжения.

## Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (номер проекта: 23-29-10182) и Правительства Новосибирской области (номер проекта: 0000005406995998235120812 / № п-58).

## Список литературы

- [1]. Shaikh F. K., Zeadally S. Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 55. – P. 1041-1054.
- [2]. Lundblad T., Taljegard M., Johnsson F. Centralized and decentralized electrolysis-based hydrogen supply systems for road transportation – A modeling study of current and future costs // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2023. – Vol. 48, № 12. – P. 4830-4844.
- [3]. Linares J. I., Herranz L. E., Moratilla B. Y. Maximum efficiency of direct energy conversion systems. Application to fuel cells // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2011. – Vol. 36, № 16. – P. 10027-10032.
- [4]. Jia Y., Xue A., Zhou Z., Wu Z., Chen J., Ma K., et al. Magnetostrictive/piezoelectric drum magnetoelectric transducer for H<sub>2</sub> detection // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2013. – Vol. 38. – P. 14915-14919.
- [5]. Huang X., Zhong T. Hydrokinetic energy harvesting from flow-induced vibration of a hollow cylinder attached with a bi-stable energy harvester // *Energy Conversion and Management*. – 2023. – Vol. 278, Art. – No. 116718.
- [6]. Hu T., Wang H., Harmon W., Bamgboje D., Wang Z. -L. Current Progress on Power Management Systems for Triboelectric Nanogenerators // *IEEE Trans Power Electron*. – 2022. – Vol. 37. – P. 9850-9864.
- [7]. Li Z., Yan Z., Luo J., Yang Z. Performance comparison of electromagnetic energy harvesters based on magnet arrays of alternating polarity and configuration // *Energy Conversion and Management*. – 2019. – Vol. 179. – P. 132-140.
- [8]. Zhou S., Cao J., Inman D. J., Lin J., Liu S., Wang Z. Broadband tristable energy harvester: Modeling and experiment verification // *Applied Energy*. – 2014. – Vol. 133. – P. 33-39.
- [9]. Wang J., Zhou S., Zhang Z., Yurchenko D. High-performance piezoelectric wind energy harvester with Y-shaped attachments // *Energy Conversion and Management*. – 2019. – Vol. 181. – P. 645-652.
- [10]. Jeong S. Y., Jung H. J., Jabbar H., Hong S. K., Ahn J. H., Sung T. H. Design of a multi-array piezoelectric energy harvester for a wireless switch // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – Vol. 41. – P. 12696-12703.
- [11]. Song Y., Yang C. H., Hong S. K., Hwang S. J., Kim J. H., Choi J. Y. et al. Road energy harvester designed as a macro-power source using the piezoelectric effect // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – Vol. 41. – P. 12563-12568.
- [12]. Kurt E., Cottone F., Uzun Y., Orfei F., Mattarelli M., Özhan D. Design and implementation of a new contactless triple piezoelectrics wind energy harvester // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2017. – Vol. 42. – P. 17813-17822.
- [13]. Shevtsov S., Chang S. -H. Modeling of vibration energy harvesting system with power PZT stack loaded on Li-Ion battery // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – Vol. 41. – P. 12618-12625.
- [14]. Scamman D., Newborough M., Bustamante H. Hybrid hydrogen-battery systems for renewable off-grid telecom power // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2015. – Vol. 40. – P. 13876-13887.
- [15]. Tao K., Lye S. W., Miao J., Hu X. Design and implementation of an out-of-plane electrostatic vibration energy harvester with dual-charged electret plates // *Microelectronic Engineering*. – 2015. – Vol. 135. – P. 32-37.
- [16]. Khan F. U., Qadir M. U. State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting // *J Micromech Microeng*. – 2016. – Vol. 26. – P. 103001.
- [17]. Zhao C., Yang Y., Upadrashta D., Zhao L. Design, modeling and experimental validation of a low-frequency cantilever triboelectric energy harvester // *Energy*. – 2021. – Vol. 214, Art. – No. 118885.



[18]. Pace G., Serri M., Castillo A. E. D. R., Ansaldo A., Lauciello S., Prato M. et al. Nitrogen-doped graphene based triboelectric nanogenerators // *Nano Energy*. – 2021. – Vol. 87, Art. – No. 106173.

[19]. Toyabur Rahman M., Soheli Rana S., Salauddin Md., Maharjan P., Bhatta T., Kim H. et al. A highly miniaturized freestanding kinetic-impact-based non-resonant hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator for human induced vibrations harvesting // *Applied Energy*. – 2020. – Vol. 279, Art. – No. 115799.

[20]. Lo Monaco M., Russo C., Somà A. Numerical and experimental performance study of two-degrees-of-freedom electromagnetic energy harvesters // *Energy Conversion and Management: X*. – 2023. – Vol. 18, Art. – No. 100348.

[21]. Lagomarsini C., Jean-Mistral C., Monfray S., Sylvestre A. Optimization of an electret-based soft hybrid generator for human body applications // *Smart Mater Struct*. – 2019. – Vol. 28, Art. – No. 104003.

[22]. Dragunov V. P., Ostertak D. I. Microelectromechanical converters // *Russian Microelectronics*. – 2012. – Vol. 41. – P. 107-121.

[23]. Torres E. O., Rincon-Mora G. A. A 0,7- $\mu\text{m}$  BiCMOS Electrostatic Energy-Harvesting System IC // *IEEE J Solid-State Circuits*. – 2010. – Vol. 45. – P. 483-496.

[24]. Truong B. D., Le C. P., Halvorsen E., Roundy S. Power-electronic-interface topology for MEMS energy harvesting with multiple transducers // *J. Phys: Conf Ser*. – 2018. – Vol. 1052, Art. – No. 012074.

[25]. Phan T. N., Azadmehr M., Le C. P., Halvorsen E. Low power electronic interface for electrostatic energy harvesters // *J. Phys: Conf Ser*. – 2015. – Vol. 660, Art. – No. 012087.

[26]. Dragunov V. P., Ostertak D. I., Pelmenev K. G., Sinitskiy R. E., Dragunova E. V. Electrostatic vibrational energy converter with two variable capacitors // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2021. – Vol. 318, P. 112501.

[27]. Asanuma H., Oguchi H., Hara M., Yoshida R., Kuwano H. Ferroelectric dipole electrets for output power enhancement in electrostatic vibration energy harvesters // *Applied Physics Letters*. – 2013. – Vol. 103, Art. – No. 162901.

[28]. Jie Wei, Risquez S., Mathias H., Lefevre E., Costa F. Simple and efficient interface circuit for vibration electrostatic energy harvesters // *2015 IEEE SENSORS, Busan*: – IEEE; 2015, p. 1-4.

[29]. Nintanavongsa P., Muncuk U., Lewis D. R., Chowdhury K. R. Design Optimization and Implementation for RF Energy Harvesting Circuits // *IEEE J Emerg Sel Topics Circuits Syst*. – 2012. – Vol. 2. – P. 24-33.

[30]. Ayudhya R. S. N. A switched-capacitor Dickson charge pumps for high-voltage high power applications //

2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering, Sapporo, Japan: IEEE; 2014. – P. 1147-1150.

[31]. de Queiroz A. C. M., Macedo de Oliveira Filho L. C. Unipolar symmetrical variable-capacitance generators for energy harvesting // *2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, Boston, MA: IEEE, 2017, pp. 221-224.

[32]. Truong B. D., Le C. P., Halvorsen E. Comparative performance of voltage multipliers for MEMS vibration-based energy harvesters // *J Phys: Conf Ser* 2018. – Vol. 1052, Art. – No. 012118.

[33]. de Queiroz A. C. M. Analysis of the operation of a regenerative electrostatic energy harvester // *2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Lisbon, Portugal: IEEE, 2015, p. 1074-1077.

[34]. Jayaweera H. M. P. C., Muhtaroglu A. Model Based Optimization of Integrated Low Voltage DC-DC Converter for Energy Harvesting Applications // *J Phys: Conf Ser*. – 2016. – Vol. 773, Art. – No. 012085.

[35]. Bedier M., Basset P., Galayko D. A Smart Load Interface and Voltage Regulator for Electrostatic Vibration Energy Harvester // *J Phys: Conf Ser* 2016. – Vol. 773, Art. – No. 012105.

[36]. Dragunov V., Dorzhiev V. Electrostatic vibration energy harvester with increased charging current // *J Phys: Conf Ser*. – 2013. – Vol. 476, Art. – No. 012115.

[37]. de Queiroz A. C. M. Biased capacitive divider electrostatic generators for energy harvesting // *2017 IEEE 8th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS)*, Bariloche, Argentina: IEEE, 2017, p. 1-4.

[38]. de Queiroz A. C. M., De Menezes N. A. T. Energy harvesting with pairs of variable capacitors without control circuits // *Analog Integr Circ Sig Process*. – 2018. – Vol. 97. – P. 533-544.

[39]. de Queiroz A. C. M. Steady-State Analysis of Electronic Electrostatic Generators // *2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Florence: IEEE, 2018, p. 1-5.

[40]. Mahboubi F. E., Bafleur M., Boitier V., Alvarez A., Colomer J., Miribel P. et al. Self-Powered Adaptive Switched Architecture Storage // *J Phys: Conf Ser*. – 2016. – Vol. 773, Art. – No. 012103.

[41]. Karami A., Galayko D., Basset P. Series-Parallel Charge Pump Conditioning Circuits for Electrostatic Kinetic Energy Harvesting // *IEEE Trans Circuits Syst I*. – 2017. – Vol. 64. – P. 227-240. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2016.2603064>.

[42]. De Michele G. Protected transformerless AC to DC power converter. Patent US 6061259 A. 2000.

[43]. Neil J., Francis J. Systems and Methods for Providing a Transformerless Power Supply. Patent US 20160233761 A1. 2016.



## References

- [1]. Shaikh F. K., Zeadally S. Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 55. – P. 1041-1054.
- [2]. Lundblad T., Taljegard M., Johnsson F. Centralized and decentralized electrolysis-based hydrogen supply systems for road transportation – A modeling study of current and future costs // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2023. – Vol. 48, № 12. – P. 4830-4844.
- [3]. Linares J. I., Herranz L. E., Moratilla B. Y. Maximum efficiency of direct energy conversion systems. Application to fuel cells // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2011. – Vol. 36, № 16. – P. 10027-10032.
- [4]. Jia Y., Xue A., Zhou Z., Wu Z., Chen J., Ma K. et al. Magnetostrictive/piezoelectric drum magnetoelectric transducer for H<sub>2</sub> detection // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2013. – Vol. 38. – P. 14915-14919.
- [5]. Huang X., Zhong T. Hydrokinetic energy harvesting from flow-induced vibration of a hollow cylinder attached with a bi-stable energy harvester // *Energy Conversion and Management*. – 2023. – Vol. 278, Art. – No. 116718.
- [6]. Hu T., Wang H., Harmon W., Bamgboje D., Wang Z. -L. Current Progress on Power Management Systems for Triboelectric Nanogenerators // *IEEE Trans Power Electron*. – 2022. – Vol. 37. – P. 9850-9864.
- [7]. [7] Li Z., Yan Z., Luo J., Yang Z. Performance comparison of electromagnetic energy harvesters based on magnet arrays of alternating polarity and configuration // *Energy Conversion and Management*. – 2019. – Vol. 179. – P. 132-140.
- [8]. Zhou S., Cao J., Inman D. J., Lin J., Liu S., Wang Z. Broadband tristable energy harvester: Modeling and experiment verification // *Applied Energy*. – 2014. – Vol. 133. – P. 33-39.
- [9]. Wang J., Zhou S., Zhang Z., Yurchenko D. High-performance piezoelectric wind energy harvester with Y-shaped attachments // *Energy Conversion and Management*. – 2019. – Vol. 181. – P. 645-652.
- [10]. [10] Jeong S. Y., Jung H. J., Jabbar H., Hong S. K., Ahn J. H., Sung T. H. Design of a multi-array piezoelectric energy harvester for a wireless switch // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – Vol. 41. – P. 12696-12703.
- [11]. Song Y., Yang C. H., Hong S. K., Hwang S. J., Kim J. H., Choi J. Y. et al. Road energy harvester designed as a macro-power source using the piezoelectric effect // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – Vol. 41. – P. 12563-12568.
- [12]. Kurt E., Cottone F., Uzun Y., Orfei F., Mattarelli M., Özhan D. Design and implementation of a new contactless triple piezoelectrics wind energy harvester // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2017. – Vol. 42. – P. 17813-17822.
- [13]. Shevtsov S., Chang S. -H. Modeling of vibration energy harvesting system with power PZT stack loaded on Li-Ion battery // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – Vol. 41. – P. 12618-12625.
- [14]. Scamman D., Newborough M., Bustamante H. Hybrid hydrogen-battery systems for renewable off-grid telecom power // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2015. – Vol. 40. – P. 13876-13887.
- [15]. Tao K., Lye S. W., Miao J., Hu X. Design and implementation of an out-of-plane electrostatic vibration energy harvester with dual-charged electret plates // *Microelectronic Engineering*. – 2015. – Vol. 135. – P. 32-37.
- [16]. Khan F. U., Qadir M. U. State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting // *J Micromech Microeng*. – 2016. – Vol. 26. – P. 103001.
- [17]. Zhao C., Yang Y., Upadrashta D., Zhao L. Design, modeling and experimental validation of a low-frequency cantilever triboelectric energy harvester // *Energy*. – 2021. – Vol. 214, Art. – No. 118885.
- [18]. Pace G., Serri M., Castillo A. E. D. R., Ansaldo A., Lauciello S., Prato M. et al. Nitrogen-doped graphene based triboelectric nanogenerators // *Nano Energy*. – 2021. – Vol. 87, Art. – No. 106173.
- [19]. Toyabur Rahman M., Sohel Rana S., Salauddin Md., Maharjan P., Bhatta T., Kim H. et al. A highly miniaturized freestanding kinetic-impact-based non-resonant hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator for human induced vibrations harvesting // *Applied Energy*. – 2020. – Vol. 279, Art. – No. 115799.
- [20]. Lo Monaco M., Russo C., Somà A. Numerical and experimental performance study of two-degrees-of-freedom electromagnetic energy harvesters // *Energy Conversion and Management: X*. – 2023. – Vol. 18, Art. – No. 100348.
- [21]. Lagomarsini C., Jean-Mistral C., Monfray S., Sylvestre A. Optimization of an electret-based soft hybrid generator for human body applications // *Smart Mater Struct*. – 2019. – Vol. 28, Art. – No. 104003.
- [22]. Dragunov V. P., Ostertak D. I. Microelectromechanical converters // *Russian Microelectronics*. – 2012. – Vol. 41. – P. 107-121.
- [23]. Torres E. O., Rincon-Mora G. A. A 0,7- $\mu\text{m}$  BiCMOS Electrostatic Energy-Harvesting System IC // *IEEE J Solid-State Circuits*. – 2010. – Vol. 45. – P. 483-496.
- [24]. Truong B. D., Le C. P., Halvorsen E., Roundy S. Power-electronic-interface topology for MEMS energy harvesting with multiple transducers // *J Phys: Conf Ser*. – 2018. – Vol. 1052, Art. – No. 012074.
- [25]. Phan T. N., Azadmehr M., Le C. P., Halvorsen E. Low power electronic interface for electrostatic energy harvesters // *J Phys: Conf Ser*. – 2015. – Vol. 660, Art. – No. 012087.



[26]. Dragunov V. P., Ostertak D. I., Pelmenev K. G., Sinitskiy R. E., Dragunova E. V. Electrostatic vibrational energy converter with two variable capacitors // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2021. – Vol. 318. – P. 112501.

[27]. Asanuma H., Oguchi H., Hara M., Yoshida R., Kuwano H. Ferroelectric dipole electrets for output power enhancement in electrostatic vibration energy harvesters // *Applied Physics Letters*. – 2013. – Vol. 103, Art. – No. 162901.

[28]. Jie Wei, Risquez S., Mathias H., Lefeuvre E., Costa F. Simple and efficient interface circuit for vibration electrostatic energy harvesters // *2015 IEEE SENSORS, Busan: IEEE, 2015, p. 1-4*.

[29]. Nintanavongsa P., Muncuk U., Lewis D. R., Chowdhury K. R. Design Optimization and Implementation for RF Energy Harvesting Circuits // *IEEE J Emerg Sel Topics Circuits Syst*. – 2012. – Vol. 2. – P. 24-33.

[30]. Ayudhya R. S. N. A switched-capacitor Dickson charge pumps for high-voltage high power applications // *2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering, Sapporo, Japan: IEEE, 2014. – P. 1147-1150*.

[31]. de Queiroz A. C. M., Macedo de Oliveira Filho L. C. Unipolar symmetrical variable-capacitance generators for energy harvesting // *2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), Boston, MA: IEEE, 2017, p. 221-224*.

[32]. Truong B. D., Le C. P., Halvorsen E. Comparative performance of voltage multipliers for MEMS vibration-based energy harvesters // *J Phys: Conf Ser* 2018. – Vol. 1052, Art. – No. 012118.

[33]. de Queiroz A. C. M. Analysis of the operation of a regenerative electrostatic energy harvester // *2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Lisbon, Portugal: IEEE, 2015, p. 1074-1077*.

[34]. Jayaweera H. M. P. C., Muhtaroglu A. Model Based Optimization of Integrated Low Voltage DC-DC Converter for Energy Harvesting Applications // *J Phys: Conf Ser*. – 2016. – Vol. 773, Art. – No. 012085.

[35]. Bedier M., Basset P., Galayko D. A Smart Load Interface and Voltage Regulator for Electrostatic Vibration Energy Harvester // *J Phys: Conf Ser* 2016. – Vol. 773, Art. – No. 012105.

[36]. Dragunov V., Dorzhiev V. Electrostatic vibration energy harvester with increased charging current // *J Phys: Conf Ser*. – 2013. – Vol. 476, Art. – No. 012115.

[37]. de Queiroz A. C. M. Biased capacitive divider electrostatic generators for energy harvesting // *2017 IEEE 8th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS), Bariloche, Argentina: IEEE, 2017, p. 1-4*.

[38]. de Queiroz A. C. M., De Menezes N. A. T. Energy harvesting with pairs of variable capacitors without control circuits // *Analog Integr Circ Sig Process*. – 2018. – Vol. 97. – P. 533-544.

[39]. de Queiroz A. C. M. Steady-State Analysis of Electronic Electrostatic Generators // *2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Florence: IEEE, 2018, p. 1-5*.

[40]. Mahboubi F. E., Bafleur M., Boitier V., Alvarez A., Colomer J., Miribel P. et al. Self-Powered Adaptive Switched Architecture Storage // *J Phys: Conf Ser*. – 2016. – Vol. 773, Art. – No. 012103.

[41]. Karami A., Galayko D., Basset P. Series-Parallel Charge Pump Conditioning Circuits for Electrostatic Kinetic Energy Harvesting // *IEEE Trans Circuits Syst I*. – 2017. – Vol. 64. – P. 227-240. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2016.2603064>.

[42]. De Michele G. Protected transformerless AC to DC power converter. Patent US 6061259 A. 2000.

[43]. Neil J., Francis J. Systems and Methods for Providing a Transformerless Power Supply. Patent US 20160233761 A1. 2016.

Транслитерация по BSI





ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА

HYDROGEN ECONOMY

ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА И ПРИВОДЫ НА ВОДОРОДНОМ ТОПЛИВЕ

HYDROGEN FUEL VEHICLES AND ENGINES

Статья поступила в редакцию 05.03.24 Ред. Рег. № 314-003-24  
УДК 62-523

The article has entered in publishing office 05.03.24 Ed. Reg. No.314-003-24



ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА СКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМОВ  
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ СДПМ



*Мосин М. Е., Попов Н. С., Домахин Е. А., Вильбергер М. Е.*

Новосибирский Государственный Технический Университет,  
проспект Карла Маркса, 20, Новосибирск, Россия, 630073,  
тел: +7 (383) 346-13-87,  
e-mail: n.popov@corp.nstu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.081-090

Заключение совета рецензентов: 13.03.24

Заключение совета экспертов: 19.03.24

Принято к публикации: 28.03.24

В исследовании предложен альтернативный классическому ПИД-регулятору алгоритм управления скоростью синхронного двигателя с постоянными магнитами, называемый прямым разрывным управлением в скользящих режимах, основанный на релейных регуляторах. Благодаря показанным преимуществам данный метод предполагается использовать для управления скоростью движения электромобиля на водородных топливных элементах. Представлено математическое описание метода скользящих режимов, дающее понимание о происходящих процессах в системе во время переходных режимов. С помощью математического моделирования в MATLAB/Simulink было проведено сравнение динамических характеристик переходного процесса по скорости для системы с классическими ПИД-регуляторами и системы с управлением в скользящих режимах. Система со скользящими режимами показала лучшие показатели времени регулирования и реакции на изменение нагрузки. Таким образом, делается вывод о том, что использование метода скользящих режимов предпочтительнее в задачах управления скоростью электромобиля на водородных топливных элементах.

**Ключевые слова:** релейный регулятор, скользящие режимы, поверхность скольжения, синхронный двигатель с постоянными магнитами.

*Мосин М. Е., Попов Н. С., Домахин Е. А., Вильбергер М. Е. Обоснование применения метода скользящих режимов для управления скоростью синхронного двигателя с постоянными магнитами // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 03(420) 2024, с. 81-90*

*Mosin M. E., Popov N. S., Domakhin E. A., Vilberger M. E. Justification of the application of the sliding mode method for controlling the speed of the PMSM // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 03(420) 2024, pp. 81-90*



# JUSTIFICATION OF THE APPLICATION OF THE SLIDING MODE METHOD FOR CONTROLLING THE SPEED OF THE PMSM

*Mosin M. E., Popov N. S., Domakhin E. A., Vilberger M. E.*

Novosibirsk State Technical University, K. Marx ave., 20, Novosibirsk, Russia, 630073  
Tel.: +7 (383) 346-13-87,  
e-mail: n.popov@corp.nstu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.081-090

Referred: 13.03.24

Received in revised form: 19.03.24

Accepted: 28.03.24

The study proposes an alternative to the classical PID controller algorithm for controlling the speed of a permanent magnets synchronous motor, called direct discontinuous control in sliding modes, based on relay controllers. Due to the advantages shown, this method is supposed to be used to control the speed of fuel cell vehicles. A mathematical description of the sliding mode method is presented, which gives an understanding of the processes occurring in the system during transient modes. Using mathematical modeling in MATLAB/Simulink, the dynamic characteristics of the transient process in terms of speed were compared for a system with classical PID controllers and a system with control in sliding modes. The system with sliding modes showed the best indicators of regulation time and response to load changes. Thus, it is concluded that the use of the sliding mode method is preferable in the tasks of speed control of fuel cell vehicles.

**Keywords:** relay controller, sliding modes, sliding surface, permanent magnets synchronous motor.



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 AuthorID: 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 AuthorID: 1084406  
Scopus Author ID: 57215016363  
ORCID: 0000-0001-8282-6145



International Publishing House of scientific periodicals «Space»



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 AuthorID: 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 AuthorID: 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 AuthorID: 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 AuthorID: 177083  
Scopus Author ID: 57196261861  
ORCID: 0000-0001-8762-9917



Международный издательский дом научной периодики «Спейс»



Таблица сокращений и обозначений	
Аббревиатуры	
СДПМ	синхронный двигатель с постоянными магнитами
ПИД	Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор
РСР	регулятор скользящих режимов
УЖД	Уравнение желаемых движений
Буквы латинского алфавита	
$U$	Величина напряжения

$\Psi$	Величина потокоцепления
$I$	Величина тока
$M$	Величина крутящего момента
$L$	Величина индуктивности
$Z$	Число пар полюсов
Буквы греческого алфавита	
$t$	Временная координата
$\omega, \Omega$	Частота вращения
$J$	Момент инерции

### Введение

В последнее время развитие электротехнической промышленности привело к тому, что на смену асинхронным двигателям стали приходиться синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ), которые отличаются меньшими габаритами, большей мощностью и моментом, а также высокой эффективностью. Таким образом, в качестве электрического двигателя для транспортных средств с применением тягового электропривода стали все чаще и чаще использоваться именно синхронные двигатели с постоянными магнитами.

В последнее время растет популярность применения электромобилей и, в частности, электромобилей на топливных элементах [16-17]. Данный рост обусловлен очевидными преимуществами электромобилей на топливных элементах: быстрое время заправки (около 3 мин) [1], относительно высокая автономность хода на одной заправке (до 600 км) по сравнению с классическими электромобилями, при оценке автономности хода по циклу WLTC. Основными причинами, ограничивающими применение водородных транспортных средств, являются: относительно высокая стоимость в сравнении с другими транспортными средствами, а также меньшее развитие инфраструктуры заправочных станций в сравнении с сетью зарядных станций для электромобилей [2]. Свою роль в ограничении развития водородного транспорта играет способ производства водорода: в промышленных масштабах водород производится методом паровой конверсии метана, на долю которого приходится около 48 % общемирового производства [3]. Такой способ в первую очередь связан с преобразованием невозобновляемых источников энергии, которые могут быть использованы при производстве

электрической энергии. Также известны и применяются такие способы, как парциальное окисление продуктов сырой нефти, газификация угля, электролиз воды.

Таким образом, для распространения водородного транспорта необходим ряд мер: переход на «зеленое» производство водорода, с применением возобновляемых источников энергии с нулевой эмиссией, развитие инфраструктуры водородных заправочных станций, а также снижение себестоимости производства электромобилей на топливных элементах.

Однако для улучшения показателей электромобилей на топливных элементах недостаточно просто заменить тип тягового электродвигателя, также необходимо применять более совершенные алгоритмы управления. Хорошо зарекомендовавшие себя пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы (ПИД) основываются на линеаризованной модели двигателя. Такие регуляторы не способны к эффективному управлению при изменении внутренних параметров объекта управления и при наличии в системе нелинейностей.

Вместо классического ПИД-регулятора предлагается построение систем с прямым разрывным управлением в скользящих режимах, основанных на релейных регуляторах, которые также можно называть регулятором скользящих режимов (РСР, Sliding Mode Controller (SMC)). Такой регулятор обеспечивает высокое качество управления, инвариантность к внешним возмущениям, малую чувствительность к изменениям динамических свойств объекта управления в сочетании с экономичностью передачи энергии и простотой получения вращающегося магнитного поля [4].



### 1. Метод скользящих режимов

Для реализации метода скользящих режимов необходимо определить поверхность разрыва, вдоль которой будет «скользить» изображающая точка.

Поверхность разрыва (скольжения), вдоль которой будет «скользить» изображающая точка, определяется следующим образом [5]:

$$F(v, x) = 0 \tag{1}$$

где  $v(t)$  – задающее воздействие.

С помощью уравнения желаемых движений (УЖД) можно на этапе проектирования задать вид переходных процессов управляемой координаты состояния объекта управления [24-25].

Уравнение желаемых движений имеет вид [6]:

$$T_{ж}^r x^{(r)} + A_1 T_{ж}^{r-1} x^{(r-1)} + \dots + A_{r-1} T_{ж} x^{(1)} + x = v_{УЖД} \tag{2}$$

где  $\Omega_{ж}, T_{ж} = \Omega_{ж}^{-1}$  – среднегеометрический корень характеристического полинома и постоянная времени УЖД соответственно;  $A_i, i = \overline{1, r-1}$  – коэффициенты формы;  $r$  – порядок системы.

Таким образом, с помощью (1) и (2) получаем следующий вид уравнения, определяющего поверхность разрыва:

$$F(v, x) = v(t) - v_{УЖД} = 0 \tag{3}$$

Определив поверхность разрыва, необходимо записать закон управления.

Асимптотическая характеристика релейного регулятора показана на рисунке 1 [7].

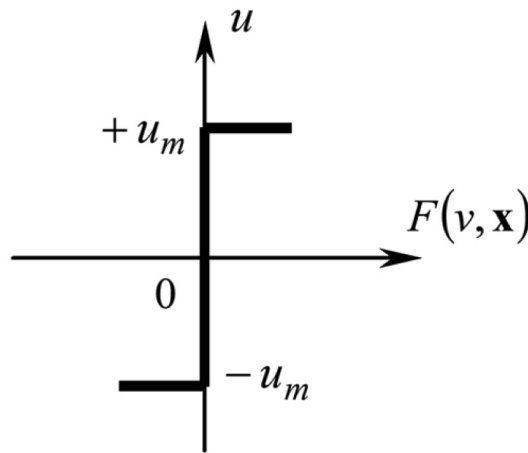


Рис. 1. Асимптотическая характеристика релейного регулятора  
Fig. 1. Relay controller characteristics

Характеристика имеет два разрешенных состояния  $+u_m$  и  $-u_m$ , таким образом, имеется разрыв 1-го рода при  $F(v, x) = 0$ , то есть значение управления на линии «переключения» не определено. Такая зависимость описывается следующим законом управления [8]:

$$u = u_m \text{sign}F(v, x), \tag{4}$$

где  $\text{sign}F$  – функция знака, которая определяется как

$$\text{sign}F = \begin{cases} 1 & \text{при } F > 0, \\ -1 & \text{при } F < 0, \end{cases} \tag{5}$$

Чтобы скользящие режимы существовали на поверхности разрыва  $F(v, x) = 0$ , необходимо

выполнение следующего условия [9]:

$$\dot{F}F < 0,$$

что требует различия знаков функции  $F(v, x)$  и ее полной производной  $\dot{F}$  в окрестности поверхности переключения:

$$\text{и } \begin{cases} F < 0 & \text{при } \dot{F} > 0 \\ F > 0 & \text{при } \dot{F} < 0 \end{cases}$$

Из выполнения этого условия вытекает закон управления (4).

При движении изображающей точки по фазовой траектории имеют место двухэтапные процессы (рис. 2).



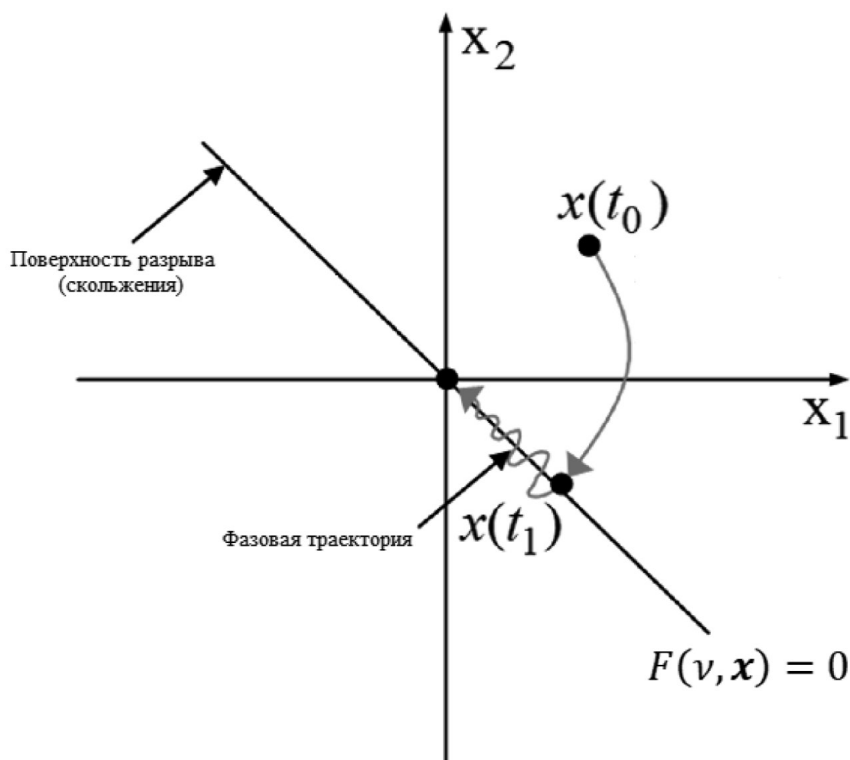


Рис. 2. Изображающая точка на фазовой плоскости  
 Fig. 2. Representation point on image plane

На первом этапе движения (при начальном положении изображающей точки вне поверхности разрыва) изображающая точка максимально быстро при полном использовании ресурса управления выводится в  $\epsilon$ -окрестность поверхности разрыва (где  $\epsilon$  – порядок неучтенных малых «неидеальностей» модели). На данном этапе движения система чувствительна к изменениям параметров и отклонениям системы [10]. На втором этапе движения изображающая точка

ка движется вдоль поверхности разрыва, не покидая ее, к началу координат. В течение этого этапа движения система уже не зависит от параметров системы и внешних возмущений. Очевидно, что первый этап движения должен быть существенно короче второго, так как только при таком условии можно говорить об инвариантности системы к изменениям внутренних параметров и внешним возмущениям [24-25].

**Модель синхронного двигателя с постоянными магнитами**

Математическое описание синхронного двигателя с постоянными магнитами во вращающейся системе координат d-q, в которой ось d направлена по магнитной оси ротора, выглядит следующим образом [11]:

$$U_d = \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q\omega + R_s I_d;$$

$$U_q = \frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d\omega + R_s I_q;$$

$$\Psi_d = L_d I_d + \Psi_f;$$

$$\Psi_q = L_q I_q;$$

$$M = \frac{3}{2} Z_p (\Psi_d I_d - \Psi_q I_q);$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_c);$$

$$\Omega = \frac{\omega}{Z_p},$$

С помощью разделения фазного тока на составляющие d и q можно управлять как магнитным состоянием двигателя, так и его крутящим моментом. Крутящий момент двигателя пропорционален току  $I_q$ . Максимального крутящего момента можно достичь, задавая ток  $I_d = 0$  [12-14].

Структурная схема синхронного двигателя с постоянными магнитами во вращающейся системе координат d-q представлена на рисунке 3.

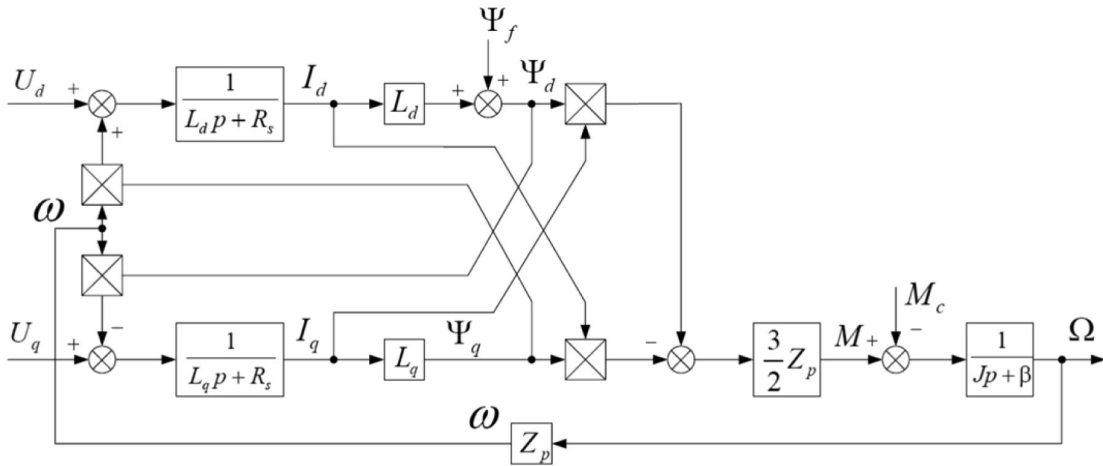


Рис. 3. Структурная схема синхронного двигателя с постоянными магнитами во вращающейся системе координат d-q  
 Fig. 3. Permanent magnet synchronous motor simulation model in d-q reference frame

### Моделирование SMC и ПИД

Для того, чтобы показать эффективность метода скользящих режимов, было произведено цифровое моделирование работы двух систем. В одной в качестве регуляторов использовались классические ПИД-регуляторы (PID), в другой регуляторы скользящих режимов (SMC) [15].

В момент времени  $t = 0$  подается ступенчатый

сигнал задания номинальной скорости. Далее, после достижения установившейся номинальной скорости, подается момент нагрузки. Графики переходных процессов по скорости для систем с SMC и PID представлены на рисунке 4.

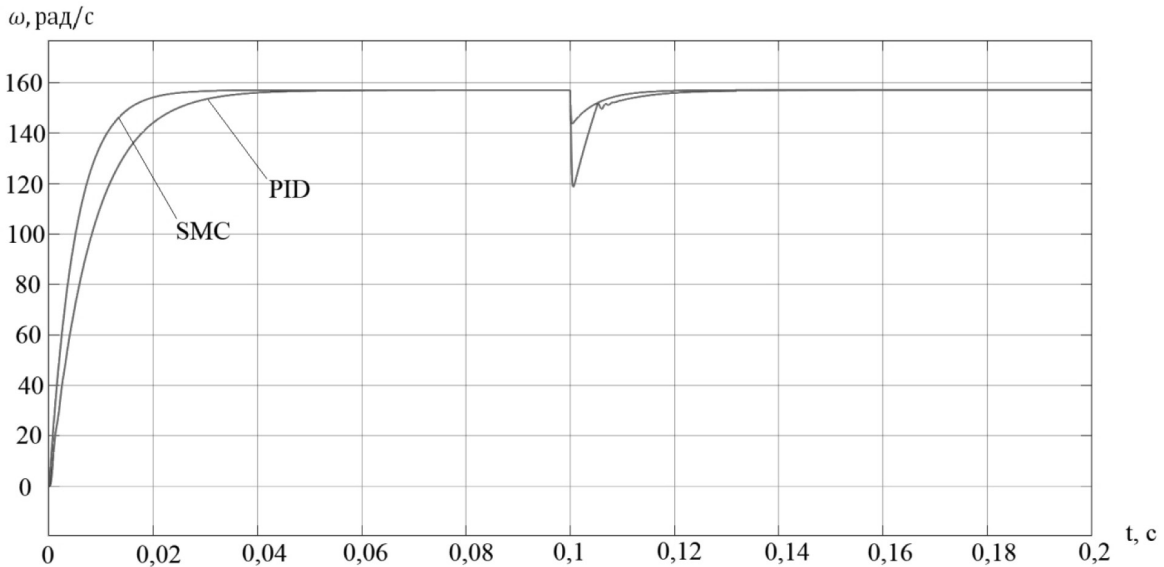


Рис. 4. Графики переходных процессов по скорости для SMC и PID  
 Fig. 4. PID and SMC cases transients

Получили следующие результаты:

1. Время регулирования:

SMC: 0,0149 с;

PID: 0,0239 с;

2. Величина перерегулирования:

SMC: 0 %;

PID: 0 %;

3. Просадка скорости при добавлении нагрузки:

SMC: 8,78 %;

PID: 24,43 %;

4. Время регулирования после добавления нагрузки:

SMC: 0,0031 с;

PID: 0,0049 с.



## Заключение

По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что система с регулятором скользящих режимов имеет лучшие динамические характеристики по сравнению с системой, построенной на основе классических ПИД-регуляторов. Так как система со скользящими режимами еще и инвариантна к изме-

нению внутренних параметров объекта управления, то для применения в электроприводах автономных транспортных средств предпочтительнее использовать системы управления с регуляторами в скользящих режимах.

## Список литературы

- [1]. De Wolf, D.; Smeers, Y. Comparison of Battery Electric Vehicles and Fuel Cell Vehicles. *World Electr. Veh. J.* 2023, 14, 262. <https://doi.org/10.3390/wevj14090262>
- [2]. CNRS. Hydrogen Car for All? In *Proceedings of the European Fuel Cell Car Workshop, Orléans, France, 1-3 March 2017*; Available online: <https://news.cnr.fr/articles/hydrogen-cars-for-all> (accessed on 1 September 2023).
- [3]. Макарян И. А., Седов И. В. Оценка экономической эффективности масштабов получения водорода различными методами // *Российский химический журнал*. 2021. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomicheskoy-effektivnosti-masshtabov-polucheniya-vodoroda-razlichnymi-metodami> (дата обращения: 29.09.2023)].
- [4]. Рывкин Сергей Ефимович. Синтез систем управления автоматизированными синхронными электроприводами с использованием скользящих режимов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06. – Москва, 2006. – 370 с. РГБ ОД, 71:07-5/66
- [5]. Janos Mate Kiss, Peter Tamas Szemes, Petra Aradi. Sliding mode control of a servo system in LabVIEW: Comparing different control methods // *International Review of Applied Sciences and Engineering*. – 2021. – P. 201-210.
- [6]. Панкратов В. В. Избранные разделы теории автоматического управления: учеб. пособие / В. В. Панкратов, О. В. Нос, Е. А. Зима. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 223 с. (Серия «Учебники НГТУ»).
- [7]. Nasri A., Gasbaoui B., Fayssal B. M. Sliding mode control for four wheels electric vehicle drive // *Procedia Technology*. – 2016. – Vol. 22. – P. 518-526.
- [8]. On Chattering-Free Dynamic Sliding Mode Controller Design / Jeang-Lin C. // *Journal of Control Science and Engineering*. – 2012. – Vol. 2012. – P. 1-7. Doi: 10.1155/2012/564906
- [9]. Alfian Ma'arif, Abdullah Cakan Simulation and Arduino Hardware Implementation of DC Motor Control Using Sliding Mode Controller // *Journal of Robotics and Control (JRC)*. – 2021. – Vol. 2. – P. 582-587.
- [10]. P. Sowjanya, S. Tarakalyani PI and sliding mode control for permanent magnet brushless DC motor // *International journal of innovative technology and research*. – 2013. – Vol. 1. – P. 497-502.
- [11]. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». – Иваново, 2008. – 321 с.
- [12]. В. В. Панкратов, Д. А. Котин. Адаптивные алгоритмы бездатчикового векторного управления асинхронными электроприводами подъемно-транспортных механизмов: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 150 с.
- [13]. Shiyi Fang, Rongrong Zhang, Sergey Maltsev, Daifen Chen, Xinyu Fan, Aleksey Levstev, «A novel adaptive fast sliding mode control method based on fuzzy algorithm for the air management system of fuel cell stack» *Process Safety and Environmental Protection*, Volume 187, 2024, Pages 506-517, ISSN 0957-5820, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.04.088>
- [14]. Mohamed Derbeli, Oscar Barambones, Maisa Farhat, Jose Antonio Ramos-Hernanz, Lassaad Sbitta. «Robust high order sliding mode control for performance improvement of PEM fuel cell power systems», *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 45, Issue 53, 2020, Pages 29222-29234, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.172>
- [15]. Usmanov, U.; Ruzimov, S.; Tonoli, A.; Mukhitdinov, A. Modeling, Simulation and Control Strategy Optimization of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle. 2023, 5, 464-481. <https://doi.org/10.3390/vehicles5020026>
- [16]. Kamal, E.; Adouane, L. Optimized EMS and a Comparative Study of Hybrid Hydrogen Fuel Cell/Battery Vehicles. *Energies* 2022, 15, 738
- [17]. Ajanovic, A.; Haas, R. Economic and Environmental Prospects for Battery Electric- and Fuel Cell Vehicles: A Review. *Fuel Cells* 2019, 19, 515-529
- [18]. Yun, Q.; Wang, X.; Yao, C.; Zhuang, W.; Shao, M.; Gao, H. A Second-Order Sliding Mode Voltage Controller with Fast Convergence for a Permanent Magnet Synchronous Generator System. *Processes* 2024, 12, 71.

<https://doi.org/10.3390/pr12010071>

[19]. Liu, W.; Luo, B.; Yang, Y.; Niu, H.; Zhang, X.; Zhou, Y.; Zeng, C. An Adaptive-Gain Sliding Mode Observer with Precise Compensation for Sensorless Control of PMSM. *Energies* 2023, 16, 7968, <https://doi.org/10.3390/en16247968>

[20]. Chen, H.; Zhang, R.; Zhu, S.; Gao, J.; Zhou, R. Model Reference Adaptive Observer for Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Improved Linear Dead-Time Compensation. *Electronics* 2023, 12, 4907. <https://doi.org/10.3390/electronics12244907>

[21]. Bensalem, Y.; Kouzou, A.; Abbassi, R.; Jerbi, H.; Kennel, R.; Abdelrahem, M. Sliding-Mode-Based Current and Speed Sensors Fault Diagnosis for Five-Phase PMSM. *Energies* 2022, 15, 71. <https://doi.org/10.3390/en15010071>

[22]. Soriano, L. A.; Rubio, J. d. J.; Orozco, E.; Cordova, D.A.; Ochoa, G.; Balcazar, R.; Cruz, D. R.; Meda-Campaña, J. A.; Zacarias, A.; Gutierrez, G. J. Optimization of Sliding Mode Control to Save Ener-

gy in a SCARA Robot. *Mathematics* 2021, 9, 3160. <https://doi.org/10.3390/math9243160>

[23]. Wang, M.; Xu, Y.; Zou, J. Sliding-Mode-Observer-Based Open-Switch Diagnostic Method for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Connected with LC Filter. *Energies* 2019, 12, 3288. <https://doi.org/10.3390/en12173288>

[24]. Deise Maria Cirolini Milbradt, Paulo Jefferson Dias de Oliveira Evald, Guilherme Vieira Hollweg, Hilton Abilio Gründling. A Hybrid Robust Adaptive Sliding Mode Controller for partially modelled systems: Discrete-time Lyapunov stability analysis and application, *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, Volume 48, 2023, 101333, ISSN 1751-570X, <https://doi.org/10.1016/j.nahs.2023.101333>

[25]. Héctor Ríos, Manuel Mera, Andrey Polyakov. A New Finite-Time Sliding-Mode Controller for a Class of Second-Order Non-Linear Systems, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 56, Issue 2, 2023. Pages 49-53, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1394>

## References

[1]. De Wolf, D.; Smeers, Y. Comparison of Battery Electric Vehicles and Fuel Cell Vehicles. *World Electr. Veh. J.* 2023, 14, 262. <https://doi.org/10.3390/wevj14090262>

[2]. CNRS. Hydrogen Car for All? In Proceedings of the European Fuel Cell Car Workshop, Orléans, France, 1-3 March 2017; Available online: <https://news.cnrs.fr/articles/hydrogen-cars-for-all> (accessed on 1 September 2023).

[3]. Makaryan I. A., Sedov I. V. Assessing the economic efficiency of the scale of hydrogen production using various methods // *Russian Chemical Journal*. 2021. No. 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomicheskoy-effektivnosti-masshtabov-polucheniya-vodoroda-razlichnymi-metodami> (date of access: 09.29.2023).].

[4]. Ryvkin Sergey Efimovich. Synthesis of control systems for automated synchronous electric drives using sliding modes: thesis. ...Dr. Tech. Sciences: 05.13.06. – Moscow, 2006. – 370 p. RSL OD, 71:07-5/66

[5]. Janos Mate Kiss, Peter Tamas Szemes, Petra Aradi. Sliding mode control of a servo system in LabVIEW: Comparing different control methods // *International Review of Applied Sciences and Engineering*. – 2021. – P. 201-210.

[6]. Pankratov V. V. Selected sections of the theory of automatic control: textbook. allowance / V.V. Pankratov, O.V. Nos, E.A. Zima. – Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2011. – 223 p. (Series «Textbooks of NSTU»).

[7]. Nasri A., Gasbaoui B., Fayssal B. M. Sliding

mode control for four wheels electric vehicle drive // *Procedia Technology*. – 2016. – Vol. 22. – P. 518-526.

[8]. On Chattering-Free Dynamic Sliding Mode Controller Design / Jean-Lin C. // *Journal of Control Science and Engineering*. – 2012. – Vol. 2012. – P. 1-7. Doi: 10.1155/2012/564906.

[9]. Alfian Ma'arif, Abdullah Cakan. Simulation and Arduino Hardware Implementation of DC MotorControlUsing Sliding Mode Controller // *Journal of Robotics and Control (JRC)*. – 2021. – Vol. 2. – P. 582-587.

[10]. P. Sowjanya, S. Tarakalyani PI and sliding mode control for permanent magnet brushless DC motor // *International journal of innovative technology and research*. – 2013. – Vol. 1. – P. 497-502.

[11]. [Vinogradov A. B. Vector control of AC electric drives / Ivanovo State Energy University named after V. I. Lenin. – Ivanovo, 2008. – 321 p.

[12]. V. V. Pankratov, D. A. Kotin. Adaptive algorithms for sensorless vector control of asynchronous electric drives of hoisting and transport mechanisms: a textbook. – Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2012. – 150 p.

[13]. Shiyi Fang, Rongrong Zhang, Sergey Maltsev, Daifen Chen, Xinyu Fan, Aleksey Levtsev. «A novel adaptive fast sliding mode control method based on fuzzy algorithm for the air management system of fuel cell stack» *Process Safety and Environmental Protection*, Volume 187, 2024, Pages 506-517, ISSN 0957-5820, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.04.088>

[14]. Mohamed Derbeli, Oscar Barambones, Mais-



sa Farhat, Jose Antonio Ramos-Hernanz, Lassaad Sbita. «Robust high order sliding mode control for performance improvement of PEM fuel cell power systems», International Journal of Hydrogen Energy, Volume 45, Issue 53, 2020. Pages 29222-29234, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.172>

[15]. Usmanov, U.; Ruzimov, S.; Tonoli, A.; Mukhitdinov, A. Modeling. Simulation and Control Strategy Optimization of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle. 2023, 5, 464-481. <https://doi.org/10.3390/vehicles5020026>

[16]. Kamal, E.; Adouane, L. Optimized EMS and a Comparative Study of Hybrid Hydrogen Fuel Cell/Battery Vehicles. Energies 2022, 15, 738

[17]. Ajanovic, A.; Haas, R. Economic and Environmental Prospects for Battery Electric and Fuel Cell Vehicles: A Review. Fuel Cells 2019, 19, 515-529

[18]. Yun, Q.; Wang, X.; Yao, C.; Zhuang, W.; Shao, M.; Gao, H. A Second-Order Sliding Mode Voltage Controller with Fast Convergence for a Permanent Magnet Synchronous Generator System. Processes 2024, 12, 71. <https://doi.org/10.3390/pr12010071>

[19]. Liu, W.; Luo, B.; Yang, Y.; Niu, H.; Zhang, X.; Zhou, Y.; Zeng, C. An Adaptive-Gain Sliding Mode Observer with Precise Compensation for Sensorless Control of PMSM. Energies 2023, 16, 7968. <https://doi.org/10.3390/en16247968>

[20]. Chen, H.; Zhang, R.; Zhu, S.; Gao, J.; Zhou, R. Model Reference Adaptive Observer for Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Improved Linear Dead-Time Compensation. Electronics 2023, 12, 4907.

<https://doi.org/10.3390/electronics12244907>

[21]. Bensalem, Y.; Kouzou, A.; Abbassi, R.; Jerbi, H.; Kennel, R.; Abdelrahem, M. Sliding-Mode-Based Current and Speed Sensors Fault Diagnosis for Five-Phase PMSM. Energies 2022, 15, 71. <https://doi.org/10.3390/en15010071>

[22]. Soriano, L.A.; Rubio, J. d. J.; Orozco, E.; Cordova, D. A.; Ochoa, G.; Balcazar, R.; Cruz, D. R.; Meda-Campaña, J.A.; Zacarias, A.; Gutierrez, G. J. Optimization of Sliding Mode Control to Save Energy in a SCARA Robot. Mathematics 2021, 9, 3160. <https://doi.org/10.3390/math9243160>

[23]. Wang, M.; Xu, Y.; Zou, J. Sliding-Mode-Observer-Based Open-Switch Diagnostic Method for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Connected with LC Filter. Energies 2019, 12, 3288. <https://doi.org/10.3390/en12173288>

[24]. Deise Maria Cirolini Milbradt, Paulo Jefferson Dias de Oliveira Evald, Guilherme Vieira Hollweg, Hilton Abílio Gründling. A Hybrid Robust Adaptive Sliding Mode Controller for Partially Modeled Systems: Discrete-time Lyapunov Stability Analysis and Application, Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, Volume 48, 2023, 101333, ISSN 1751-570X, <https://doi.org/10.1016/j.nahs.2023.101333>

[25]. Héctor Ríos, Manuel Mera, Andrey Polyakov. A New Finite-Time Sliding-Mode Controller for a Class of Second-Order Non-Linear Systems, IFAC-PapersOn-Line, Volume 56, Issue 2, 2023, Pages 49-53, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1394>



ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА

HYDROGEN ECONOMY

ВОДОРОД ДЛЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ЗДАНИЙ

HYDROGEN FOR PROVIDING BUILDINGS, STRUCTURES AND HOUSES WITH ENERGY

Статья поступила в редакцию 05.03.24 Ред. Пер. № 314-003-24

The article has entered in publishing office 05.03.24 Ed. Reg. No 314-003-24

УДК 620.9, 621.311.001.57



**ВОДОРОДНЫЕ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ: СРАВНЕНИЕ  
ПРИВЕДЕННОЙ СТОИМОСТИ ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ LCOS  
РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ. ВОДОРОД КАК КЛЮЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ  
ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНОГО И СЕЗОННОГО НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ**

**Жданеев О. В.<sup>1, 2, a</sup>, Москвин А. В.<sup>3</sup> Хакимов Р. Р.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Центр компетенций технологического развития ТЭК (ЦКТР ТЭК) при Минэнерго России  
121099, Москва, Новинский бульвар, 13, с. 4. Zhdaneev@rosenergo.gov.ru, телефон: +7-985-857-32-27

<sup>2</sup>Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН (ИНХС РАН)  
119991, Москва, Ленинский проспект, 29

<sup>3</sup>Русатом Комплексные Инжиниринговые Проекты  
115280, Москва, Ленинская Слобода, 26, с. 5

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.091-109

Заключение совета рецензентов: 14.03.24 Заключение совета экспертов: 20.03.24 Принято к публикации: 29.03.24

Основной задачей данной статьи является формирование современной оценки развития водородных систем хранения энергии и экономическая оценка эффективности их применения для различных задач. Используя данные из различных актуальных отчетов мировых аналитических агентств, построена математическая модель для определения показателя стоимости хранения электроэнергии – Levelised Cost of Storage (LCOS). С целью определения чувствительности показателя LCOS выведены зависимости стоимости хранения от: установленной мощности, энерговооруженности и стоимости электроэнергии. Согласно результатам моделирования определены оптимальные сценарные условия для систем водородного накопления, при которых стоимость хранения энергии для других систем многократно превышает стоимость хранения в водородной СНЭ. Исходя из полученных зависимостей LCOS от мощности и энерговооруженности, приводятся выводы об использовании водородных систем аккумулирования для длительного сезонного хранения энергии и энергетического арбитража в системах с ВИЭ.

**Ключевые слова:** LCOE, LCOS, стоимость электроэнергии, стоимость хранения электроэнергии, СНЭ, накопление энергии, комплексные системы энергоснабжения, удаленная генерация.

*Жданеев О. В., Москвин А. В., Хакимов Р. Р. Водородные системы накопления энергии: сравнение приведенной стоимости хранения энергии LCOS различных систем. Водород как ключевая технология для длительного и сезонного накопления энергии // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 03(420) 2024, с. 91-109*

*Zhdaneev O. V., Moskvina A. V., Khakimov R. R. Hydrogen energy storage systems: comparison of the leveled cost of LCOS energy storage of different systems. Hydrogen as a key technology for long-term and seasonal energy storage // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 03(420) 2024, pp. 91-109*





# COMPARISON OF THE LEVELLED COST OF LCOS ENERGY STORAGE OF DIFFERENT SYSTEMS. HYDROGEN AS A KEY TECHNOLOGY FOR LONG-TERM AND SEASONAL ENERGY STORAGE

Zhdaneev O. V.<sup>1,2</sup>, Moskvina A. V.<sup>3</sup>, Khakimov R. R.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Competence Center for Technological Development of the Fuel and Energy Complex (CCTR TEK) under the Ministry of Energy of Russia

121099, Moscow, Novinsky Boulevard, 13, p. 4. Zhdaneev@rosenergo.gov.ru, phone: +7-985-857-32-27

<sup>2</sup>Institute of Petrochemical Synthesis named after. A. V. Topchiev RAS (INHS RAS)

119991, Moscow, Leninsky Prospekt, 29

<sup>3</sup>Rusatom Integrated Engineering Projects

115280, Moscow, Leninskaya Sloboda, 26, p. 5

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.091-109

Referred: 14.03.24

Received in revised form: 20.03.24

Accepted: 29.03.24

The main objective of this article is to formulate a modern assessment of the development of hydrogen energy storage systems and an economic assessment of the effectiveness of their use for various tasks. Using data from various current reports from global analytical agencies, a mathematical model was built to determine the cost of electricity storage – Levelized Cost of Storage (LCOS). In order to determine the sensitivity of the LCOS indicator, the dependences of the cost of storage on: installed capacity, power supply and cost of electricity were derived. According to the modeling results, optimal scenario conditions for hydrogen storage systems were determined, under which the cost of energy storage for other systems is many times higher than the cost of storage in a hydrogen energy storage system. Based on the obtained dependences of LCOS on power and energy availability, conclusions are given on the use of hydrogen storage systems for long-term seasonal energy storage and energy arbitrage in systems with renewable energy sources.

**Keywords:** LCOE, LCOS, cost of electricity, cost of electricity storage, energy storage system, energy storage, integrated energy supply systems, remote generation



Жданеев  
Олег Валерьевич

Zhdaneev  
Oleg V.

**Сведения об авторе:** ведущий научный сотрудник Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН). 119991, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, 29. Профессор высшей нефтяной школы, Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

**Место работы:** Советник генерального директора/Старший советник генерального директора ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго РФ/ АО «Центр эксплуатационных услуг».

**Образование:** МГУ им. Ломоносова, Томский политехнический университет.

**Ученая степень:** доктор технических наук.

**Область научных интересов:** водородная энергетика, технологическое развитие топливно-энергетического комплекса, петролеомика, энергетика.

**Публикации:** ORCID ID: 0000-0002-5287-4397

**Author information:** Leading Researcher Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences (INHS RAS). 119991, GSP-1, Moscow, Leninsky Prospekt, 29. Professor of the Higher Oil School, Yurga State University, Khanty-Mansiysk, Chekhov str., 16.

**Place of employment:** Advisor to the General Director/Senior Advisor to the General Director of the Federal State Budgetary Institution «Russian Energy Agency» of the Ministry of Energy of the Russian Federation/ JSC «Center for Operational Services».

**Education:** Lomonosov Moscow State University, Tomsk Polytechnic University

**Academic degree:** Doctor of Technical Sciences.

**Scientific interests area:** Hydrogen energy, technological development of the fuel and energy complex, petroleomics, energy

**Publications:** ORCID ID: 0000-0002-5287-4397

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»



Москвин  
Антон Валерьевич

Moskvin Anton V.

**Сведения об авторе:**  
**Место работы:** ООО «Русатом КИП»

**Образование:** ГОУ ВПО «Московский инженерно-физический институт (государственный университет). Международные отношения.

Квалификация: специалист в области международных отношений.

**Ученая степень:** -

**Область научных интересов:** Водородная энергетика, системы накопления энергии, производство и хранение водорода, экономическое моделирование.

**Публикации:** Индекс Хирша РИНЦ – 0

**Author information:**  
**Place of employment:** LLC «Rusatom CEP»

**Education:** National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute). Foreign affairs and technological cooperation.

**Academic degree:** Master's degree.

**Scientific interests area:** Hydrogen Energy, energy storage systems, Hydrogen production and storage, economic modeling.

**Publications:** RSCI Hirsch index – 0



Хакимов  
Ренат Рашидович

Khakimov Renat R.

**Сведения об авторе:**  
**Место работы:** ООО «Русатом КИП».

**Образование:** Теплоэнергетика и теплотехника – Автономные энергетические системы. Водородная и электрохимическая энергетика.

**Ученая степень:** -

**Область научных интересов:** водородная энергетика, системы накопления энергии, производство и хранение водорода, математическое моделирование, возобновляемые источники энергии.

**Публикации:** Индекс Хирша РИНЦ – 0

**Author information:**  
**Place of employment:** LLC «Rusatom CEP»

**Education:** Thermal engineering and Heat technology – Autonomous power systems. Hydrogen and electrochemical power engineering.

**Academic degree:** Master's degree.

**Scientific interests area:** Hydrogen Energy, energy storage systems, Hydrogen production and storage, Mathematical modeling, Renewable Energy Sources.

**Publications:** RSCI Hirsch index – 0

## Введение

Системы водородного аккумулирования на основе P2G2P цикла отличаются от систем на других химических источниках относительно низким КПД – в 50-70 %, однако этот факт полностью компенсируется возможностью длительного хранения энергии, уравнивая в возможностях эти системы с ГАЭС. В то же время, в отличие от последних – для реализации P2G2P цикла не требуется перепад высот, что позволяет использовать данные системы в любой точке и исключает необходимость в дорогостоящих и масштабных земельных работах при строительстве.

Основным же фактором при конфигурации энергосистемы с возобновляемыми источниками энергии и системами накопления является суточный график нагрузки системы и распределение плотности доступной энергии во времени.

Таким образом, использование технологии водородного аккумулирования энергии становится особенно перспективным в регионах с большой долей генерации, приходящейся на стохастические слабоуправляемые источники, такие как солнечные и ветровые электростанции.

Технологии, запаасающие энергию в виде водорода – для последующего его использования в топливном элементе, имеют энергоёмкость, схожую с ДВС, активно используются для энергообеспечения районов крайнего севера, не подключенных к единой энергосистеме.

Актуальность использования систем хранения энергии, по мере расширения использования возобновляемых источников энергии, непрерывно растёт – поскольку эти устройства могут поглощать излишнюю электроэнергию, вырабатываемую возобновляемыми источниками энергии, и возвращать ее обратно в сеть в часы пикового спроса. Увеличение установленной мощности возобновляемых источников энергии и возможность ее запасания для дальнейшего использования вместо увеличения доли использования ископаемого топлива может помочь сократить выбросы парниковых газов. В результате, правильный подбор системы хранения энергии дает новые возможности управления в установившемся потоке мощности энергосистемы, а также в управлении динамической стабильностью. В данной статье рассматриваются

многочисленные элементы энергетических систем с интегрированными системами хранения и дается все-сторонний обзор самых последних научных достижений в этой области.

Поэтому эта статья будет также полезна для энергетических компаний, которые строят новую или модернизируют имеющуюся энергосистему, в состав которой входит генерирующее оборудование на возобновляемых источниках энергии.

**Таблица сокращений**

*Аббревиатуры*

LCOS	Приведенная стоимость хранения
Solar/Wind-PHES	Солнечные / ветряные гидроаккумулирующие электростанции
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
E	Эффективность
P2G2P	Power-to-Gas-to-Power
АЭС	Атомная электростанция
ТЭС	Тепловая электростанция
ПТУ	Паротурбинная установка
ГАЭС	Гидроаккумулирующая электростанция
ДВС	Двигатель внутреннего сгорания
СНЭ	Система накопления энергии
ДГУ	Дизель-генераторная установка
ГТУ	Газотурбинная установка
ГПУ	Газопоршневая установка
ЭХГ	Электрохимический генератор
FESS	Flywheel energy storage – система накопления энергии с маховиком
SM	Synchronous machine – синхронная машина
IM	Induction machine – индукционная машина
RF	Russian Federation – Российская Федерация
IEA	International Energy Agency – Международное Энергетическое Агенство
SRM	Switched reluctance machine – вентильный реактивный электродвигатель
CAES	Compressed air energy storage – система накопления энергии на основе сжатого воздуха
IWPS	Isolated wind power system – изолированная энергосистема с генерацией от ветряных электростанций

WTG	Wind turbine generator – ветрогенераторная установка
HVDC	High voltage direct current – сеть постоянного тока с высоким напряжением
SST	Two-stage solid-state transformer – двухступенчатый твердотельный трансформатор
PV	Photovoltaic sources – фотоэлектрическая панель
NPV	Net present value – чистая приведенная стоимость
DoD	Depth of Discharge – глубина разряда
<i>Надстрочные и подстрочные индексы</i>	
kW / кВт	Киловатт
kWh / кВт*ч	Киловатт-час
Wh/kg	Ватт-час на килограмм
MW / МВт	Мегаватт
\$/кгH <sub>2</sub>	USD за килограмм водорода
km	Километр
NiCd	Никель-Кадмий
NiMH	Никель-Металлогидрид
LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Оксид лития-марганца
LiCoO <sub>2</sub>	Оксид лития-кобальта
LiFePO <sub>4</sub>	Оксид лития-железо
LTO	Литий-титанат (тип батарей)
LFP	Литий-железофосфат (тип батарей)
NaS	Натрий-сера (тип батарей)
NaNiCl	Натрий-никель-хлорид (тип батарей)
Li-Ion	Литий-ион (тип батарей)
DLC	Конденсаторы на основе двойного электрического слоя
HFB	Гибридные проточные батареи
Zn <sup>2+</sup>	Ион цинка



## Системы накопления энергии: применение

Два свойства электроэнергии вызывают проблемы с ее использованием, а также создают рыночный спрос на системы накопления энергии (СНЭ). Начнем с того, что мощность потребляется в тот же момент, когда она создается. Чтобы удовлетворить меняющийся спрос, необходимо постоянно вырабатывать соответствующее количество энергии. Это является проблемой для маломаневренных систем – таких как АЭС и ТЭС с ПТУ. Вторая особенность заключается в том, что, как правило, электростанции располагаются вдали от мегаполисов и предполагают строительство передающих и распределительных сетей, необходимых для передачи электроэнергии конечным потребителям. [1].

### Сглаживание нагрузок (Peak shaving)

Стоимость электроэнергии варьируется в зависимости от периода. Генерирующие компании вынуждены устанавливать менее экономически-эффективное генерирующее оборудование с высокой маневренностью (ДГУ, ГТУ, ГПУ) для компенсации флуктуаций в часы пик. В свою очередь, использование СНЭ позволяет отказаться от неэффективных, но маневренных источников и использовать излишек суточной генерации от наиболее экономически эффективного оборудования. Также СНЭ может снизить затраты на электроэнергию для потребителей напрямую – она может хранить энергию, приобретенную по низким ценам в непиковые часы, и использовать ее в часы пик вместо дорогостоящей электроэнергии [2-4].

### Повышение качества электроэнергии (Grid Stability)

Основной проблемой для энергообеспечивающих предприятий является обеспечение бесперебойного и стабильного электроснабжения потребителей. При недостаточной выработке электроэнергии (дефицит мощности), качество электроэнергии ухудшается, что, в худшем случае, может привести к выводу из строя оборудования и нарушению работы технологических предприятий. Чтобы нивелировать колебания в спросе на электроэнергию, необходимо вводить достаточное количество резерва (маневренное оборудование, находящееся в состоянии горячего резерва),

размер которого оценивается на основе точной оценки спроса [5-6]. Во-вторых, генерирующие мощности должны иметь механизм регулирования частоты, который регулирует выходную мощность в соответствии с ежеминутными изменениями. Традиционные (тепловые) источники энергии работают не на полную мощность, а с положительным и отрицательным запасом мощности (т. е. возможностью увеличить или уменьшить свою мощность), который используется для изменения частоты. Если СНЭ сможет взять на себя колебания выходной мощности, традиционные источники могут быть выведены в режим максимальной эффективности [3]. Так, к примеру, в периоды дефицита мощности в мегаваттных системах для выработки недостающей энергии обычно используются ГАЭС [4].

### Новый рынок (Emerging market)

Двумя ключевыми рыночными драйверами в СНЭ, как важнейшей и развивающейся технологии, являются: использование большего количества возобновляемой энергии и снижение прямого потребления углеводородов, а также все большая имплементация smart-grid систем.

Переменный профиль мощности возобновляемых источников затрудняет регулирование частоты системы, что при достаточно большой величине отклонения ведет к отказам [7]. Также стохастический характер генерации ВИЭ вносит определенные риски, связанные с точным определением количества выработки на прогнозируемый период, что формирует потребность в системах накопления с длительным хранением энергии. Одним из наиболее эффективных способов решения этой проблемы является использование систем водородного накопления энергии [1].

Существующее оборудование может интегрировать в себя СНЭ и включиться в интеллектуальную сеть. Например, при использовании домашней системы управления энергопотреблением с интегрированным СНЭ можно управлять фактическим потреблением энергии из сети, что, в свою очередь, позволит играть активную роль в изменении своих моделей энергопотребления [8]. Широкое распространение электромобилей также позволит включить их в интеллектуальную smart-grid систему и использовать их как СНЭ, позволяющее оптимизировать изменения мощностных потоков в течение дня.





## 1. СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

### Типология (Typology)

Системы накопления электроэнергии обладают широким спектром применений, охватывающих всю цепочку производства и поставки электроэнергии [9-13]. Благодаря недавним прорывам в секторе электромобилей и переходу экономики к более экологичной энергетике спрос на СНЭ резко возрос. Ожидается, что к 2030 году потребности в накоплении

энергии утроятся по сравнению с нынешними значениями [14].

Системы накопления энергии можно разделить по типам хранимой энергии: (i) механическая, (ii) электрохимическая, (iii) химическая, (iv) электрическая, (v) тепловая (vi) магнитная/электромагнитная (Fig. 1).

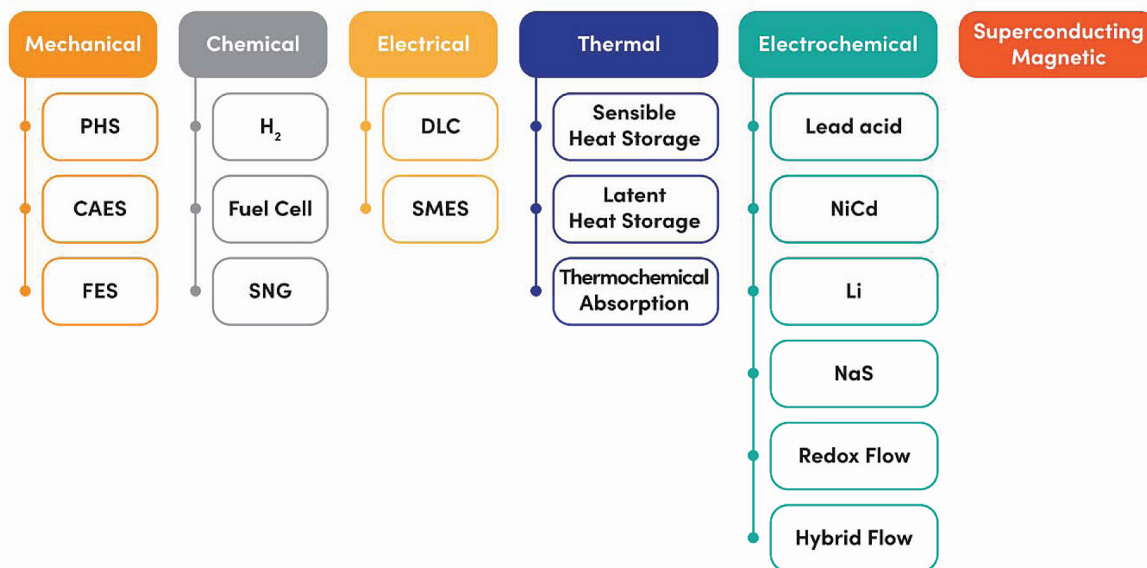


Рис. 1. Типология систем накопления энергии в зависимости от метода хранения  
 Fig. 1. Energy Storage Systems typology by storage method

### Системы хранения механической энергии (MESS)

Существуют три различных типа механических систем накопления энергии – гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС – PHS), системы на основе сжатого воздуха (CAES) и маховики (FES).

Система накопления энергии с маховиком (FESS) основана на кратковременном хранении кинетической энергии вращающегося тела – маховика [15-16]. Маховики, обладая малым временем отклика (< 1 сек), находят своё применение в транспортной отрасли (гибридные автомобили, железнодорожный и морской транспорт) и ветроэнергетических установках. Основным исследовательский фокус применения маховиков направлен на рекуперацию энергии торможения в транспортной отрасли [17-18].

Существуют 4 основных типа маховиков – диски Лавала, сплошной диск, толстостенное и тонкостенное кольца [19].

Каждый маховик характеризуется фактором (K), который отражает использование материала. Удельная энергия, запасенная на единицу

массы, пропорциональна K, что представлено в уравнении. (2). Эти уравнения показывают влияние инерции, скорости и формы на энергию, запасенную в маховике.

Существуют также три различных типа электрических машин (генераторов), которые могут быть подключены к FESS: синхронная машина (СМ), индукционная машина (ИМ) и вентильно-индукторная машина (ВИМ). ВИМ – менее распространенный тип из-за высоких пульсаций тока и сложности управления. Обычно СМ и ИМ используются для высокоскоростных и мощных приложений соответственно. С точки зрения производительности, СМ лучше, чем ИМ, поскольку в начале у него меньший пусковой ток [20].

### FESS + ВЭС

Основной интерес использования маховиков с ветроэнергетическими установками (ВЭУ) состоит в выравнивании профиля мощности, генерируемой на ВЭУ. Такие системы также известны, как

изолированная ветроэнергетическая система (IWPS) [21], которая обычно состоит из ветротурбинного генератора (WTG), потребительской нагрузки, SM и маховика. FESS практически используется в устройствах средней и высокой мощности (от кВт до МВт) в течение коротких периодов времени (секунды/минуты). Galderab et al. [22] использовали FESS для усовершенствования системы передачи высокого напряжения постоянного тока (HVDC), питаемой ветряными электростанциями, через двухступенчатый твердотельный трансформатор (SST).

### ГАЭС (PHES)

Гидроаккумулирующие электростанции составляют 95 % от мировой установленной емкости систем накопления [22]. В насосных гидроаккумулирующих системах два водохранилища на разной высоте используются для перекачки воды в непиковые часы (зарядка), и при необходимости вода течет вниз по течению из верхнего бассейна в нижний резервуар, приводя в движение турбину. КПД ГАЭС составляет от 70 % до 85 % [23]. Основными преимуществами этой системы являются длительный срок службы и практически неограниченная циклируемость, а недостатками – топография и интенсивное землепользование.

Solar/Wind-PHES – это эффективная стратегия смягчения колебаний мощности фотоэлектрических (PV) источников, или ветровых энергоустановок. Система подразумевает использование избытков генерации от ВИЭ для закачки воды в верхний резервуар. Для эффективной работы этой системы необходима большая точность прогнозирования выработки электроэнергии, а также система интеллектуального управления энергией [24] для достижения оптимального режима работы.

Обычно Solar/Wind-PHES рассматривается как способ снижения общих эксплуатационных затрат. Эта система может быть адаптирована для работы в отдаленных районах или на островах без какого-либо энергоснабжения, чтобы снизить приведенную стоимость энергии (LCOE) и повысить надежность электроснабжения [25].

### Компримированный воздух (CAES)

CAES используется в различных отраслях промышленности с восемнадцатого века. Избыточная электроэнергия используется для сжатия воздуха и хранения его в подземных сооружениях или наземной системе контейнеров или труб. Данный тип систем имеет большую удельную мощность, но низкий КПД (менее 50 %), географические ограничения, а также низкую энерговооруженность (Вт\*ч/кг).

В настоящее время Wind-CAES часто используется для хранения энергии на морских ветряных электростанциях [26]. В работе Jin et al.

[27] исследовали небольшую ветроэнергетическую систему с номинальной мощностью ветряной турбины 2 МВт. Используемая емкость хранилища составила 1,32 МВт\*ч. Было отмечено, что предлагаемая компоновка способна стабилизировать выходную мощность системы при номинальной мощности САЭС 0,44 МВт. В примере, изученном в Египте [28], чистая приведенная стоимость (NPV) была увеличена с 207 млн долларов США до 306 млн долларов США за счет использования CAES по сравнению с автономной ветряной турбиной после 25 лет эксплуатации.

### Электрохимические системы накопления энергии

Электрохимические системы основываются на реакциях окисления и восстановления, происходящих в аккумуляторах. Также к этому типу накопителей относятся некоторые суперконденсаторы (ионисторы), принцип работы которых основан на использовании двойного электрического слоя.

Электрохимические накопители энергии способны внести существенный вклад во внедрение устойчивой энергетики (sustainable energy). Электрохимические системы хранения основываются на элементах с высокой энерговооруженностью (батареи) или с высокой удельной мощностью (электрохимические конденсаторы). Батареи же, в свою очередь, можно разделить на аккумуляторы и проточные системы.

### Свинцово-кислотные аккумуляторы (LA)

Свинцово-кислотные аккумуляторы являются наиболее широко используемым типом аккумуляторов в мире, ведя свою историю приблизительно с 1890 года. Срок службы обычно составляет 6-15 лет, или 1500 циклов при глубине разряда 30 % и циклическом КПД 80-90 % [29].

### Nickel-Cadmium and Nickel-Metal Hydride Battery (NiCd, NiMH)

До коммерческого запуска никель-металлогидридных (NiMH) аккумуляторов в 1995 году никель-кадмиевые (NiCd) аккумуляторы использовались примерно с 1915 года. NiMH аккумуляторы содержат все преимущества NiCd аккумуляторов, такие, как более высокая удельная мощность, немного лучшая плотность энергии и большее количество циклов, за исключением 10-кратно меньшей максимальной номинальной мощности. Они гораздо более прочны и безопасны, чем литий-ионные аккумуляторы, однако обладают кратно меньшей энерговооруженностью (Energy density).

### Литий-ионный аккумулятор (Li-Ion)

Литий-ионные аккумуляторы являются наиболее широко используемой технологией в портативных и



мобильных устройствах примерно с 2000 года.

Литий-ионные аккумуляторы – самый быстро развивающийся тип аккумуляторов в последнее время. Использование органических электролитов позволяет повысить напряжение на единичном элементе до 3-4,5 В по сравнению с 1-1,5 В для кислотных и щелочных систем. Данный тип аккумуляторов обладает высокой энергоемкостью, большой глубиной разряда (70-100%). Но ресурсная стабильность и стоимость таких аккумуляторов зависит от типа электрохимических систем, применяемых на катоде и аноде. Также влияет температура и режим эксплуатации. Повышение температуры при эксплуатации или даже хранении, существенно снижает ресурс и увеличивает скорость саморазряда.

Литий-ионные аккумуляторы основываются на процессе интеркаляции и деинтеркаляции ионов лития в активное вещество катода и анода. Таким образом, электроды данного типа АКБ должны изготавливаться из соединений, обладающих хорошо развитой пористой или канальной структурой, обеспечивающей внедрение ионов лития и дальнейшую их экстракцию.

В качестве анодного материала широкое распространение получил графит – изменение объема при интеркаляции лития – менее 12 %. Также в последнее время активное применение нашли оксиды металлов в качестве анодного материала – одним из них является титанат лития. Ресурсные испытания литий-ионных батарей с анодом из титаната лития показывают уникальную для данных систем ресурсную стабильность – от 5000 до 30 000 и более.

В качестве катодных материалов чаще всего выступают: оксид лития марганца ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ), оксид лития-кобальта ( $\text{LiCoO}_2$ ), а также литий-железо-фосфат ( $\text{LiFePO}_4$ ). Так литий-кобальту соответствует наивысшее из всех 3 значения электронной проводимости, а также наименьшая сложность синтеза, однако его структурная и химическая стабильность – самая низкая. Литий-железо-фосфат же, напротив, обладает низкой электронной проводимостью и более сложным синтезом, однако он обладает гораздо большей структурной и химической стабильностью.

### Металло-воздушная батарея

Анод металловоздушной электрохимической ячейки изготовлен из чистого металла, а катод является воздушным электродом (кислородным). На данный момент практически является только воздушно-цинковая батарея с теоретической удельной энергией 1,35 кВтч/кг (без учета кислорода). Спроектировать перезаряжаемые цинк-воздушные элементы сложно ввиду выпадения цинка в осадок при использовании электролита на водной основе. Хотя жизнеспособная электрически перезаряжаемая система металл-воздух могла бы предложить низкие материальные затраты и высокую удельную энергию, ни одна из них еще не достигла рыночного успеха.

### Натриево-серная батарея (NaS)

В натриево-серных батареях твердый керамический электролит из бета-алюминия изолирует активные компоненты (расплавленную серу на аноде и расплавленный натрий на катоде). Батареи NaS имеют время разряда от 6,0 до 7,2 часа и циклируемость около 4500 при полном DoD [30]. Было построено более 200 пилотных установок в Японии, в основном для снижения пиковых нагрузок.

### Натрий-никель-хлоридные-аккумуляторы (NaNiCl)

Натрий-никель-хлоридная батарея (NaNiCl), также известная как батарея ZEBRA, представляет собой высокотемпературную батарею, которая, как и батарея NaS, доступна на рынке примерно с 1995 года [31]. Данный тип батарей превосходит натрий-серные системы по ряду таких показателей как: безопасность, напряжение ячейки и устойчивость к перенапряжению.

### Двухслойные конденсаторы (DLC)

DLC, также известные как суперконденсаторы, представляют собой технологию электрохимических двухслойных конденсаторов (DLC), созданную 60 лет назад. Двумя важными свойствами являются чрезвычайно высокие значения емкости, порядка тысяч фарад, а также способность очень быстро заряжаться и разряжаться благодаря чрезвычайно низкому внутреннему сопротивлению.

### Проточные батареи

НАСА изобрело проточные батареи в начале 1970-х годов в качестве ЭЭС для длительных космических полетов [32]. Они способны хранить энергию в течение нескольких часов или дней. Системы данного типа достигают мощности во многие мегаватты. Проточные батареи бывают двух типов: окислительно-восстановительные проточные батареи (Red-ox) и гибридные проточные батареи.

### Проточная окислительно-восстановительная батарея (Red-ox Flow battery)

Электролиты, присутствующие на отрицательных и положительных электродах проточной окислительно-восстановительной батареи, представляют собой анолит и католит. Во время разряда электроды постоянно снабжаются растворенными активными массами из емкостей; после преобразования продукт возвращается в резервуар. В процессе обмена зарядом между анолитом и католитом, через внешнюю цепь протекает электрический ток. За счёт использования протонообменных мембран в последние годы развитие получили Ванадий-Red-ox системы.



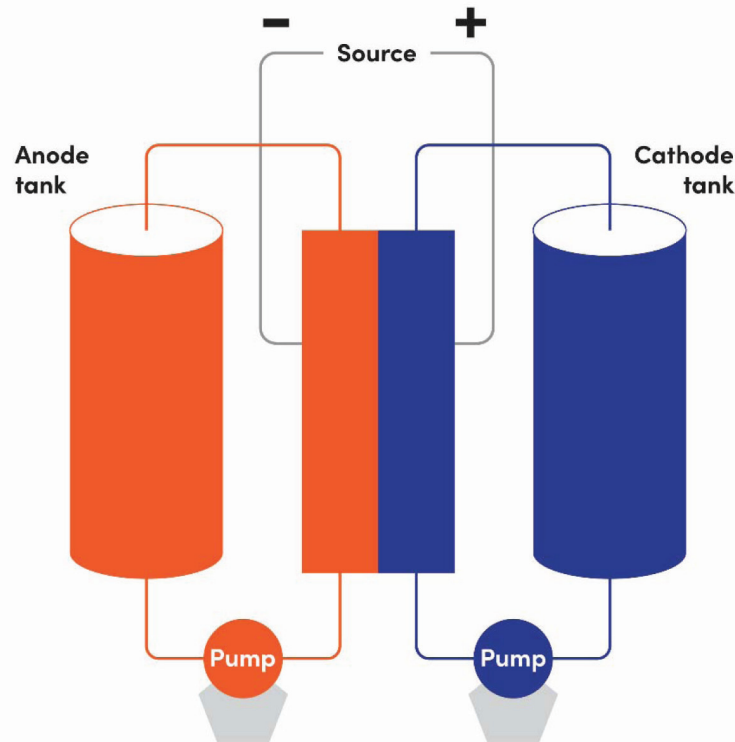


Рис. 2. Принципиальная схема ванадий-редокс батареи  
Fig. 2. Schematics of Redox-flow battery

### Гибридная проточная батарея (HFV)

Одна активная масса в гибридной проточной батарее (HFV) находится внутри гальванического элемента, а другая – снаружи. В HFV объединены преимущества классических аккумуляторных батарей и RFB. К HFV относятся системы Zn-Ce и Zn-Br. Анолит представляет собой ионно-кислотный раствор  $Zn^{2+}$ , а электроды – преимущественно углепластиковые композиты.

Компания Еххон впервые разработала гибридную проточную батарею Zn-Br в начале 1970-х годов, и в настоящее время ее коммерциализируют различные компании. Кроме того, разрабатываются накопители энергии мощностью 5 кВт/20 кВт\*ч для частного пользования [33].

### Водородное накопление (Power-to-Gas | Power-to-Gas-to-Power)

Power-to-Gas системы преобразуют излишек генерации в водород, для его дальнейшего использования в качестве энергоносителя или подмешивания в газопровод.

Power-to-Gas-to-Power подразумевает замкнутый цикл получения водорода из воды методом электролиза и дальнейшего его использование для выработки электроэнергии.

Водородные системы аккумулирования по P2G2P

технологии состоят из: источника энергии, который используется для получения водорода, как правило – методом электролиза воды, системы хранения полученного водорода и водородного электрохимического генератора (ЭХГ), также именуемого топливным элементом. Использование водородных ЭХГ позволяет повысить эффективность системы по сравнению с менее эффективным процессом прямого сжигания энергоносителя.

Системы данного типа способны хранить энергию в течение долгого времени ввиду отсутствия «саморазряда» при хранении водорода. Это вызвано тем, что в отличие от электрохимического метода хранения энергии, здесь используется химический метод, который подразумевает, что процесс не может протекать в обратную сторону самопроизвольно.

Системы водородного аккумулирования на основе P2G2P цикла отличаются от систем на других химических источниках относительно низким КПД – в 40-50 %, однако этот факт полностью компенсируется возможностью длительного хранения энергии, уравнявая эти системы с ГАЭС. В то же время, в отличие от последних – для реализации P2G2P цикла не требуется перепад высот, что позволяет использовать данные системы в любой точке и отменяет необходимость в дорогостоящих и масштабных земельных работах при строительстве.



## 2. Ограничения

Гидроаккумулирующие электростанции, а также подземные хранилища сжатого воздуха, характеризуются относительно большим временем отклика (> 10 с) и большими минимальными размерами системы (> 5 МВт). Поэтому их применение невозможно в системах первичного отклика (first response Grid-ESS), а также в системах малой мощности. Суперконденсаторам и маховикам, в свою очередь, свойственна малая продолжительность разряда (< 1 часа), что не позволяет их применять для длительного энергоснабжения. Сезонное же хранение энергии требует обеспечения электроэнергией в течение нескольких месяцев, и это требование может быть выполнено только с помощью технологий, в которых емкость хранимой энергии (энерговооруженность) полностью независима от мощности системы. Такими системами с отсутствием данной обратной связи являются: проточные ванадий-Red-ox системы и водородное аккумулирование.

Напротив, системы хранения на основе аккумуля-

торных батарей обладают жесткой связью между установленной емкостью и максимальной мощностью, которую система способна выдавать в течение всего цикла разряда. Например, для систем на основе литий-железофосфатных батарей (LFP) характерны максимальные токи разряда в диапазоне 0,5 С – 1 С, в то же время, для литий-титанатных батарей (LTO) максимально допустимый ток разряда может достигать 3 С. Таким образом, система с установленной энергоемкостью в 100 МВт\*ч обладает мощностью в 50-100 МВт для LFP батарей, и до 300 МВт для LTO, соответственно.

Также стоит отметить, что наиболее распространенные механические системы хранения энергии, а именно: системы со сжатым воздухом и гидроаккумулирующие электростанции обладают жесткой привязкой к местности (наличие солевых каверн или большого перепада высот), а потому ограничены в своем применении.

## 3. Техно-экономическая оценка

*Приведенная стоимость хранения энергии (Levelised cost of Storage). Структура стоимости*

Ввиду ограничений доступности использования технологий механического хранения энергии, для сравнения с водородным аккумулированием, предлагается рассмотреть общедоступные наиболее распространенные технологии, а именно: накопители на основе Li-ion батарей, проточные ванадий-Red-ox.

В данном расчёте предлагается рассмотреть сетевой накопитель энергии, подключенный в одну сеть с солнечными и ветровыми электростанциями и

выполняющий несколько ежедневных циклов на оптовом рынке энергии. Такие рынки вознаграждают системы с высокой пропускной способностью: чем больше возможностей у системы накопления выполнять ценную работу, например, перенос накопленной солнечной энергии или энергетический арбитраж, тем больший доход система способна приносить.

Система обладает установленной мощностью в 10 МВт и способна накапливать до 100 МВт\*ч. Для сравнения различных типов систем накопления энергии используется показатель LCOS.

$$LCOS \left[ \frac{\$}{MWh} \right] = \frac{Investment\ cost + \sum_n \frac{O\&M\ cost}{(1+r)^n} + \sum_n \frac{Charging\ cost}{(1+r)^n} + \frac{Replacement\ cost}{(1+r)^n}}{\sum_n \frac{Electricity\ discharged}{(1+r)^n}}$$

Нормированная стоимость хранения (LCOS) определяет дисконтированную стоимость за единицу отдаваемой электроэнергии для конкретной технологии хранения. Она напрямую сопоставима с приведенной стоимостью электроэнергии (LCOE) для технологий производства и является подходящей метрикой для сравнения различных технологий хранения электроэнергии.

Для системы накопления на основе Li-ion были выбраны 2 технологии – литий-железофосфатные и

литий-титанатные аккумуляторы (LFP, LTO). Выбор данных систем обусловлен большим ресурсом – 5000 циклов при DoD 100 % и токе разряда 0,1 С для LFP и 15000 циклов для LTO соответственно.

Для оценки размера начальных капиталовложений использовались как прямые предложения от вендоров, так и отчёты профильных консалтинговых агентств [34-36]. Значения удельных капиталовложений для LTO и LFP систем, а также удельная стоимость обслуживания приведены в таблице ниже.



Таблица 1

LCOS модель. Приведенные стоимостные параметры для Li-ion

Table 1

LCOS model input for Li-ion

Параметр	Ед.изм	Мин.	Макс.
Стоимость LTO аккумуляторов	\$/кВт*ч	500,00	620,00
Стоимость LFP аккумуляторов	\$/кВт*ч	172,00	250,00
Максимальный ток разряда LTO СНЭ	С	3,00	
Максимальный ток разряда LFP СНЭ	С	0,50	
Приведенная стоимость установленной мощности LTO СНЭ	\$/кВт	186,67	289,67
Приведенная стоимость установленной мощности LFP СНЭ	\$/кВт	364,00	583,00
Стоимость системы преобразования энергии	\$/кВт	20,00	83,00
Затраты на обслуживание	\$/кВт*ч	0,8	1,3

Для водородного накопления были выбраны технологии на основе протонообменных мембран, ввиду широкой распространенности данной технологии на момент исследования. Для оценки использовались

отчёты [34, 37-39]. Удельные капиталовложения, а также удельная стоимость обслуживания систем водородного накопления, приведены в таблице ниже.

Таблица 2

LCOS модель. Приведенные стоимостные параметры для водородного накопления

Table 2

LCOS model input for Hydrogen storage

Параметр	Ед.изм	Мин.	Макс.
Стоимость электролизера	\$/кВт	460	1190
Стоимость системы хранения: Каверны	\$/кг	2,5	
Стоимость системы хранения: Баллоны type II	\$/кг	201	
Стоимость топливного элемента	\$/кВт	1800	2600
Стоимость электролизного СТЭКа	\$/кВт	215	555
КПД Электролизера	%	50 %	60 %
КПД Топливного элемента	%	66 %	

Ввиду отсутствия подробных данных по капиталовложениям для проточных ванадий-Redox систем, за основу были взяты данные из [34, 38]. Стоит отметить, что так же, как и у систем с водородным нако-

плением, у данных систем отсутствует обратная связь между установленной энергоёмкостью и установленной мощностью. Использованные для расчётов данные приведены в таблице ниже.

Таблица 3

LCOS модель. Приведенные стоимостные параметры для проточных ванадий-редокс батарей

Table 3

LCOS model input for Vanadium-flow batteries

Параметр	Ед.изм	Мин.	Макс.
Приведенная стоимость установленной мощности	\$/кВт	378	462
Приведенная стоимость установленной емкости	\$/кВт*ч	199,8	244,2
Стоимость системы преобразования энергии	\$/кВт	20,00	83,00
Затраты на обслуживание	\$/кВт*ч	9	11
КПД СНЭ	%	85 %	
КПД системы преобразования энергии	%	90 %	

Сценарные условия для расчётов, такие как стоимость электроэнергии, срок службы системы и ставка

дисконтирования приведены в таблице ниже.

Таблица 4

Сценарные условия для модели LCOS

Table 4

Scenario conditions for LCOS model

Параметр	Ед.изм	Значение
Емкость СНЭ	МВт*ч	100
Установленная мощность СНЭ	МВт	10
Срок службы	г	15
Стоимость электроэнергии в сети	\$/МВт*ч	25
Ставка дисконтирования	%	5 %

Далее по полученным данным был проведен расчёт показателя нормированной стоимости хранения энергии (LCOS – формула 1). Расчёт проводился на основании того, что система успевает совершить полный цикл заряда-разряда в течении дня. Ввиду превышения предельного количества циклов для LFP сис-

тем на 11-м году службы проводится полная замена аккумуляторных батарей. В случае со всеми прочими системами – замены комплектующих за 15 лет работы в данном режиме не требуется. Результаты расчётов представлены в таблице ниже, а также на диаграмме.



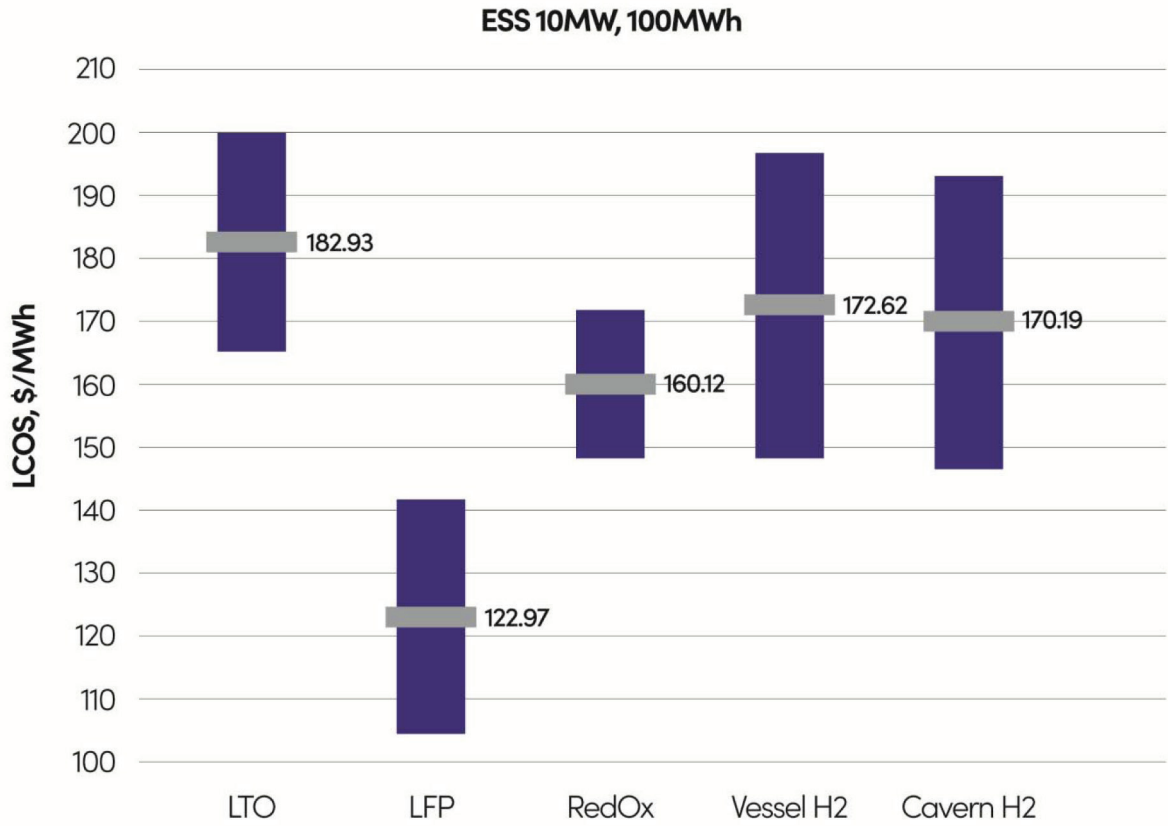


Рис. 3. Результаты расчетов LCOS  
 Fig. 3. LCOS model compilation results

Результаты расчёта LCOS

LCOS model compilation results

Таблица 5

Table 5

LCOS 10MW, 100MWh [\$/MWh]			
LTO	165,22	182,93	200,64
LFP	104,28	122,97	141,66
Vanadium-RedOx	148,12	160,12	172,12
Type II Vessel H2	148,26	172,62	196,98
Cavern Storage H2	145,83	170,19	194,55
	Min	Med	Max

Стоит отметить, что с развитием технологий существенно снижается установочная стоимость генерирующего оборудования водородного цикла (к которому можно отнести электролизер и ЭХГ) [40], что приведёт к дальнейшему уменьшению стоимости хранения энергии. Косвенно данный факт

можно подтвердить тем, что в оценках стоимости хранения электроэнергии, проведенных в работе [41] в 2009 году, стоимостной диапазон соответствовал 200-600 \$/МВт\*ч, против 145-197 \$/МВт\*ч, полученных по результатам расчётов в данной работе.





### Зависимость LCOS от конфигурации системы

Для каждой системы характерна своя уникальная зависимость приведённой стоимости хранения энергии от установленной мощности и от установленной энергоёмкости. Используя те же вводные данные, предлагается рассмотреть влияние этих параметров на стоимость хранения. С этой целью, на основании результатов модели LCOS, полученной в прошлой главе, были выведены следующие зависимости для LCOS:

LCOS от установленной мощности (Рис. 2) – установленная энергоёмкость системы остается неизменной и составляет 100 МВт\*ч. Мощность же системы является переменной. Количество циклов заряда и разряда рассчитывается исходя из логики, что систе-

ма всегда разряжается во время пикового потребления электроэнергии.

LCOS от установленной энергоёмкости (Рис. 3) – установленная мощность системы остается неизменной и составляет 10 МВт. Количество циклов заряда и разряда рассчитывается по следующей логике: системе необходимо во время фонового потребления максимально накапливать энергию до достижения полного заряда. Во время пикового потребления в течение дня система работает на разряд. Количество проданной в сеть электроэнергии остается неизменной во всех вариантах.

LCOS от стоимости электроэнергии (Рис. 4) система остается неизменной – 10 МВт и 100 МВт\*ч соответственно. Изменяется стоимость электроэнергии на заряде.

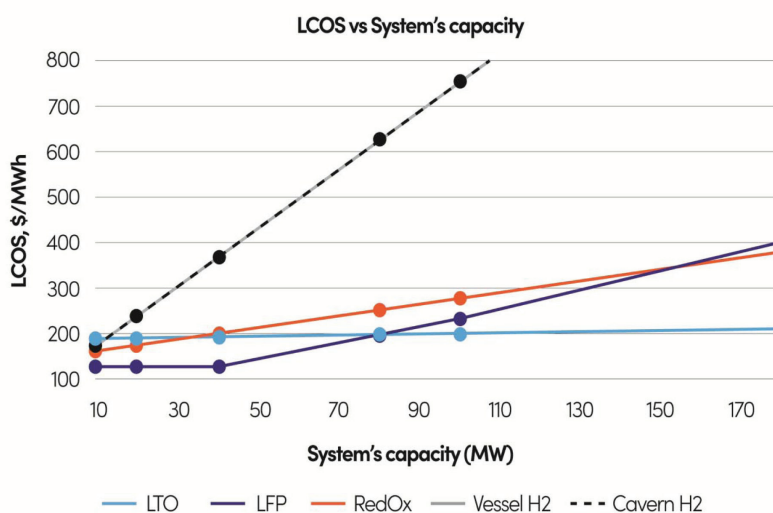


Рис. 4. Зависимость LCOS от установленной мощности  
Fig. 4. LCOS vs Installed Power Capacity

Зависимость LCOS от установленной мощности

LCOS vs Installed Power Capacity

Таблица 6

Table 6

LCOS vs Power							
LCOS/P	10	20	40	80	100	200	300
LTO	182,93	184,32	187,09	192,64	195,41	209,28	223,16
LFP	122,97	125,17	129,56	192,39	232,81	434,91	637,00
RedOx	160,12	172,82	198,22	249,01	274,41	401,41	528,40
Vessel H2	172,62	236,84	365,28	622,16	750,60	1 392,80	2 035,00
Cavern H2	170,19	234,41	362,85	619,73	748,17	1 390,37	2 032,57

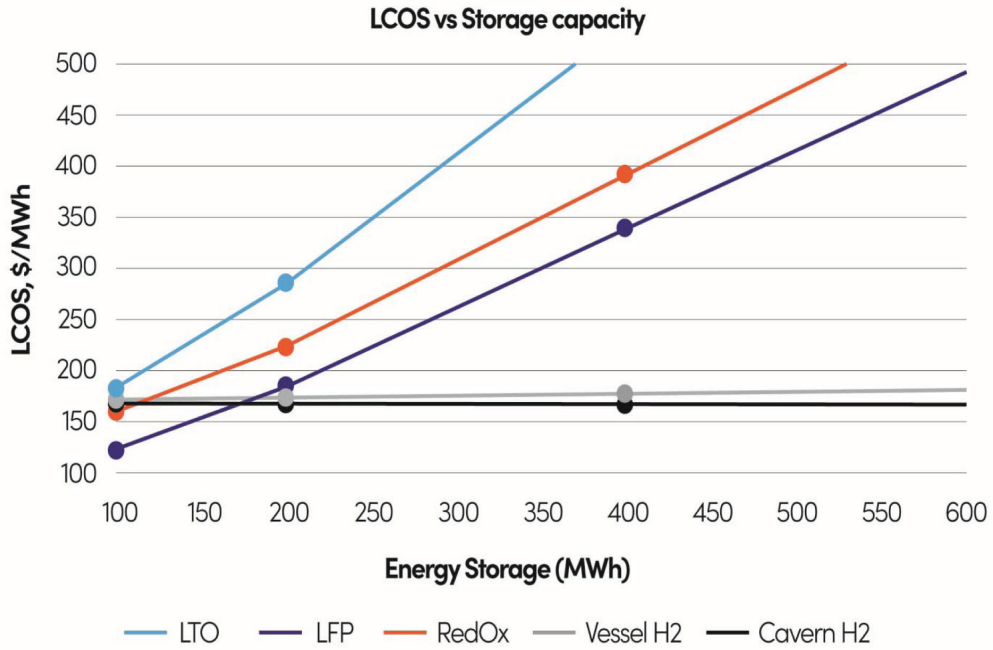


Рис. 5. Зависимость LCOS от установленной энергоемкости  
 Fig. 5. LCOS vs Installed Energy Storage

Зависимость LCOS от установленной энергоемкости

Таблица 7

LCOS vs Installed Energy Storage

Table 7

LCOS vs Energy							
LCOS\Energy	100	200	400	800	1000	2000	3000
<b>LTO</b>	182,93	285,21	541,48	1 054,03	1 310,31	2 591,68	3 873,05
<b>LFP</b>	122,97	184,60	339,59	649,57	804,55	1 579,50	2 354,44
<b>RedOx</b>	160,12	224,80	391,79	725,77	892,76	1727,706	2 562,65
<b>Vessel H2</b>	172,62	171,30	176,30	186,29	191,29	216,26	241,24
<b>Cavern H2</b>	170,19	167,25	168,20	170,09	171,03	175,76	180,48



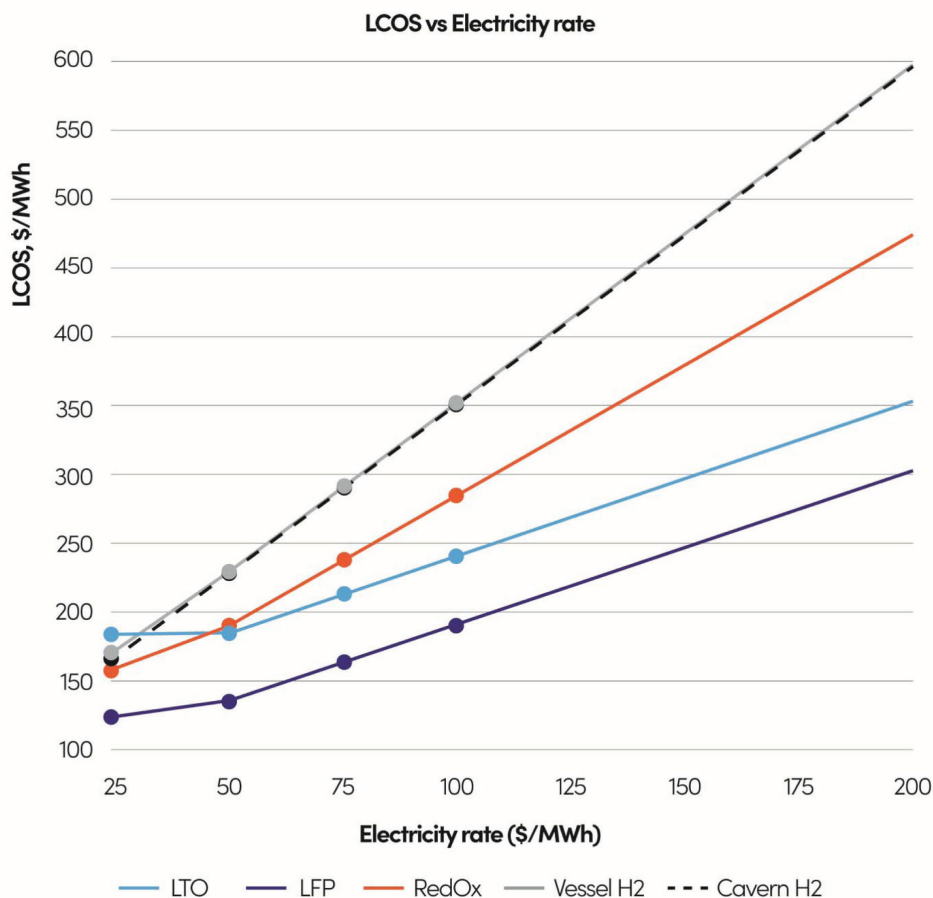


Рис. 6. Зависимость LCOS от стоимости электроэнергии в сети  
Fig. 6. LCOS vs Electricity Rate

Зависимость LCOS от стоимости электроэнергии в сети

Таблица 8

Table 8

LCOS vs Electricity rate

LCOS vs Electricity rate							
LCOS/ER	25	50	75	100	200	400	800
LTO	182,93	184,85	212,63	240,40	351,52	573,74	1 018,18
LFP	122,97	134,88	162,66	190,44	301,55	523,77	968,22
RedOx	160,12	188,53	235,76	282,98	471,89	849,70	1 605,33
Vessel H2	172,62	229,90	290,99	352,08	596,44	1 085,17	2 062,62
Cavern H2	170,19	227,87	288,96	350,05	594,42	1 083,15	2 060,60

#### 4. Результаты

Рассмотрим результаты расчётов LCOS для системы 10 МВт и 100МВт\*ч (Fig. 1). Данные системы находят своё применение в энергосистемах в первую очередь как «системы вторичного реагирования». Даже с учётом замены аккумуляторов – наименьшей

стоимостью хранения обладают системы на основе LFP. Данные системы идеально подходят для сценариев применения, где время разряда составляет от 2 до 10 часов – в системах суточного хранения солнечной энергии. Однако, если время разряда системы

составляет час или меньше – наиболее выгодным вариантом становятся системы на основе литий-титанатных (LTO) батарей (Fig. 2). В виду высокой удельной мощности (токи разряда данных систем могут достигать 3 С и 5 С) данные системы позволяют без увеличения установленной емкости, а в случае с АКБ это ведет к дублированию всей системы, нарастить установленную мощность системы.

В свою очередь, водородное аккумулирование имеет наименьшую зависимость стоимости хранения электроэнергии от установленной энергоемкости (Fig. 3). При времени разряда больше 17-ти часов, системы водородного хранения являются наиболее оптимальным выбором среди рассматриваемых сис-

тем. В то же время, при требуемом количестве часов разряда больше 100 – стоимость хранения энергии во всех других рассматриваемых системахкратно превышает стоимость хранения с помощью водорода. Ключевыми факторами, приводящими к такой разнице, являются:

а) отсутствие «обратной связи» между мощностью и энергоемкостью, характерной для большинства систем хранения, кроме проточных ванадий-Redox батарей и водородного P2G2P цикла;

б) более низкой установочной стоимостью энергоемкости, чем у проточных систем, что объясняется отсутствием связи между количеством электролита внутри системы и запасенной энергией.

## 5. Выводы

Таким образом, водородное аккумулирование энергии является единственным общедоступным способом сезонного накопления энергии. Использование данного типа накопления внутри комплексной энергосистемы позволяеткратно увеличить долю генерации, приходящейся на возобновляемые источники, поскольку даёт возможность хранить излишек генерации в виде водорода для последующего использования в периоды, когда ВИЭ источник недоступен (пасмурное небо / безветренная погода).

Сезонное аккумулирование энергии является особенно актуальным для энергетического рынка Европы, ввиду высокой доли генерации от возобновляемых источников (более 37 %). Являясь единственной системой энергии, кроме ГАЭС, способной к сезонному накоплению – водородный цикл позволяет эффек-

тивно выполнять задачи по переносу избытков генерации от ВИЭ, а также по энергетическому арбитражу в течение суток в качестве дополнительной системы накопления.

Также данная система идеально подходит для энергообеспечения труднодоступных районов, изолированных от общей энергосистемы. Как правило, данные системы работают на привозном углеводородном топливе. Использование комплексных гибридных систем, основанных на использовании возобновляемых источников генерации и водородного аккумулирования, позволит существенно сократить и/или полностью отказаться от использования привозного топлива, что в свою очередь сократит стоимость электроэнергии, а также значительно уменьшит выброс  $\text{CO}_2$  [42].

## References

- [1]. Galitskaya E., Khakimov R., Moskvina A., Zhdaneev O. Towards a new perspective on the efficiency of water electrolysis with anion-conducting matrix
- [2]. Buchana, P.; Ustun, T.S. The role of microgrids & renewable energy in addressing Sub-Saharan Africa's current and future energy needs. In Proceedings of the IREC2015 The Sixth International Renewable Energy Congress, Sousse, Tunisia, 24-26 March 2015; pp. 1-6.
- [3]. Niyigena, D.; Habineza, C.; Ustun, T.S. Computer-based smart energy management system for rural health centers. In Proceedings of the 2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Marrakech, Morocco, 10-13 December 2015; pp. 1-5.
- [4]. International Renewable Energy Agency. From Baseload to Peak: Renewables Provide a Reliable Solution. 2015. Available online: <https://www.irena.org/publications/2015/Jun/From-Baseload-to-Peak-Renewables-provide-a-reliable-solution> (accessed on 9 October 2023).
- [5]. Barik, A. K.; Das, D.; Latif, A.; Hussain, S.; Ustun, T. Optimal Voltage-Frequency Regulation in Distributed Sustainable Energy Based Hybrid Microgrids with Integrated Resource Planning. *Energies* 2021, 14, 2735.
- [6]. International Renewable Energy Agency. Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. 2017. Available online: [https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA\\_Electricity\\_Storage\\_Costs\\_2017\\_Summary.pdf](https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017_Summary.pdf)
- [7]. Impram, S.; Nese, S.V.; Oral, B. Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: A survey. *Energy Strat. Rev.* 2020, 31, 100539.
- [8]. Ustun, T. S.; Hussain, S. M. S. Standardized communication model for home energy management system. *IEEE Access* 2020, 8, 180067-180075.
- [9]. Huff, G., Currier, A. B., Kaun, B. C., Rastler, D. M., Chen, S. B., Bradshaw, D. T. & Gauntlett, W. D. (2013). DOE/EPRI 2013 electricity storage handbook in collaboration with NRECA. Rep. Sand, 340.



- [10]. Fitzgerald, G., Mandel, J., Morris, J., & Touati, H. (2015). The Economics of Battery Energy Storage: How multi-use, customer-sited batteries deliver the most services and value to customers and the grid. Rocky Mountain Institute, 6.
- [11]. Everoze Partners Limited. (2016) Cracking the Code: A Guide to Energy Storage Revenue Streams and How to Derisk Them. <https://energyindemand.files.wordpress.com/2016/07/cracking-the-code.pdf>.
- [12]. Rastler, D. M. (2010). Electricity energy storage technology options: a white paper primer on applications, costs and benefits. Electric Power Research Institute.
- [13]. Hesse HC, Schimpe M, Kucevic D, Jossen A. Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids. *Energies*. 2017; 10(12):2107. <https://doi.org/10.3390/en10122107>
- [14]. Ralon, P., Taylor, M., Ilas, A., Diaz-Bone, H., & Kairies, K. (2017). Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030. International Renewable Energy Agency: Abu Dhabi, United Arab Emirates, 164.
- [15]. Amiryar Mustafa E, Pullen Keith R. A review of flywheel energy storage system technologies and their applications. *Appl Sci* 2017; 7:286. <https://doi.org/10.3390/app7030286>
- [16]. Wicki Samuel, Hansen Erik G. Clean energy storage technology in the making: an innovation systems perspective on flywheel energy storage. *J Cleaner Prod* 2017;162:1118-34. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.132>. ISSN 0959- 6526.
- [17]. ReadMG, SmithRA, PullenKR. Optimisation of flywheel energy storage systems with geared transmission for hybrid vehicles. *MAMT* 2015; 87:191-209. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.11.001>.
- [18]. Rupp A, Baier H, Mertiny P, Secanell M. Analysis of a flywheel energy storage system for light rail transit. *Energy* 2016; 107:625-38. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.051>.
- [19]. Sebastián R, Peña Alzola R. Flywheel energy storage systems Review and simulation for an isolated wind power system. *Renew Sust Energ Rev* 2012; 16+:6803-13. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.08.008>.
- [20]. Abid Soomro, Mustafa E. Amiryar, Keith R. Pullen, Daniel Nankoo, Comparison of performance and controlling schemes of synchronous and induction machines used in flywheel energy storage systems, *Energy Procedia*. In: 3rd annual conference in energy storage and its applications, 3rd CDT-ESA-AC, 11-12 September 2018, Sheffield, UK.
- [21]. Sebastián R, Peña Alzola R. Flywheel energy storage systems Review and simulation for an isolated wind power system. *Renew Sust Energ Rev* 2012; 16+:6803–13. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.08.008>.
- [22]. International Hydropower Association. 2022 Status report. Available online: <https://www.hydropower.org/publications/2022-hydropower-status-report> (accessed on 2nd of October 2023)
- [23]. Ruiz, R. A.; de Vilder, L.; Prasasti, E.; Aouad, M.; De Luca, A.; Geisseler, B.; Terheiden, K.; Scanu, S.; Miccoli, A.; Roeber, V. et al. Low-head pumped hydro storage: A review on civil structure designs, legal and environmental aspects to make its realization feasible in seawater. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2022, 160, 112281.
- [24]. Chaudhary Priyanka, Rizwan M. Energy management supporting high penetration of solar photovoltaic generation for smart grid using solar forecasts and pumped hydro storage system. *Renew Energ* 2018; 118:928-46. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.113>.
- [25]. Ma Tao, Yang Hongxing, Lu Lin, Peng Jinqing. Pumped storage-based standalone photovoltaic power generation system: modeling and techno-economic optimization. *Appl Energ* 2015; 137:649-59. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.005>.
- [26]. Alami Abdul Hai, Aokal Kamilia, Abed Jihad, Alhemyari Mohammad. Low pressure, modular compressed air energy storage (CAES) system for wind energy storage applications. *Renew Energ* 2017; 106: 201-11. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.002>.
- [27]. Jin He, Liu Pei, Li Zheng. Dynamic modeling and design of a hybrid compressed air energy storage and wind turbine system for wind power fluctuation reduction. *Comput Chem Eng March* 2019; 122(4):59-65. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.05.023>.
- [28]. Omar Ramadan, Siddig Omer, Yate Ding, Hasila Jarimi, Xiangjie Chen, Saffa Riffat. Economic Evaluation of installation of standalone wind farm and Wind+CAES system for the new regulating tariffs for renewables in Egypt. *Thermal Sci Eng Progress*. Doi: 10.1016/j.tsep.2018.06.005.
- [29]. Keshan, H.; Thornburg, J.; Ustun, T. S. Comparison of lead-acid and lithium-ion batteries for stationary storage in off-grid energy systems. In *Proceedings of the 4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 14-15 November 2016.
- [30]. Rodrigues, E.; Osório, G.; Godina, R.; Bizuayehu, A.; Lujano-Rojas, J.; Matias, J.; Catalão, J. Modelling and sizing of NaS (sodium sulfur) battery energy storage system for extending wind power performance in Crete Island. *Energy* 2015, 90, 1606-1617.
- [31]. Dustmann, C. -H. Advances in ZEBRA batteries. *Journal of Power Sources*. *J. Power Sources* 2004, 127, 85-92.
- [32]. Ravikumar, M. K.; Rathod, S.; Jaiswal, N.; Patil, S.; Shukla, A. The renaissance in redox flow batteries. *J. Solid State Electrochem.* 2016, 21, 2467-2488.
- [33]. Cavanagh, K.; Ward, J. K.; Behrens, S.; Bhatt, A. I.; Ratnam, E. L.; Oliver, E.; Hayward, J. *Electrical Energy Storage: Technology Overview and Applications*; CSIRO: Canberra, Australia, 2015; EP154168
- [34]. Energy Storage Monitor: Latest trends in energy

storage 2019. World Energy Council. Available online: [ESM\\_Final\\_Report\\_05-Nov-2019.pdf](#) (worldenergy.org) (accessed on 21st of November 2023).

[35]. LAZARD'S LEVELIZED COST OF STORAGE ANALYSIS – VERSION 7.0. Available online: [Levelized Cost Of Energy, Levelized Cost Of Storage, and Levelized Cost Of Hydrogen 2021](#) | Lazard (accessed on 21st of November 2023)

[36]. Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage: 2023 Update. Available online: [Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage: 2023 Update](#) (nrel.gov) (accessed on 21st of November 2023)

[37]. Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment. U.S. Department of Energy Technical Report December 2020. Available online: [https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/Hydrogen\\_Methodology.pdf](https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/Hydrogen_Methodology.pdf) (accessed on 21st of November 2023).

[38]. Manufacturing Cost Analysis of 100- and 250-kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications / DOE Contract

No. DE-EE0005250

[39]. Elena Galitskaya, Oleg Zhdaneev. Development of electrolysis technologies for hydrogen production in the Russian Federation, 19 January 2022, PREPRINT (Version 1) available at Research Square <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1134198/v1>

[40]. Steward D., Saur G., Penev M., Ramsden T. Lifecycle Cost Analysis of Hydrogen Versus Other Technologies for Electrical Energy Storage. Technical Report NREL/TP-560-46719. 2009.

[41]. S. Bazhenov, Yu. Dobrovolsky, A. Maximov, O. V. Zhdaneev, Key challenges for the development of the hydrogen industry in the Russian Federation, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 54, 2022, 102867, ISSN 2213-1388, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102867>

[42]. Elena Galitskaya, Oleg Zhdaneev. Development of electrolysis technologies for hydrogen production in the Russian Federation, 19 January 2022, PREPRINT (Version 1) available at Research Square <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1134198/v1>

*Транслитерация по BSI*





ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

ECONOMICAL ASPECTS

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

ECONOMICAL ANALYSIS IN RENEWABLE ENERGY

Статья поступила в редакцию 11.03.24 Ред. Пер. № 378-003-24

The article has entered in publishing office 11.03.24 Ed. Reg. No. 378-003-24

УДК 51-77

**ПРОГНОЗ ИННОВАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ПО КЛЮЧЕВЫМ  
НАПРАВЛЕНИЯМ ТЕХНОЛОГИЙ ЭНЕРГОПЕРЕХОДА НА БАЗЕ  
АНАЛИЗА ПАТЕНТНОЙ АКТИВНОСТИ**

*Жданев О. В.<sup>1</sup>, Овсянников И. Р.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени  
Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН).  
119991, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, 29.

<sup>2</sup>Акционерное общество «Центр эксплуатационных услуг».  
121099, Москва, Новинский бульвар, 13/4. IRovsyannikov@outlook.com

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.110-132

Заключение совета рецензентов: 21.03.24

Заключение совета экспертов: 26.03.24

Принято к публикации: 29.03.24

Технологии энергоперехода, направленные на повышение энергетической эффективности, являются инструментом реализации задач Парижского соглашения по ограничению роста среднегодовой температуры. Для повышения эффективности внедрения данных технологий необходим прогноз инновационной активности по направлениям водородной энергетики, CCUS и информационным технологиям на основе учета ключевых влияющих факторов, вклада секторов классического ТЭК и уровня взаимовлияния стран. На основе проведенного анализа сделан прогноз роста доли сектора международных вертикально-интегрированных нефтяных компаний (ВИНК) в общем количестве патентов по направлению водородной энергетики на 2,5 п.п. и рост доли сектора национальных ВИНК по направлению технологий CCUS на 10 п.п. к 2027 году. Определено, что инновационная активность секторов электроэнергетики и угольной промышленности по технологиям энергоперехода наиболее устойчива к влиянию внешних геополитических и инфраструктурных кризисов. Рынок технологий CCUS в настоящее время более подвержен эффектам от международной кооперации, чем рынок технологий водородной энергетики. Авторами показано, что снижение уровня международной интеграции на 25 п.п. в последние 5 лет приводит к снижению инновационной активности по технологиям энергоперехода на 15 п.п. С целью определения международных барьеров для внедрения технологий, авторами приведен сравнительный анализ уровня взаимовлияния стран в рамках международных экономических объединений на примере ШОС, БРИКС, МЕРКОСУР. Наибольший уровень взаимовлияния выявлен в рамках взаимодействия ШОС. Согласно проведенного

*Жданев О. В., Овсянников И. Р. Прогноз инновационной активности по ключевым направлениям технологий энергоперехода на базе анализа патентной активности // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 03(420) 2024, с. 110-132*

*Zhdanev O. V., Ovsyannikov I. R. Forecast of innovation activity in key areas of energy transfer technologies based on the analysis of patent activity // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 03(420) 2024, pp. 110-132*

анализа, вступление в 2024 году новых стран в БРИКС приведет к снижению интегрального уровня инновационной активности на 30 п.п. от текущего значения и силы взаимовлияния стран на 50 п.п. С учетом выявленной положительной зависимости выручки и инновационной активности по направлению информационных технологий, инвестиции рекомендуется направить преимущественно в пользу решений Индустрии 4.0.

**Ключевые слова:** водород, водородные технологии, цифровая трансформация, инновации; управление инновациями; международные отношения; экономические союзы.

## FORECAST OF INNOVATIVE ACTIVITY IN KEY AREAS OF ENERGY TRANSITION TECHNOLOGIES BASED ON ANALYSIS OF PATENT ACTIVITY\*

*Ovsyannikov I. R.<sup>1,2</sup>, Zhdaneev O. V.<sup>3,4</sup>*

<sup>1</sup>Joint Stock Company «Operational Services Center»  
121099, Moscow, Novinsky Boulevard, 13/4

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)  
141701, Dolgoprudny, Moscow region, Russia

<sup>3</sup>Federal State Budgetary Institution of Science of the Order of the Red Banner of Labor Institute of Petrochemical Synthesis named after. A.V. Topchiev Russian Academy of Sciences (INHS RAS)  
119991, GSP-1, Moscow, Leninsky Prospekt, 29

<sup>4</sup>Higher Oil School, Yugra State University  
Khanty-Mansiysk, st. Chekhova, 16

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.110-132

Referred: 21.03.24

Received in revised form: 26.03.24

Accepted: 29.03.24

Energy transition technologies aimed at increasing energy efficiency are a tool for achieving the goals of the Paris Agreement to limit the increase in average annual temperature. To increase the efficiency of implementation of these technologies, it is necessary to forecast innovative activity in the areas of hydrogen energy, CCUS and information technology based on taking into account key influencing factors, the contribution of sectors of the classical fuel and energy complex and the level of mutual influence of countries. Based on the analysis, a forecast was made to increase the share of the sector of international vertically integrated oil companies (VIOCs) in the total number of patents in the field of hydrogen energy by 2,5 percentage points. and an increase in the share of the national vertically integrated oil company sector in the area of CCUS technologies by 10 percentage points. by 2027. It has been determined that the innovative activity of the electricity and coal industry sectors in energy transition technologies is most resistant to the influence of external geopolitical and infrastructural crises. The market for CCUS technologies is currently more susceptible to the effects of international cooperation than the market for hydrogen energy technologies. The authors show that a decrease in the level of international integration by 25 percentage points. over the past 5 years has led to a decrease in innovative activity in energy transition technologies by 15 percentage points. In order to identify international barriers to the introduction of technologies, the authors provide a comparative analysis of the level of mutual influence of countries within the framework of international economic associations using the examples of the SCO, BRICS, and MERCOSUR. The highest level of mutual influence was identified within the framework of SCO interaction. According to the analysis, the entry of new countries into BRICS in 2024 will lead to a decrease in the integral level of innovation activity by 30 percentage points. from the current value and strength of mutual influence of countries by 50 percentage points. Taking into account the identified positive relationship between revenue and innovative activity in the area of information technology, it is recommended to direct investments primarily in favor of Industry 4,0 solutions.

**Keywords:** hydrogen, hydrogen technology, digital transformation, technological development; innovation; innovation management; international relationships; economic unions.





Жданеев  
Олег Валерьевич

Zhdaneev Oleg

**Сведения об авторе:** ведущий научный сотрудник Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН). 119991, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, 29. Профессор высшей нефтяной школы, Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

**Место работы:** Советник генерального директора/Старший советник генерального директора ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго РФ/ АО «Центр эксплуатационных услуг».

**Образование:** МГУ им. Ломоносова, Томский политехнический университет.

**Ученая степень:** доктор технических наук.

**Область научных интересов:** Водородная энергетика, технологическое развитие топливно-энергетического комплекса, петролеомика, энергетика

**Публикации:**

ORCID ID: 0000-0002-5287-4397

**Author information:** Leading Researcher Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences (INHS RAS). 119991, GSP-1, Moscow, Leninsky Prospekt, 29. Professor of the Higher Oil School, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Chekhov str., 16.

**Place of employment:** Advisor to the General Director/Senior Advisor to the General Director of the Federal State Budgetary Institution «Russian Energy Agency» of the Ministry of Energy of the Russian Federation/ JSC «Center for Operational Services».

**Education:** Lomonosov Moscow State University, Tomsk Polytechnic University

**Academic degree:** Doctor of Technical Sciences.

**Scientific interests area:** Hydrogen energy, technological development of the fuel and energy complex, petroleomics, energy.

**Publications:**

ORCID ID: 0000-0002-5287-4397



Овсянников  
Иван Романович

Ovsyannikov Ivan

**Сведения об авторе:** старший эксперт.

**Место работы:** АО «Центр эксплуатационных услуг».

**Образование:** Московский физико-технический институт, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации.

**Область научных интересов:** технологическое развитие топливно-энергетического комплекса, диффузия инноваций, энергетика, экономика.

**Публикации:**

ORCID ID: 0009-0004-9048-7402

**Author information:** Senior expert .

**Place of employment:** JSC «Center for Operational Services».

**Education:** Moscow Institute of Physics and Technology, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration.

**Scientific interests area:** technological development of the fuel and energy complex, diffusion of innovations, energy, economy.

**Publications:**

ORCID ID: 0009-0004-9048-7402



## Введение

Согласно докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) процесс изменения климата интенсифицируется, необходимо принятие немедленных мер для смягчения последствий изменения климата. Экспертное сообщество видит решение в развитии возобновляемых источников энергии<sup>1 2 3 4</sup>.

Технологиям CCUS (carbon capture utilisation storage) приписывается ключевая роль в достижении глобальной углеродной нейтральности<sup>5</sup>. Технологии CCUS могут способствовать необходимому снижению уровня диоксида углерода в рамках циклической углеродной экономики путем следования четырем принципам «4R»: сокращение, повторное использование, переработка и утилизация. По оценкам МГЭИК достижение глобальных климатических целей будет на 138 % дороже без развертывания CCUS – включение технологий CCUS в пакет мер по декарбонизации снижает общую стоимость декарбонизации. По оценкам McKinsey и Bloomberg New Energy Finance для выполнения целей Парижского соглашения по климату с помощью технологий CCUS должно быть уловлено более 174 млрд т CO<sub>2</sub> к 2050 году<sup>6 7</sup>.

Водородная энергетика является одной из альтернатив в области достижения глобальной углеродной нейтральности ввиду технологической интеграции с уже существующими отраслями промышленности (включая добычу и переработку углеводородов), что обеспечивает гибкость в цепочке производства и использования энергии<sup>8</sup>. Помимо воздействия на 3 из 4 рычагов «4R» (сокращение, переработка, утилизация), внедрение водородных технологий имеет отраслевые эффекты для реального сектора (поддержание объемов нефтепереработки и работы нефтеперерабатывающих предприятий). Спрос на водород достиг исторического максимума в 2022 году – мировое потребление достигло 95 млн

тонн, что на 3 % больше, чем в прошлом году. В свою очередь, годовое производство водорода с низким уровнем выбросов может достичь 38 млн тонн в 2030 году<sup>9</sup>.

В рамках повышения конкурентоспособности отраслей промышленности в настоящее время большинством стран и крупных компаний (более 3000) реализуются технологические инициативы концепции Индустрии 4.0 (инициатива МЭА «Цифровые электрические сети, управляемые спросом»<sup>10</sup>, Программы международного сотрудничества МЭА<sup>11</sup> и др.), а также разрабатываются соответствующие стандарты (IEC 62264, IEC 61512). Общие экономические эффекты от внедрения ключевых технологий Индустрии 4.0, оцениваемые в 2 трлн долл., уже находят подтверждение в компаниях классического ТЭК (BP, ExxonMobil и др.)<sup>12</sup>. Экологические эффекты в среднесрочной перспективе 4-5 лет представлены сокращением объемов выбросов CO<sub>2</sub> на 200 млн т.

Для эффективного внедрения перспективных технологий энергоперехода, направленных на достижение глобальной углеродной нейтральности, необходимо оценить текущее состояние инновационной активности отраслей классического ТЭК. Целью данной работы является анализ инновационной активности по направлениям водородной энергетике, CCUS и информационным технологиям, включая программно-аппаратные комплексы на основе учета ключевых влияющих факторов, вклада секторов классического ТЭК и уровня взаимовлияния стран. Кроме того, исследование нацелено на построение прогнозных моделей, учитывающих финансово-экономические показатели компаний, с целью определения рекомендаций по повышению инновационной активности по технологиям энергоперехода.

<sup>1</sup><https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>

<sup>2</sup><https://www.ipcc.ch/sr15/>

<sup>3</sup><https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

<sup>4</sup><https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/resources/oil-spill-intelligence-report.html>  
Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS), IEA.

<sup>5</sup><https://www.iea.org/topics/carbon-capture-utilisation-and-storage>

<sup>6</sup><https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>

<sup>7</sup><https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-future-is-now-how-oil-and-gas-companies-can-decarbonize>

<sup>8</sup><https://hydrogencouncil.com/>

<sup>9</sup><https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>

<sup>10</sup><https://www.iea.org/programmes/digital-demand-driven-electricity-networks-initiative>

<sup>11</sup><https://www.iea.org/about/technology-collaboration>

<sup>12</sup>Жданеев, О. В. О приоритетных направлениях и развитии технологий переработки нефти в России / О. В. Жданеев, В. В. Коренев, А. С. Лядов, А. Н. Рубцов. – DOI 10.31857/S0044461820090029 – Текст : электронный // Журнал прикладной химии. – 2020. – Т. 93. – №. 9. – С. 1263-1274.

**Таблица сокращений и обозначений**

<i>ИНХС РАН</i>	Институт нефтехимического синтеза имени А. В. Топчиева РАН	<i>Парижское соглашение</i>	Международный договор об изменении климата
<i>CCUS</i>	Улавливание, использование и хранение углерода	<i>Индустрия 4.0</i>	Неологизм, описывающий стремительный технологический прогресс в 21 веке
<i>ТЭК</i>	Топливо-энергетический комплекс	<i>IEC</i>	Международная электротехническая комиссия
<i>ВИНК</i>	Вертикально интегрированная нефтяная компания	<i>Schlumberger Limited</i>	Нефтесервисная компания
<i>ШОС</i>	Шанхайская организация сотрудничества	<i>Halliburton Company</i>	Американская транснациональная корпорация
<i>БРИКС</i>	Бразилия, Россия, Индия, Китай, Южная Африка	<i>Baker Hughes Company</i>	Американская энергетическая компания
<i>МЕРКОСУР</i>	Международная межправительственная организация (Испанский: Mercado Común del Sur)	<i>Weatherford International plc</i>	Американо-Ирландское акционерное общество с ограниченной ответственностью
<i>ВИНК ИОС</i>	Международная вертикально интегрированная нефтяная компания	<i>Honeywell UOP</i>	Американская международная компания
<i>ВИНК НОС</i>	Национальная вертикально интегрированная нефтяная компания	<i>Linde PLC</i>	Международная химическая компания
<i>IPCC</i>	Межправительственная группа экспертов по изменению климата	<i>Air Liquide SA</i>	Французская транснациональная компания
<i>МЭА</i>	Международное энергетическое агентство	<i>Axens Group</i>	Французская компания в энергетическом секторе
<i>ИТ</i>	Информационные технологии	<i>Eneos Corporation</i>	Японский глобальный нефтяной и металлургический конгломерат
<i>4R</i>	Принципы сокращения, повторного использования, переработки, извлечения ценности	<i>Toyo Engineering Corporation</i>	Японская инженеринговая, снабженческая и строительная компания
<i>МПК</i>	Международная патентная классификация	<i>KBR Incorporated</i>	Американская компания, работающая в области науки, технологий и инженеринга
<i>ПАК</i>	Программно-аппаратный комплекс	<i>Shell plc</i>	Британская многонациональная нефтегазовая компания
<i>OLS</i>	Метод наименьших квадратов	<i>TotalEnergies SE</i>	Французская многонациональная интегрированная энергетическая и нефтяная компания
<i>WLS</i>	Взвешенный метод наименьших квадратов	<i>Chevron Corporation</i>	Американская международная энергетическая корпорация.
<i>n. n.</i>	Процентный пункт	<i>PJSC Lukoil</i>	Российская транснациональная энергетическая корпорация
<i>AR</i>	Модель авторегрессии	<i>China National Petroleum Corporation</i>	Национальная нефтегазовая корпорация Китая
<i>BP</i>	Британская международная нефтегазовая компания	<i>China Petroleum &amp; Chemical Corporation</i>	Китайское нефтегазовое предприятие
<i>НИОКР</i>	Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы	<i>Saudi Arabian Oil Group</i>	Национальная нефтяная компания Саудовской Аравии
<i>ОАЭ</i>	Объединенные Арабские Эмираты	<i>PJSC Gazprom</i>	Российская государственная транснациональная энергетическая корпорация
<i>США</i>	Соединенные Штаты Америки		
<i>СНГ</i>	Содружество Независимых Государств		
<i>USMCA</i>	Соглашение между Соединенными Штатами, Мексикой и Канадой		
<i>McKinsey</i>	Американская международная консалтинговая фирма по стратегии и менеджменту		
<i>Bloomberg New Energy Finance</i>	Информационная компания, специализирующаяся на инвестициях в энергетику и исследования углеродных рынков		



<i>PJSC Rosneft</i>	Российская интегрированная энергетическая компания
<i>Indian Oil Corporation Limited</i>	Индийская нефтегазовая компания
<i>Petróleo Brasileiro S.A.</i>	Государственная Бразильская транснациональная корпорация в нефтяной промышленности
<i>General Electric Company</i>	Американский транснациональный конгломерат
<i>Schneider Electric SE</i>	Французская транснациональная компания
<i>Siemens AG</i>	Немецкий международный технологический конгломерат
<i>Emerson Electric Company</i>	Американская международная корпорация
<i>Ametek Incorporated</i>	Американский международный конгломерат
<i>Mitsubishi Electric Corporation</i>	Японская международная компания по производству электроники и электрооборудования
<i>Legrand SA</i>	Французская промышленная группа
<i>Caterpillar Incorporated</i>	Американский производитель строительного, горнодобывающего и другого инженерного оборудования
<i>Komatsu Limited</i>	Японская международная корпорация
<i>Sandvik AB</i>	Шведская международная инжиниринговая компания
<i>Liebherr Group</i>	Немецко-швейцарский международный производитель оборудования
<i>Epiroc AB</i>	Шведский производитель оборудования для горнодобывающей промышленности и инфраструктуры
<i>Joy Global Incorporated</i>	Компания, производящая и обслуживающая тяжелое оборудование
<i>Hitachi Construction Machinery Company</i>	Японская компания по производству строительного оборудования
<i>WO</i>	Всемирная организация интеллектуальной собственности
<i>EP</i>	Европейское патентное ведомство
<i>JP</i>	Япония
<i>KR</i>	Корея
<i>CN</i>	Китай
<i>AE</i>	Объединенные Арабские Эмираты
<i>AG</i>	Антигуа и Барбуда
<i>AL</i>	Албания
<i>AM</i>	Армения

<i>AP</i>	Африканская региональная организация интеллектуальной собственности
<i>AR</i>	Аргентина
<i>AT</i>	Австрия
<i>AU</i>	Австралия
<i>AZ</i>	Азербайджан
<i>BA</i>	Босния и Герцеговина
<i>BB</i>	Барбадос
<i>BD</i>	Бангладеш
<i>BE</i>	Бельгия
<i>BF</i>	Буркина-Фасо
<i>BG</i>	Болгария
<i>BH</i>	Бахрейн
<i>BN</i>	Бруней-Даруссалам
<i>BO</i>	Боливия
<i>BR</i>	Бразилия
<i>BW</i>	Ботсвана
<i>BX</i>	Ведомство по интеллектуальной собственности Бенилюкса
<i>BY</i>	Беларусь
<i>BZ</i>	Белиз
<i>CA</i>	Канада
<i>CH</i>	Швейцария
<i>CI</i>	Берег Слоновой Кости
<i>CL</i>	Чили
<i>CR</i>	Коста-Рика
<i>CU</i>	Куба
<i>CY</i>	Кипр
<i>DE</i>	Германия
<i>DK</i>	Дания
<i>DO</i>	Доминиканская Республика
<i>DZ</i>	Алжир
<i>EA</i>	Евразийская патентная организация
<i>EC</i>	Эквадор
<i>EE</i>	Эстония
<i>EG</i>	Египет
<i>EM</i>	Ведомство интеллектуальной собственности Европейского Союза
<i>ES</i>	Испания
<i>FI</i>	Финляндия
<i>FR</i>	Франция
<i>GA</i>	Габон
<i>GB</i>	Великобритания





<i>GC</i>	Патентное ведомство стран Персидского залива
<i>GE</i>	Грузия
<i>GH</i>	Гана
<i>GR</i>	Греция
<i>GT</i>	Гватемала
<i>HN</i>	Гондурас
<i>HR</i>	Хорватия
<i>HU</i>	Венгрия
<i>ID</i>	Индонезия
<i>IE</i>	Ирландский
<i>IL</i>	Израиль
<i>IN</i>	Индия
<i>IR</i>	Иран
<i>IS</i>	Исландия
<i>IT</i>	Италия
<i>JO</i>	Иордания
<i>KE</i>	Кения
<i>KG</i>	Кыргызстан
<i>KH</i>	Камбоджа
<i>KZ</i>	Казахстан
<i>LA</i>	Лаос
<i>LI</i>	Лихтенштейн
<i>LK</i>	Шри-Ланка
<i>LT</i>	Литва
<i>LU</i>	Люксембург
<i>LV</i>	Латвия
<i>MA</i>	Марокко
<i>MC</i>	Монако
<i>MD</i>	Молдова
<i>ME</i>	Черногория
<i>MG</i>	Мадагаскар
<i>MK</i>	Македония
<i>MN</i>	Монголия
<i>MT</i>	Мальта
<i>MX</i>	Мексика
<i>MY</i>	Малайзия
<i>MZ</i>	Мозамбик
<i>NE</i>	Нигер
<i>NG</i>	Нигерия

<i>NI</i>	Никарагуа
<i>NL</i>	Нидерланды
<i>NO</i>	Норвегия
<i>NZ</i>	Новая Зеландия
<i>OA</i>	Африканская организация интеллектуальной собственности
<i>OM</i>	Оман
<i>PA</i>	Панама
<i>PE</i>	Перу
<i>PG</i>	Папуа – Новая Гвинея
<i>PH</i>	Филиппины
<i>PL</i>	Польша
<i>PT</i>	Португалия
<i>PY</i>	Парагвай
<i>RO</i>	Румыния
<i>RS</i>	Сербия
<i>RU</i>	Россия
<i>RW</i>	Руанда
<i>SD</i>	Судан
<i>SE</i>	Швеция
<i>SG</i>	Сингапур
<i>SI</i>	Словения
<i>SK</i>	Словакия
<i>SY</i>	Сирия
<i>TH</i>	Таиланд
<i>TJ</i>	Таджикистан
<i>TM</i>	Туркменистан
<i>TN</i>	Тунис
<i>TR</i>	Турция
<i>TW</i>	Тайвань
<i>UA</i>	Украина
<i>UY</i>	Уругвай
<i>UZ</i>	Узбекистан
<i>VE</i>	Венесуэла
<i>VN</i>	Вьетнам
<i>ZA</i>	Южная Африка
<i>ZM</i>	Замбия
<i>IOC</i>	Международная нефтяная компания
<i>NOC</i>	Национальная нефтяная компания
<i>C01B3</i>	МПК водорода; газовых смесей, содержащих водород



<i>C10J</i>	МПК получения природного газа, водяного газа, синтез-газа из твердого углеродсодержащего материала или смесей, содержащих эти газы	<i>E04H7/00</i>	МПК для строительства или монтажа крупногабаритных хранилищ с использованием оборудования
<i>C01B6</i>	МПК гидридов металлов; моноборанов или диборанов	<i>F17B</i>	ИРС газгольдеров переменной емкости
<i>H01M</i>	ИРС для методов и устройств, таких как батареи, для прямого преобразования химической энергии в электрическую	<i>F25</i>	ИРС для охлаждения; комбинированных систем отопления и рефрижерации; систем с тепловыми насосами; производства или хранения льда; сжижения или отвердевания газов
<i>H02J9</i>	ИРС для цепей аварийного или резервного электроснабжения	<i>C07C7</i>	ИРС для очистки, разделения или стабилизации углеводородов; использования присадок
<i>C02F</i>	ИРС для очистки воды, промышленных и бытовых сточных вод или осадка сточных вод	<i>C07C221</i>	МПК для получения соединений, содержащих аминогруппы и атомы кислорода с двойными связями, присоединенные к одному и тому же углеродному каркасу
<i>A62D3/00</i>	ИРС для химических средств борьбы с вредными химическими веществами	<i>C10B39</i>	МПК для охлаждения или тушения кокса
<i>B01D</i>	ИРС для разделения	<i>B01D53</i>	МПК для разделения газов или паров; извлечения летучих паров растворителей из газов; химической или биологической очистки отходящих газов
<i>B63J</i>	ИРС вспомогательных устройств на судах	<i>F25J3/00</i>	ИРС процессов или устройств для разделения компонентов газовых смесей, включающих сжижение или отверждение
<i>C23F</i>	МПК для немеханического удаления металлических материалов с поверхностей	<i>G06F</i>	ИРС цифровой обработки данных с использованием электрических устройств
<i>G21F9/04</i>	МПК для обработки радиоактивно загрязненных материалов и средств их обеззараживания	<i>G06N</i>	ИРС компьютерных систем, основанных на конкретных вычислительных моделях
<i>F02M</i>	МПК для систем подачи топлива или горючей смеси для двигателей, работающих на сжигании топлива в целом	<i>H04L</i>	ИРС передачи цифровой информации
<i>C10L</i>	МПК для топлив, не относящихся к другим подклассам; природный газ	<i>H04M</i>	ИРС для телефонной связи
<i>C10G</i>	МПК для крекинга углеводородных масел; получения жидких углеводородных смесей	<i>G06Q</i>	ИРС для систем или методов обработки данных, специально разработанных для административных, коммерческих, финансовых, управленческих, надзорных или прогнозирующих целей
<i>C10K</i>	МПК для очистки или модификации химических составов горючих газов, содержащих монооксид углерода	<i>G06N</i>	ИРС для компьютерных устройств, основанных на конкретных вычислительных моделях
<i>C01B32</i>	МПК для углерода и его соединений	<i>H04W</i>	ИРС для беспроводных сетей связи
<i>C01B21/00</i>	МПК для азота и его соединений		
<i>C01B23/00</i>	МПК благородных газов; их соединений		
<i>C09C1/48</i>	МПК для приготовления технического углерода		
<i>F17C</i>	МПК для емкостей для хранения газов в сжатом, сжиженном или твердом состоянии; газгольдеры постоянной емкости		
<i>B65G5/00</i>	МПК для транспортных или складских устройств		



<i>H04H</i>	IPС для широкополосной связи
<i>H04M1/72</i>	IPС устройств расширения подстанций; беспроводные телефоны
<i>Financial Modeling Prep</i>	Сервис финансовых показателей
<i>Статистика Дарбина-Уотсона</i>	Тестовая статистика, используемая для выявления наличия автокорреляции
<i>Пробит модель</i>	Тип регрессионной модели
<i>Логит модель</i>	Тип регрессионной модели
<i>Тест Хосмера-Лемешоу</i>	Статистический тест на соответствие и калибровку моделей логистической регрессии
<i>Коэффициент корреляции Пирсона</i>	Коэффициент корреляции, который измеряет линейную корреляцию между двумя наборами данных
<i>Функция Кобба-Дугласа</i>	Особая функциональная форма производственной функции
<i>Hychico</i>	Аргентинская инициатива в области водородных энергетических технологий
<i>Cerro Pabellón Microgrid</i>	Инициатива Чили в области водородных энергетических технологий
<i>ENAEEX-Engie 1+GW green ammonia</i>	Инициатива Чили в области водородных энергетических технологий
<i>Enel Magallanes green methanol/synfuel</i>	Инициатива Чили в области водородных энергетических технологий
<i>Omega Green</i>	Парагвайская инициатива в области водородных энергетических технологий
<i>Verne project</i>	Уругвайская инициатива в области водородных энергетических технологий
<i>ccus</i>	Количество патентов по технологиям ccus
<i>it</i>	Количество патентов в области информационных технологий
<i>h2</i>	Количество патентов по водородным технологиям
<i>dolya</i>	Отношение инвестиций в НИОКР к выручке компании

<i>X</i>	Случайная величина
<i>Y</i>	Случайная величина
<i>Cov</i>	Ковариация исследуемых величин
<i>E</i>	Математическое ожидание
<i>n</i>	Размер выборки
<i>t</i>	Время
<i>P</i>	Вероятность
<i>e</i>	Ошибка регрессии
<i>G</i>	Функция
$\Phi$	Кумулятивная функция распределения стандартного нормального распределения
$R^2$	Коэффициент детерминации
$type_i$	Категориальная переменная, указывающая на тип компании
$y_i$	Предсказанная переменная
$x_{p,i}$	Регрессор в панельной модели данных
$\beta_0$	Коэффициент в регрессионной модели
$\theta_p$	Коэффициент в регрессионной модели
$\pi$	Число пи
$\Lambda$	Лямбда-функция
$\sigma_x$	Стандартное отклонение X
$\sigma_y$	Стандартное отклонение Y
$\mu_x$	Среднее X
$\mu_y$	Среднее Y
$P_{x,y}$	Коэффициент корреляции Пирсона
$u_{it}$	Ошибка регрессии
<i>млрд</i>	Миллиард
$\$$	Доллар
$\%$	Процент
$CO_2$	Углекислый газ



## Методология исследования

Существующие методы анализа инновационной и патентной активности имеют некоторые общие недостатки: фрагментарность данных и отсутствие многомерного подхода [1-13]. Выбранная для исследования модель с панельными данными позволяет комплексно охватить временные и пространственные изменения, предоставляя более полные и надежные результаты. Индивидуально-специфические переменные могут быть включены для учета дополнительных

факторов, уточняя анализ. Кроме того, панельные данные с индивидуально-специфическими переменными предоставляют возможность учесть множество параметров, что обеспечивает многомерный анализ инновационной активности.

В рамках проведенного анализа были исследованы компании топливно-энергетического сектора, разделенные по направлениям:

Разведка и добыча	Переработка и сбыт	ВИНК		Электроэнергетические компании	Производители горно-шахтного оборудования
		IOC	NOC		
Schlumberger Limited	Honeywell UOP	ExxonMobil Corporation	China National Petroleum Corporation	General Electric Company	Caterpillar Incorporated
Halliburton Company	Linde PLC	Shell plc	China Petroleum & Chemical Corporation	Schneider Electric SE	Komatsu Limited
Baker Hughes Company	Air Liquide SA	TotalEnergies SE	Saudi Arabian Oil Group	Siemens AG	Sandvik AB
Weatherford International plc	Axens Group	Chevron Corporation	ПАО Газпром	Emerson Electric Company	Liebherr Group
	Eneos Corporation	BP plc	ПАО Роснефть	Ametek Incorporated	Epiroc AB
	Toyo Engineering Corporation	ПАО Лукойл	Indian Oil Corporation Limited	Mitsubishi Electric Corporation	Joy Global Incorporated
	KBR Incorporated		Petróleo Brasileiro S.A.	Legrand SA	Hitachi Construction Machinery Company

Компании были выбраны на основе объема выручки, рентабельности инвестированного капитала, стоимости активов (в анализ включались также все дочерние общества компаний, занимающиеся патентованием).

Анализ патентов проводился в следующих патентных офисах: WO, US, EP, JP, KR, CN, AE, AG, AL, AM, AO, AP, AR, AT, AU, AW, AZ, BA, BB, BD, BE, BF, BG, BH, BJ, BN, BO, BR, BW, BX, BY, BZ, CA, CF, CG, CH, CI, CL, CM, CO, CR, CS, CU, CY, CZ, DD, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EA, EC, EE, EG, EM, ES, FI, FR, GA, GB, GC, GD, GE, GH, GM, GN, GQ, GR, GT, GW, HK, HN, HR, HU, IB, ID, IE, IL, IN, IR, IS, IT, JO, KE, KG, KH, KM, KN, KP, KW, KZ, LA, LC, LI, LK,

LR, LS, LT, LU, LV, LY, MA, MC, MD, ME, MG, MK, ML, MN, MO, MR, MT, MW, MX, MY, MZ, NA, NE, NG, NI, NL, NO, NZ, OA, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, PY, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SI, SK, SL, SM, SN, ST, SU, SV, SY, SZ, TD, TG, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TW, TZ, UA, UG, UY, UZ, VC, VE, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

Патенты были разделены по «блокам»:

### Водородная энергетика:

1. C01B3 – Водород; газовые смеси, содержащие водород; выделение водорода из смесей, содержащих его; очистка водорода (производство водяного газа или синтез-газа из твердых углеродсодержащих



веществ С 10J).

2. C01B6 – Гидриды металлов; монобораны или дибораны; их комплексные соединения.

3. H01M – Способы и устройства, например батареи, для непосредственного преобразования химической энергии в электрическую.

4. H02J9 – Схемы аварийного или резервного энергоснабжения, например для резервного освещения (с устройствами для зарядки резервных батарей 7/00).

5. C02F – Обработка воды, промышленных и бытовых сточных вод или отстоя сточных вод (процессы для превращения вредных химических веществ в безвредные или менее вредные, путём химических изменений в веществах A62D 3/00; разделение, отстойные резервуары или фильтровальные устройства B 01D; специальные устройства на судах для обработки воды, промышленных и бытовых сточных вод, например для получения питьевой воды B 63J; добавление к воде веществ для предотвращения коррозии C 23F; обработка жидкостей, загрязнённых радиоактивными веществами G 21F 9/04).

6. F02M – Системы подачи топлива или горючей смеси для двигателей, работающих от сжигания топлива вообще и составные части этих систем.

7. C10L – Виды топлива, не отнесенные к другим подклассам; природный газ; синтетический природный газ, полученный способами, не отнесенными к подклассам C 10G или C 10K; сжиженный нефтяной газ; использование добавок к топливам или в топки; растопки.

8. C01B32 – Углерод, его соединения (C01B 21/00, C01B 23/00 имеют преимущество; перкарбонаты C01B 15/10; сажа C09C 1/48).

9. F17C – Сосуды для помещения или хранения газов в сжатом, сжиженном или твердом состоянии; газгольдеры постоянной емкости; наполнение сосудов газами в сжатом, сжиженном или твердом состоянии или выпуск их из сосудов (хранение газов или жидкостей в естественных или искусственных подземных пустотах или полостях B 65G 5/00; строительство или монтаж контейнеров большой емкости методами гражданского строительства E 04H 7/00; газгольдеры переменной емкости F 17B; холодильные машины, установки или системы и устройства для сжигания газов F 25).

### CCUS:

1. C07C7 – Очистка, разделение или стабилизация углеводов; использование добавок.

2. C07C221 – Получение соединений, содержащих аминогруппы и атомы кислорода с двойными связями, присоединенные к одному и тому

же углеродному скелету.

3. C10B39 – Охлаждение или тушение кокса.

4. C01B32 – Углерод; его соединения (C01B 21/00, C01B 23/00 имеют преимущество; перкарбонаты C01B 15/10; сажа C09C 1/48).

5. B01D53 – Разделение газов или паров; извлечение паров летучих растворителей из газов; химическая или биологическая очистка отходящих газов, например выхлопных газов, дыма, копоти, дымовых газов или аэрозолей (извлечение летучих растворителей конденсацией 5/00; сублимация 7/00; охлаждающие трубки, охлаждающие ребра 8/00; разделение трудноконденсирующихся газов или воздуха сжижением F 25J 3/00).

### Информационные технологии:

1. G06F – Обработка цифровых данных с помощью электрических устройств (компьютерные системы, основанные на специфических вычислительных моделях G06N).

2. H04L – Передача цифровой информации, например телеграфная связь (устройства, применяемые как для телеграфной, так и для телефонной связи H04M).

3. G06Q – Системы обработки данных или способы, специально предназначенные для административных, коммерческих, финансовых, управленческих, надзорных или прогностических целей; системы или способы, специально предназначенные для административных, коммерческих, финансовых, управленческих, надзорных или прогностических целей, не предусмотренные в других подклассах.

4. G06N – Компьютерные устройства, основанные на специфических вычислительных моделях.

5. H04W – Сети беспроводной связи (широковещание H04N; коммуникационные системы, использующие беспроводные линии связи для невыборочного соединения, например оконечными беспроводными устройствами H04M 1/72).

Временной промежуток исследования выбран с 2000 по 2023 годы, так как отражает динамику патентной активности по направлениям новых технологий с учетом временного лага. Финансово-экономические данные компаний выгружались из базы данных Financial Modeling Prep (выручка, рентабельность инвестиций, стоимость активов, объем инвестиций в НИОКР и т.д.)<sup>13</sup>. Таким образом получены данные, отражающие количество патентов по каждому из классов МПК для каждой компании каждого сектора в каждый год.

<sup>13</sup> <https://site.financialmodelingprep.com>

Оценка инновационной активности

На Рис. 1 отражена динамика общего количества патентов по трем исследуемым направлениям. Для информационных технологий, включая программно-аппаратные комплексы (ПАК), минимум в 2009 году

объясняется мировым финансовым кризисом. С 2014-2015 годов наблюдается рост числа патентов по технологиям CCUS и водородной энергетике, что также подтверждается другими исследованиями [1].

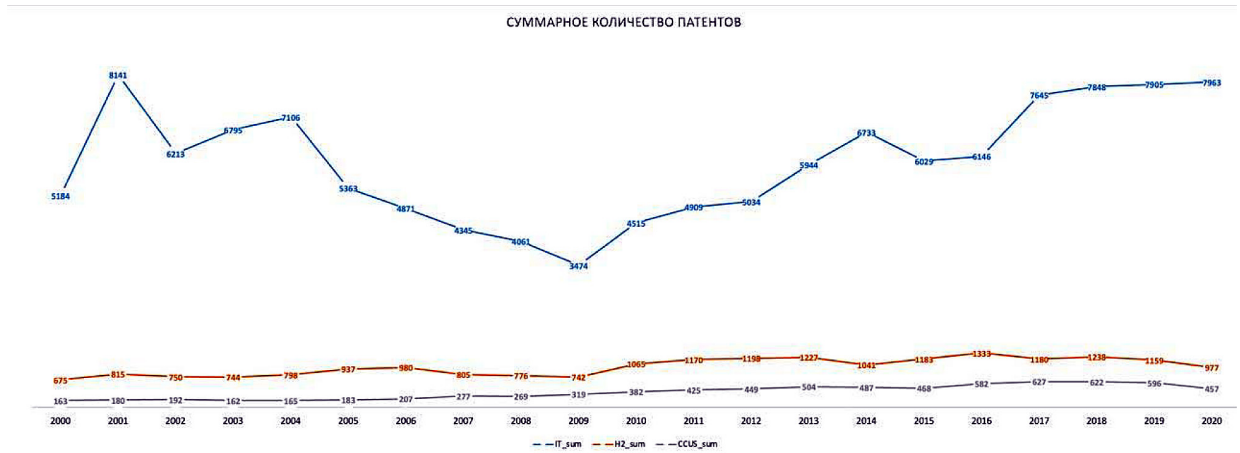


Рис. 1. Общее количество патентов по блокам  
Fig. 1. The total number of patents by blocks

Распределение патентов по секторам изображено на Рис. 2. Доли секторов электроэнергетики и угольной промышленности превышают 40 %, при этом наибольшая доля внутри каждого сектора – патенты по направлению информационных технологий. Наибольшая доля патентов по технологиям водородной

энергетики у национальных вертикально-интегрированных нефтяных компаний и downstream сектора. Это объясняется ростом доли Китая и региона Азии в целом в 2013-2014 гг. по данным направлениям исследований.

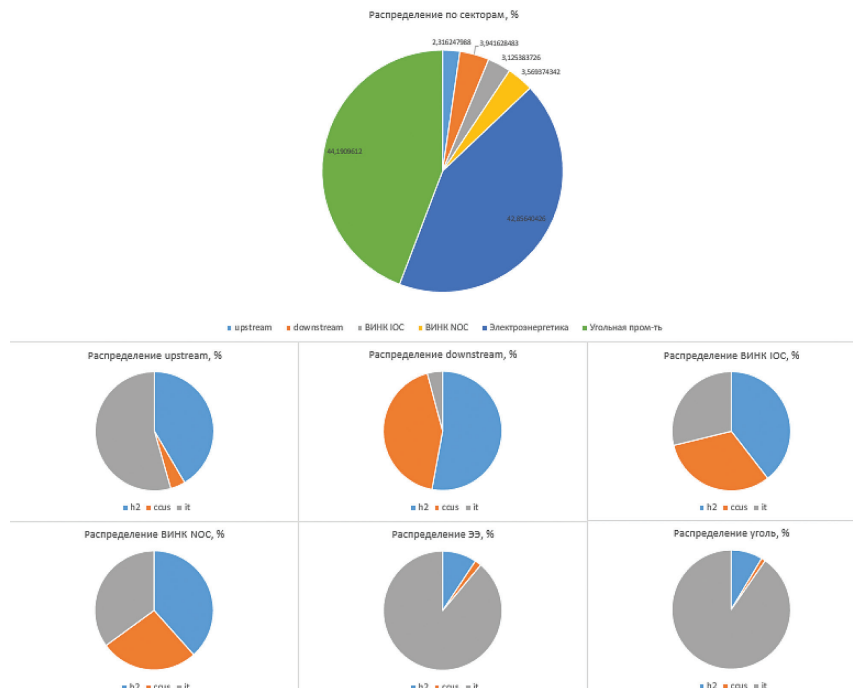


Рис. 2. Распределение долей патентной активности по секторам классического ТЭК  
Fig. 2. Distribution of the shares of patent activity by sectors of the classical fuel and energy sector

Для определения роли каждого сектора и уровня взаимовлияния секторов и направлений патентования друг на друга, использовалась модель с панельными данными.

Модель пула:

$$y_{it} = \theta_1 x_{1,it} + \theta_2 x_{2,it} + \dots + \theta_p x_{p,it} + u_{it}$$

Ввиду возможных различий дисперсий ошибок в уравнениях для разных субъектов OLS-оценки коэффициентов остаются несмещенными, но возникает смещение при оценивании дисперсий этих оценок. Потому в качестве корректировки использовался взвешенный метод наименьших квадратов (WLS), а также OLS с коррекцией стандартных ошибок.

Использовался OLS с коррекцией стандартных ошибок оценок, допущение о перекрестной коррелированности ошибок для разных субъектов и разных AR структур ошибок для разных субъектов, а также спецификация использования статистики Дарбина-Уотсона.<sup>14</sup>

При анализе и прогнозировании уровня инновационной и патентной активности необходим учет всех секторов ТЭК и различных направлений технологий. Коэффициент детерминации, отражающий дисперсию зависимой переменной моделью, указывает на степень объяснения вариации

в количестве патентов и активности патентования в рамках модели, включающей различные сектора ТЭК и направления технологий. Когда секторы ТЭК исключаются из модели, это приводит к уменьшению коэффициента детерминации (с 0,46 до 0,29), что свидетельствует о том, что эти секторы оказывают существенное влияние на количество патентов и активность патентования в целом. Аналогично, исключение других технологий энергоперехода из модели приводит к ухудшению качества модели (с 0,46 до 0,26), указывая на взаимное влияние активности патентования между различными направлениями технологий.

Улавливание, использование и хранение углерода (CCUS). Статистически значимая модель ( $R^2 = 0,8$ ) указывает на то, что модель хорошо объясняет вариативность данных и обладает высокой предсказательной способностью. Результаты анализа показывают, что все секторы ТЭК оказывают статистически значимое положительное влияние на патентную активность в рассматриваемом направлении. Это объясняется тем, что рынок данных технологий относительно «молодой», и участие всех секторов ТЭК в исследованиях по данному направлению имеет высокое значение для формирования этого рынка.

Таблица 1

Уровень влияния секторов ТЭК на патентную активность по технологиям CCUS, в порядке убывания

Table 1

The level of influence of fuel and energy sectors on patent activity for CCUS technologies, in descending order

Downstream
Электроэнергетика
Угольная промышленность
ВИНК ИОС
ВИНК НОС
Upstream

Выявлено, что с ростом инновационной активности по технологиям водородной энергетики и ПАК, наблюдается рост количества патентов по технологиям CCUS. Это особенность рассматриваемого направления – оно находится на стыке технологий и аккумулирует в себе знания и разработки из других разделов.

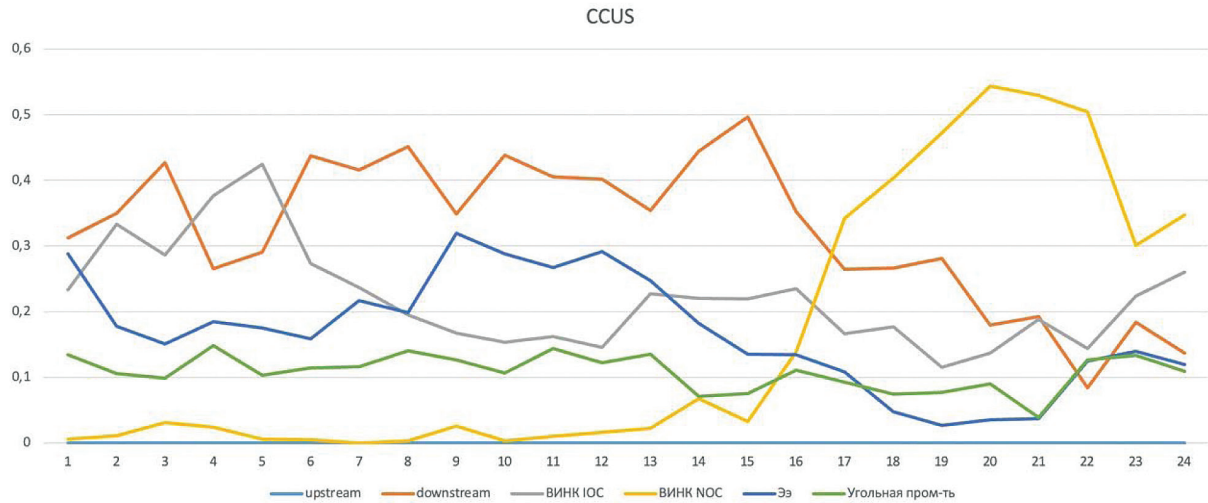
При независимом рассмотрении секторов upstream и угольной промышленности их влияние на патентную активность оказывается отрицательным, что доказывает важность интеграции компаний в кон-

тексте повышения общего уровня инновационной активности. Значение коэффициента при выручке компаний статистически не значимо. Незначимость коэффициента при выручке компаний может быть объяснена целеполаганием компаний и неразвитостью технологий. Новые направления технологий зачастую не могут приносить быструю прибыль и выручку. Однако, учитывая важность развития данных технологий в будущем, а также требования государств, компании вкладываются в исследования и разработку. Статисти-

<sup>14</sup>Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data, Jeffrey M. Wooldridge The MIT Press, 2010.

чески значимое влияние объема инвестиций в научно-исследовательские работы и разработку по данному

направлению подтверждает значимость инвестиций в инновационные проекты для развития технологий.



**Рис. 3.** Динамика изменения влияния секторов ТЭК на патентную активность по технологиям CCUS  
**Fig. 3.** Dynamics of changes in the influence of fuel and energy sectors on patent activity for CCUS technologies

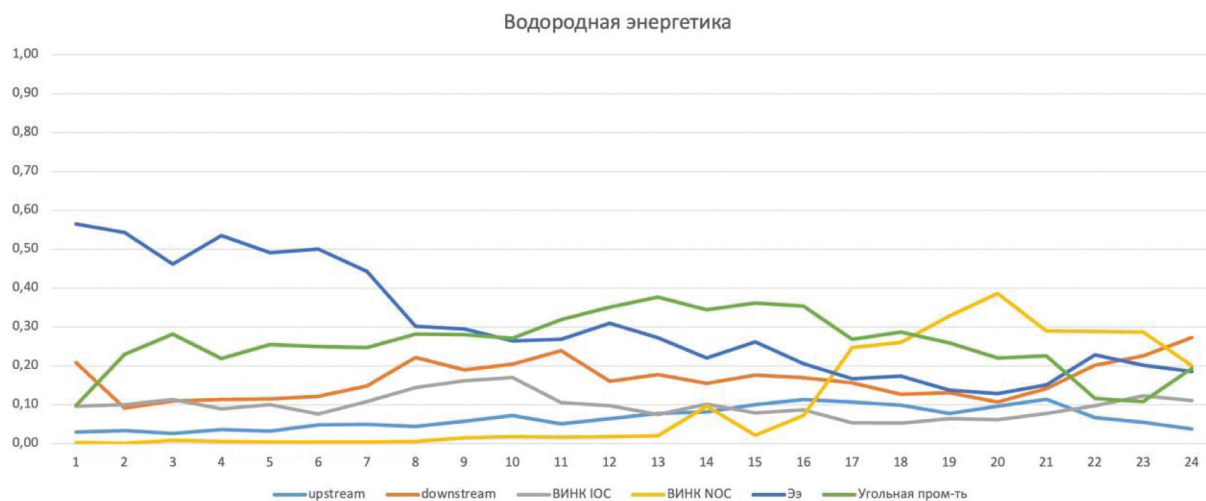
С увеличением фрагментарности мировых рынков и снижением глобализации международным компаниям становится сложнее разрабатывать, внедрять и распространять технологии в мире. В то же время, национальные компании менее подвержены влиянию деглобализации. Этот факт соответствует построенным прогнозным моделям: на период до трех лет ожидается рост доли сектора ВИНК НОС на 10 п.п., в то время как доля сектора ВИНК ИОС снизится на 15 п.п.

На Рис. 3 изображена динамика изменения влияния секторов топливно-энергетического комплекса на патентную активность в области технологий CCUS. Заметен значительный рост (на 50 п.п.) в секторе национальных вертикально-интегрированных компаний, что объясняется увеличением доли Китая в этом секторе.

**Водородная энергетика.** Статистически значимая модель показывает высокую степень объясненной вариации ( $R^2 = 0,74$ ), что свидетельствует о достоверности результатов и хорошем соответствии модели данным. Наблюдаемое отсутствие статистической значимости у сектора downstream и электроэнергетики указывает на то, что эти секторы не оказывают значимого влияния на патентную активность в рассматриваемом

классе технологий. Напротив, сектор угольной промышленности и международные ВИНК демонстрируют положительное влияние, что может свидетельствовать об их активной инновационной деятельности в данной сфере. Сектор upstream, несмотря на отрицательное влияние, необходимо рассматривать в контексте его специфики: данное направление технологий не является приоритетным для этого сектора, что объясняет характер влияния на патентную активность. Для национальных ВИНК их отрицательное влияние на патентную активность может быть обусловлено временным фактором: рост активности наблюдается только в определенные годы (2013-2014 гг.), нет постоянной тенденции.

Рынок технологий водородной энергетики характеризуется большей зрелостью по сравнению с рынком технологий CCUS – относительная важность взаимодействия компаний оказывается ниже (при построении регрессии для каждого сектора не наблюдается изменение знаков при соответствующих коэффициентах). Модель для технологий водородной энергетики также не показывает статистическую значимость коэффициента при выручке компаний. Это может быть обусловлено недостаточным качеством разработок с точки зрения повышения выручки в рамках всех рассматриваемых секторов.



**Рис. 4.** Динамика изменения влияния секторов ТЭК на патентную активность по технологиям водородной энергетики  
**Fig. 4.** Dynamics of changes in the influence of fuel and energy sectors on patent activity in hydrogen energy technologies

Рынок технологий водородной энергетики становится менее фрагментированным и более открытым, что отражает его более высокий уровень развития по сравнению с рынком технологий CCUS. Это соответствует прогнозным моделям на три года: ожидается рост доли сектора downstream (на 4 п.п.), угольной промышленности (2 п.п.) и ВИНК ИОС (2,5 п.п.), а также снижение доли секторов ВИНК НОС (3,5 п.п.), электроэнергетики (3 п.п.) и upstream (2 п.п.).

На Рис. 4 представлена динамика изменения влияния секторов топливно-энергетического

комплекса на патентную активность в сфере водородной энергетики. В период с 2014 по 2016 годы наблюдался рост доли ВИНК НОС, что объясняется увеличением доли Китая в общем количестве патентов по данному направлению данной сферы.

*Информационные технологии.* Статистически значимая модель демонстрирует  $R^2 = 0,65$ , что означает достоверность результатов. Все сектора ТЭК имеют положительное статистически значимое влияние. Подтверждается общемировой тренд на цифровую трансформацию и целесообразность внедрения новых передовых IT решений.

Таблица 2

Влияние секторов ТЭК на патентную активность по направлению информационных технологий, в порядке убывания

Table 2

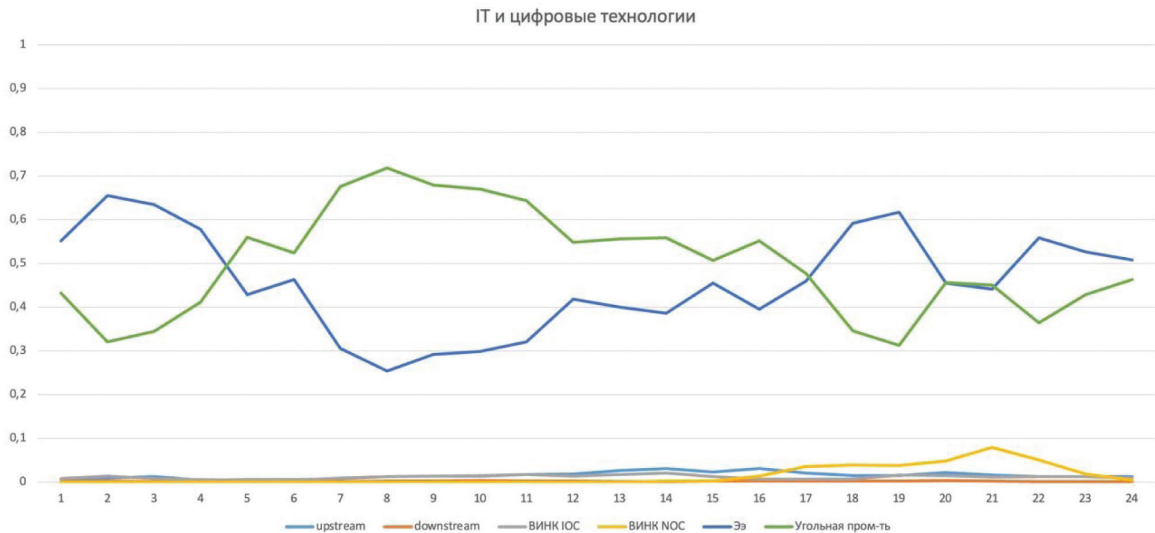
The influence of fuel and energy sectors on patent activity in the field of information technology, in descending order

Электроэнергетика
Угольная промышленность
Upstream
ВИНК ИОС
ВИНК НОС
downstream

В отличие от двух других рассматриваемых направлений, внедрения программно-аппаратных комплексов имеют статистически значимое влияние на

выручку компаний. Инвестиции в НИОКР также оказывают значимое влияние на патентную активность по данному направлению.





**Рис. 5.** Динамика изменения влияния секторов ТЭК на патентную по направлению цифровых технологий  
**Fig. 5.** Dynamics of changes in the influence of fuel and energy sectors on patent protection in the field of digital technologies

Исходя из построенных прогнозных моделей на ближайшие три года, ожидается увеличение доли в общем количестве патентов по направлению цифровых технологий сектора угольной промышленности на 4 п.п., что будет сопровождаться снижением доли сектора электроэнергетики на 2 п.п. Прогнозируется также увеличение доли сектора ВИНК НОС на 0,7 п.п., сектора ВИНК ИОС на 1 п.п. и сектора upstream на 0,3 п.п.

Сектора электроэнергетики и угольной промышленности являются основными игроками в данном направлении (Рис. 5), что подтверждается прогнозными моделями. Так же, как и для технологий CCUS и водородной энергетики, отмечается рост доли сектора ВИНК НОС в период с 2014 по 2016 годы, что связано с увеличением доли Китая в данной области.

**Задача классификации сектора**

При выполнении классификации, необходимо решить обратную задачу: на основе данных по количеству патентов определить вероятность отнесения к определенному сектору ТЭК.

$$type_i = \beta_0 + \beta_1 * ccus + \beta_2 * h2 + \beta_3 * it + \beta_4 * dolya + e;$$

где *type* – категориальная переменная, обозначающая тип компании (1-6); *ccus*, *it*, *h2* – количество патентов в соответствующих направлениях; *dolya* – отношение инвестиций в НИОКР к выручке компании.

Для решения применялась модель бинарного выбора:

$$y_i = G(\theta_1 x_{1,i} + \theta_2 x_{2,i} + \dots + \theta_p x_{p,i}) + e_i;$$

где функция G имеет S-образную форму и принимает значения от 0 до 1.

Модель бинарного выбора (с возрастанием z возрастает вероятность  $y = 1$ ):

$$E(y_i | x_i) = P\{y_i = 1 | x_i\} = G(\theta_1 x_{1,i} + \theta_2 x_{2,i} + \dots + \theta_p x_{p,i}) = G(z).$$

При решении применялась модель пробит:

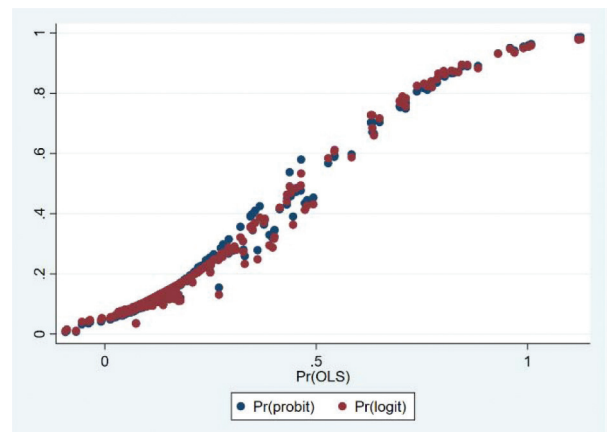
$$G(z) = \Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-t^2/2} dt;$$

а также модель логит:

$$G(z) = \Lambda(z) = \frac{e^z}{1 + e^z}.$$

В рамках модели пробит вероятность быстро стремится к 1 при росте индекса и к 0 при его снижении. Оценки симметричны относительно выбора 0 и 1. Для модели логит – вероятность стремится к соответствующим пределам медленнее, чем пробит. Оценки симметричны относительно выбора 0 и 1.

Ниже приведены графики (Рис. 7-8) предсказанных вероятностей нелинейных моделей в линейной (по оси абсцисс) для двух секторов ТЭК.



**Рис. 7.** Электроэнергетика  
**Fig. 7.** Electric power industry



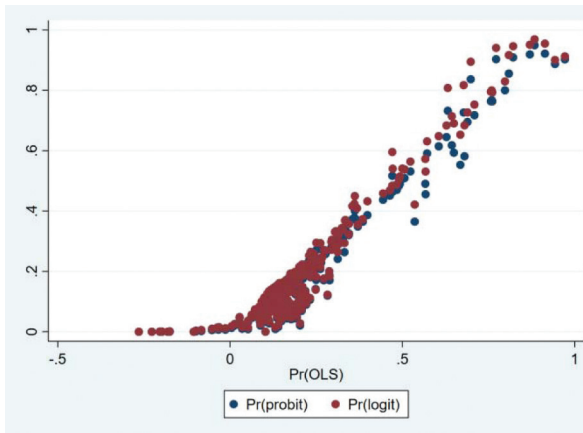


Рис. 8. Угольная промышленность  
Fig. 8. Coal industry

Для проверки адекватности модели для каждого сектора использовался тест Хосмера-Лемешоу с нулевой гипотезой «модель специфицирована верно». Из полученных результатов моделирования выявлено, что компании из сектора электроэнергетики и угольной промышленности классифицируются лучше других четырех секторов. Полученные результаты характеризуют данные секторы как наиболее устойчивые с точки зрения инноваций – портфель патентов и динамика инновационной активности сохраняется на протяжении исследуемого промежутка времени; инновационная активность компаний данных секторов менее подвержена влиянию снижения уровня глобализации и другим внешним шокам.

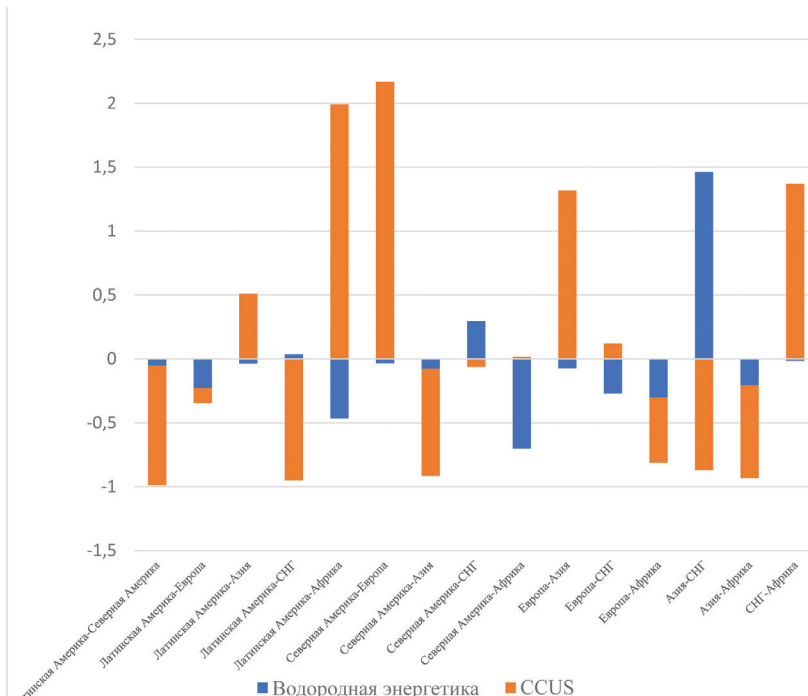


Рис. 9. Изменение «силы» взаимовлияния стран по технологиям. Динамика изменения за 2000-2016 к 2016-2021, %  
Fig. 9. The change in the «strength» of the mutual influence of countries on technology. Dynamics of change for 2000-2016 to 2016-2021, %

Взаимовлияние регионов

Анализ взаимовлияния регионов предполагает исследование динамики инновационной активности перспективных направлений (CCUS, водородная энергетика и информационные технологии) между регионами Латинской Америки, Северной Америки, Европы, Азии, стран СНГ и Африки.

При анализе зависимостей и взаимовлияний между регионами использовался коэффициент корреляции Пирсона:

$$\rho_{X,Y} = \frac{cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X-\mu_X)(Y-\mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y};$$

где:  $(X, Y)$  – пара случайных величин;  $\sigma_X$  – стандартное отклонение от  $X$ ;  $\sigma_Y$  – стандартное отклонение от  $Y$ ;  $cov(X, Y)$  – ковариация исследуемых величин;  $\mu_X$  – среднее для  $X$ ;  $\mu_Y$  – среднее для  $Y$ ;  $E$  – математическое ожидание.

При интерпретации коэффициента корреляции использовался статистический критерий с нулевой гипотезой об уровне значимости:

$$t = \frac{\rho_{X,Y} \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\rho_{X,Y}^2}}$$

где:  $n$  – объем выборки.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Из Рис. 1 и Рис. 9 видно, что снижение уровня взаимовлияния между странами по технологиям водородной энергетики и CCUS приводит к общему снижению инновационной активности и количества патентов по данным технологиям. Таким образом, с целью повышения выручки компаний, реализующих исследования по данным технологиям, существенно важно поддерживать международную интеграцию, а странам, реализующим проекты, направленные на снижение выбросов CO<sub>2</sub> – открытость экономики и снижение уровня протекционизма научных исследований.

Рост «силы» взаимовлияния по направлениям водородной энергетики наблюдается только при участии стран СНГ, что может быть объяснено целеполаганием крупного игрока региона – Российской Федерации, связанного с ростом компетенций по технологиям водородной энергетики.<sup>15</sup> При этом наибольший рост наблюдается между СНГ и Азией, что может быть связано с сотрудничеством стран в рамках ШОС и БРИКС, в рамках которых определены приоритетные направления развития стран-участниц в области энергетики.<sup>16</sup> По этой же причине наблюдается рост «силы» взаимовлияния между СНГ и Африкой по технологиям CCUS.

Страны Азиатского региона в промежуток 2016-

2021 гг. снизили уровень взаимовлияния со странами СНГ и Африкой (несмотря на сотрудничество крупных игроков региона в рамках стратегических партнёрств) по технологиям CCUS, одновременно нарастив сотрудничество со странами Европы. Аналогично наблюдается рост взаимовлияния по технологиям CCUS между странами Северной Америки и Европы. В обоих случаях это может быть объяснено видом функции Кобба-Дугласа: чем ближе друг к другу коэффициенты, отражающие уровень технологической производительности стран, тем больше изменение «силы» взаимовлияния регионов [14-16]. Наибольшая близость соответствующих коэффициентов у стран региона Северной Америки и Европы, что характеризуется на Рис. 13 наибольшим положительным изменением «силы» взаимовлияния.

Зависимость уровня взаимовлияния регионов от уровня технологической производительности стран по направлениям технологий CCUS подтверждает гипотезу о «молодом» рынке данных технологий. Даже в рамках стратегических объединений (ШОС, БРИКС и т.п.) странам с низким уровнем технологической производительности (в рамках функции Кобба-Дугласа) необходимо повышать уровень развития технологий для достижения большего уровня взаимовлияния по технологиям CCUS.

Таблица 3

Уровень взаимовлияния между регионами, [0,1]

Table 3

The level of mutual influence between regions, [0,1]

Водородная энергетика / CCUS/ Информационные технологии	Латинская Америка			Северная Америка			Европа			Азия			СНГ		
Северная Америка	Green	Green	Yellow	-	-	-									
Европа	Green	Yellow	Red	0,8	0,4		-	-	-						
Азия	Green	Yellow	Red	0,8	0,3		Green	Green	Red	-	-	-			
СНГ	Green	Green	Yellow	Blue	Green	Yellow	Red	Green	Red	Blue	Red	Red	-	-	-
Африка	Red	Red	Yellow	0,2	0,6		Red	Red	Yellow	Red	Red	Yellow	0,3	Red	Yellow

В Табл. 3 обозначено попарное взаимовлияние между регионами, зеленым цветом обозначено сильное влияние, оранжевым – среднее, красным – отсутствие статистически значимого взаимовлияния. У стран Африки практически отсутствует взаимовлияние между другими регионами по всем направлениям технологий, что может быть объяснено существен-

ным отставанием уровня капиталовооружённости и производительности труда.

Обозначенные синим цветом ячейки в Табл. 3 означают сильную обратную зависимость. При росте количества патентов по направлениям водородной энергетики в странах Северной Америки и Азии, в странах СНГ наблюдается значительное снижение

<sup>15</sup><http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqCvsexl.pdf>

<sup>16</sup><https://rosenergo.gov.ru/upload/medialibrary/c23/9vtw95c0exlkymx136y00gjzsfbgsee9.pdf>



инновационной активности по данным технологиям. Данная статистика указывает на риск снижения уровня технологического суверенитета стран СНГ по технологиям водородной энергетики и может служить поводом для наращивания взаимодействия по данным технологиям с другими регионами.

Страны Латинской Америки имеют существенное взаимовлияние между всеми другими регионами по технологиям водородной энергетики, что указывает на сильную зависимость региона от международной интеграции и участия в международных исследованиях. В регионе реализуются крупные проекты: Nuchico (Аргентина), Cerro Pabellón Microgrid (Чили), ENAEX-Engie 1+GW green ammonia (Чили), Enel Magallanes green methanol/synfuel (Чили), Omega

Green (Парагвай), Verne project (Уругвай), а 11 стран региона опубликовали водородные стратегии и дорожные карты<sup>17</sup>. Данная статистика отражает общую тенденцию региона на развитие технологий водородной энергетики, потому странам Латинской Америки необходимо поддерживать высокий уровень международной интеграции.

Азиатские страны характеризуются сильным взаимовлиянием по направлениям водородной энергетики и CCUS и отсутствием взаимовлияния по направлению информационных технологий. Данная статистика может быть объяснена целеполаганием лидеров данного региона (например – Китай) на декарбонизацию и снижение выбросов.

Таблица 4

Взаимовлияние стран в международных экономических объединениях

Table 4

Mutual influence of countries in international economic associations

	Водородная энергетика	CCUS	Информационные технологии
ШОС	0,9	0,8	0,9
МЕРКОСУР (Торговый Альянс Юга Америки)	0,3	0,1	0,3
БРИКС (до 2024 г.)	0,8	0,7	0,8
БРИКС (после 2024 г.)	0,5	0,4	0,5
Соглашение США-Мексики-Канады	0,8	0,6	0,5

Из Табл. 4 видно, что интегральное взаимовлияние стран внутри экономического объединения «Шанхайской организации сотрудничества» выше по каждому из исследуемых технологий, чем между любыми регионами мира. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости интеграции стран в международные экономические союзы на примере правил ШОС.

Несмотря на то, что БРИКС уделяет большое внимание взаимодействию в рамках энергетического сектора, уровень взаимовлияния стран ниже, чем в ШОС, что может быть обусловлено другим составом стран-участниц (в частности, в ШОС входят страны Азиатского региона, в то время, как страны-участницы БРИКС находятся в разных регионах)<sup>18 19</sup>. На примере межгосударственного объединения БРИКС показано, что страны-участницы до 2024 года имеют существенную внутреннюю интеграцию и взаимовлияние, в то время как уровень взаимовлияния стран, присоединившихся в 2024 году (Египет, Эфиопия, Иран, Саудовская Аравия, ОАЭ) почти в два раза

ниже. Данная статистика хоть и указывает на эффективность взаимодействия стран в рамках БРИКС по направлениям водородной энергетики, технологиям CCUS и решениям ПАК, но и отражает риск снижения уровня взаимовлияния, начиная с 2024 года ввиду вступления новых стран. Как ранее показано в настоящей работе, рынок технологий CCUS характеризуется высоким уровнем взаимовлияния только стран и регионов с близкими коэффициентами в функции Кобба-Дугласа, а также географической близостью (на примере ШОС). Таким образом, следует ожидать существенного (почти в 2 раза) снижения уровня взаимовлияния стран-участниц БРИКС по исследуемым технологиям, и, как следствие, снижение уровня инновационной активности каждой отдельной страны.

Уровень взаимовлияния стран в рамках USMCA (Соглашение США-Мексики-Канады) ниже, чем в рамках других стратегических взаимодействий. Это связано с тем, что USMCA представляет собой в первую очередь зону свободной торговли, таргетирующую стимулы для производства автомобилей в США,

<sup>17</sup> <https://www.iea.org/reports/hydrogen-in-latin-america>

<sup>18</sup> <https://rus.sectso.org/politics/>

<sup>19</sup> <https://infobrics.org/document/96/>

расширение доступа к канадскому рынку молочных продуктов. Низкий уровень влияния не только на технологическое взаимодействие, но и на экономку стран-участниц подтверждается исследованиями.<sup>20</sup>

В рамках МЕРКОСУР также отсутствует взаимовлияние между странами по всем рассматриваемым технологиям, что указывает на необходимость повышения качества данной интеграции.

### Выводы и рекомендации

В работе была исследована динамика изменения количества патентов по трем направлениям технологий: CCUS, водородная энергетика и информационные технологии, включая программно-аппаратные комплексы. Показано, что снижение уровня взаимовлияния стран приводит к снижению инновационной активности по данным технологиям. Выявлено, что рынок технологий CCUS более подвержен международной интеграции и находится на стадии развития.

Ввиду снижения уровня глобализации к 2027 году прогнозируется рост доли сектора национальных вертикально-интегрированных нефтяных компаний по технологиям CCUS на 10 п.п., сопровождающийся снижением доли международных ВИНК на 15 п.п.

Относительная устойчивость рынка технологий водородной энергетики подтверждается меньшим в абсолютном значении прогнозируемом изменении доли секторов. Ожидается рост доли сектора downstream на 4 п.п., угольной промышленности 2 п.п. и ВИНК ИОС 2,5 п.п., а также снижение доли секторов ВИНК НОС 3,5 п.п., электроэнергетики 3 п.п. и upstream 2 п.п. Единственный сектор, для которого ожидается снижение доли патентов по информационным технологиям – электроэнергетика (на 2 п.п.).

В Табл. 5 обозначены ключевые выводы из прогнозных моделей, знаком «↑» обозначен прогнозируемый рост доли сектора, а знаком «↓» – снижение.

	CCUS	Водородная эн-ка	Информационные технологии
Upstream	↓	↓	↑
Downstream	↓	↑	↓
ВИНК ИОС	↑	↑	↑
ВИНК НОС	↑	↓	↑
Электроэнергетика	↑	↑	↓
Угольная пром-ть	↓	↑	↑

Вступление новых стран в БРИКС приведет к увеличению уровня взаимовлияния только для Африканских стран к 2035 г., в то время как общий интегральный уровень взаимовлияния снизится на 50 % (в работе показано, что географическая разрозненность стран-участниц стратегических объединений приводит к снижению уровня взаимовлияния). На основании проведенного исследования, авторами сформулированы рекомендации для каждого региона с целью повышения уровня инновационной активности. Африканским странам рекомендуется развивать международное сотрудничество по всем направлениям технологий, рекомендуется интеграция в международные экономические объединения, в том числе на примере БРИКС. Странам СНГ рекомендуется существенно наращивать инновационную активность

по направлениям водородной энергетики для обеспечения технологического суверенитета (ввиду отрицательного значения коэффициента корреляции Пирсона между регионами СНГ и Северной Америки, а также СНГ и Азией). Странам регионов Европы, Азии, Северной и Латинской Америки рекомендуется усиливать международное взаимодействие по направлениям информационных технологий. При принятии предложенных рекомендаций прогнозируется общий рост инновационной активности и количества патентов по направлениям водородной энергетики и технологиям CCUS на 10 и 15 п.п. соответственно. В случае продолжающегося снижения глобализации и развития фрагментарности рынков следует ожидать снижение количества патентов по данным направлениям на 25 и 10 п.п. соответственно.

<sup>20</sup><https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2019/03/26/NAFTA-to-USMCA-What-is-Gained-46680>



## Список литературы

- [1]. Zhu Y., Wang Y., Zhou B., Hu X., Xie Y. A Patent Bibliometric Analysis of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Technology. *Sustainability* 2023, 15, 3484. <https://doi.org/10.3390/su15043484>
- [2]. Hussin F., Aroua M. K. Recent trends in the development of adsorption technologies for carbon dioxide capture: A brief literature and patent reviews (2014-2018). *J. Clean. Prod.* 2020, 253, 119707
- [3]. Theeyattuparampil V. V., Vidican G., Al-Saleh Y. Challenges and opportunities for the emerging carbon capture, utilisation and storage innovation system in the United Arab Emirates. *Int. J. Innov. Learn.* 2014, 13, 284-307.
- [4]. Nawaz M., Suleman H., Maulud A. S. Carbon Capture and Utilization: A Bibliometric Analysis from 2007-2021. *Energies*, 2022, 15, 6611.
- [5]. Zahedi R., Aslani A., Seraji M. A. N., Zolfaghari Z. Advanced bibliometric analysis on the coupling of energetic dark greenhouse with natural gas combined cycle power plant for CO<sub>2</sub> capture. *Korean J. Chem. Eng.* 2022, 39, 11
- [6]. Maghizian A., Aslani A., Zahedi R. Review on the direct air CO<sub>2</sub> capture by microalgae: Bibliographic mapping. *Energy Rep.* 2022, 8, 3337-3349.
- [7]. Kang J. N., Wei Y. M., Liu L. C., Wang J. W. Observing technology reserves of carbon capture and storage via patent data: Paving the way for carbon neutral. *Technol. Forecast. Soc. Change* 2021, 171, 120933.
- [8]. Choi H., Woo J. Investigating emerging hydrogen technology topics and comparing national level technological focus: Patent analysis using a structural topic model. *Appl. Energy* 2022, 313, 118898.
- [9]. Cardoso L. O., Procópio D. P., Borrego B. B., Gracioso L. H., Stevani C. V., Freire R. S., do Nascimento C. A., Perpetuo E. A. Overview of CO<sub>2</sub> Bioconversion into Third-Generation (3G) Bioethanol-a Patent-Based Scenario. *BioEnergy Res.* 2022.
- [10]. Sharifzadeh M., Triulzi G., Magee C. L. Quantification of technological progress in greenhouse gas (GHG) capture and mitigation using patent data. *Energy Environ. Sci.* 2019, 12, 2789-2805.
- [11]. Dong, Y. Q., Dong, Z. J. Bibliometric Analysis of Game Theory on Energy and Natural Resource. *Sustainability* 2023, 15, 1278.
- [12]. Sulich A., Sołoducho-Pelc L. Changes in Energy Sector Strategies: A Literature Review. – *Energies*, 2022, 15, 7068.
- [13]. Zhao Q., Shen X. L., Kun D. Comparative analysis on technologies between Chinese and American large-sized oil companies based on patentometrics. *J. Scientometr. Res.* – 2014, 3, 68-74.
- [14]. Yuan, Chaoqing & Liu, Sifeng & Wu, Junlong. (2009). Research on energy-saving effect of technological progress based on Cobb-Douglas production function. *Energy Policy.* 37. 2842-2846. 10.1016/j.enpol.2009.04.025.
- [15]. Yuan, Chaoqing & Liu, Sifeng & Wu, Junlong, 2009. «Research on energy-saving effect of technological progress based on Cobb-Douglas production function» *Energy Policy*, Elsevier, vol. 37(8), pages 2842-2846, August.
- [16]. Saha, Deeti & Author, About. (2020). Comparative Analysis of Economic Performance of SAARC Countries Based on the Estimated Cobb-Douglas Production Function. 10.5281/zenodo.4026029.
- [17]. Zhdaneev O. V., Korenev V. V., Lyadov A. S. (2020). Opportunities and Challenges to Deploy Industry 4.0 Technologies in the Russian Oil Refining and Petrochemical Industries. *Russ J Appl Chem* 93, 1926-1930. <https://doi.org/10.1134/S1070427220120150>
- [18]. Bazhenov S., Chubokсарov V., Maximov A., Zhdaneev O. (2022). Technical and Economic Prospects of CCUS Projects in Russia. *Sustain. Mater. Technol.* 33, e00452.
- [19]. Bazhenov S., Dobrovolsky Y., Maksimov A., Zhdaneev O. (2022). Key challenges for the development of the hydrogen industry in the Russian Federation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments.* 54. 102867. 10.1016/j.seta.2022.102867.
- [20]. Zhdaneev O. V., Frolov K. N. (2024). Technological and institutional priorities of the oil and gas complex of the Russian Federation in the term of the world energy transition. *International Journal of Hydrogen Energy.* <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.285>.
- [21]. Mohammadreza Malekli, Alireza Aslani, Zahra Zolfaghari, Rahim Zahedi, Amirhosein Moshari. (2022). Advanced bibliometric analysis on the development of natural gas combined cycle power plant with CO<sub>2</sub> capture and storage technology. *Sustainable Energy Technologies and Assessments.* <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102339>.
- [22]. Yu Sun, Mangmang Chen, Jie Yang, Limeng Ying, Yanfang Niu. (2022). Understanding Technological Input and Low-Carbon Innovation from Multiple Perspectives: Focusing on Sustainable Building Energy in China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments.* <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102474>.
- [23]. Huijie Zhou, Xinman Zhu, Jie Dai, Wenbin Wu. (2023). Innovation evolution of industry-university-research cooperation under low-carbon development background: In case of 2 carbon neutrality technologies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments.*

<https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102976>.

[24]. Fabian Rocha Aponte, Kirsten S. Wiebe, Nikki Luttkhuis. (2023). The role of sustainability characteristics in the diffusion of renewable energy technologies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103226>.

[25]. Boqiang Lin, Yuqiang Teng. (2023). Digital revolution: Does industrial chain digitalization lead the energy-saving wave? *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103516>.

[26]. Muhammad Shahbaz, Aaliyah Siddiqui, Mujahid Siddiqui, Zhilun Jiao, Pradeep Kautish. (2023). Exploring the growth of sustainable energy Technologies: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103157>.

[27]. Oktay Özkan, Andrew Adewale Alola, Tomiwa Sunday Adebayo. (2023). Environmental benefits of nonrenewable energy efficiency and renewable energy intensity in the USA and EU: Examining the role of clean technologies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103315>.

[28]. Zhipeng Wang, Fariha Sami, Saleem Khan, Ahmad Mohammed Alamri, Amal Mousa Zaidan. (2023). Green innovation and low carbon emission in OECD economies: Sustainable energy technology role in carbon neutrality target. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103401>.

[29]. Abdullah Emre Caglar, Muhammad Wasif Zafar, Festus Victor Bekun, Mehmet Mert. (2022). Determinants of CO<sub>2</sub> emissions in the BRICS economies: The role of partnerships investment in energy and economic complexity. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101907>.

[30]. Lawrence César Medeiros Araújo de Moura, Mario Orestes Aguirre González, Paula de Oliveira Ferreira, Priscila Gonçalves Vasconcelos Sampaio. (2024). Technology mapping of direct seawater electrolysis through patent analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.251>.

[31]. Jun Gao, Runzhe Zhang, Xiang Yu. (2024). Investigating diffusion and convergence trajectory of hydrogen storage technology based on patent analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.103>.

[32]. S. R. Arsad, Pin Jern Ker, M. A. Hannan, Shirley G. H. Tang, Norhasyima R. S., C. F. Chau, T. M. I. Mahlia. (2024). Patent landscape review of hydrogen production methods: Assessing technological updates and innovations. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.085>.

[33]. Fang Han, Sejun Yoon, Nagarajan Raghavan, Bin Yang, Hyunseok Park. (2024). Technological

trajectory in fuel cell technologies: A patent-based main path analysis, *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.274>.

[34]. Donguk Yang, Juhaeng Lee, Nicholas Chaehoon Song, Sangseon Lee, Sangkyu Kim, Sukho Lee, Seongim Choi. (2023). Patent analysis on green hydrogen technology for future promising technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.317>.

[35]. Dandan Xue, Zhifang Shao. (2024). Patent text mining based hydrogen energy technology evolution path identification. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.316>.

[36]. Huijie Zhou, Jie Dai, Xihui Chen, Bin Hu, Haoran Wei, Helen Huifen Cai. (2024). Understanding innovation of new energy industry: Observing development trend and evolution of hydrogen fuel cell based on patent mining. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.032>.

[37]. Shiqi Zhang, Yupeng Wei, Xiaoqiang Guo, Zheng Li, Xiaofei Song, Frede Blaabjerg. (2023). Overview of US patents for energy management of renewable energy systems with hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.091>.

[38]. Wei Li, Xiaodong Zheng. (2024). Development mechanism and technological innovation of hydrogen energy: evaluating collaborative innovation based on hydrogen patent data. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.310>.

[39]. Dongjae Chung, Youngsun Kwon, Zhunwoo Kim. (2023). Technology life cycle and commercialization readiness of hydrogen production technology using patent analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.186>.

[40]. Jeffrey Dankwa Ampah, Chao Jin, Islam Md Rizwanul Fattah, Isaac Appiah-Otoo, Sandylove Afrane, Zhenlong Geng, Abdulfatah Abdu Yusuf, Tongtong Li, T. M. Indra Mahlia, Haifeng Liu. (2023). Investigating the evolutionary trends and key enablers of hydrogen production technologies: A patent-life cycle and econometric analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.258>.

[41]. T. N. Erivantseva, S. Yu. Tuzova, N. B. Lyskov, M. Yu. Salnikov, E. A. Tuzhilkina, M. S. (2024). Palamarchuk, I. V. Sedov, P. I. Ryzhenko, M. I. Skudro. Hydrogen energy vector in the sphere of intellectual property in Russian Federation. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.086>.

[42]. Minli Yu, Ke Wang, Harrie Vredenburg. (2021). Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen. *International*



Journal of Hydrogen Energy. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.016>.

[43]. D. Coleman, M. Kopp, T. Wagner, B. Scheppat. (2020). The value chain of green hydrogen for fuel cell buses – A case study for the Rhine-Main area in Germany. International Journal of Hydrogen Energy. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.163>.

[44]. Amela Ajanovic, Reinhard Haas. (2018). Economic prospects and policy framework for hydrogen as fuel in the transport sector. Energy Policy. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.063>.

[45]. Sayem M. Abu, M. A. Hannan, Pin Jern Ker, M. Mansor, Sieh Kiong Tiong, T. M. Indra Mahlia. (2023). Recent progress in electrolyser control technologies for hydrogen energy production: A patent landscape analysis and technology updates. Journal of Energy Storage. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108773>.

[46]. Hyunhong Choi, Jong Roul Woo. (2022). Investigating emerging hydrogen technology topics and comparing national level technological focus: Patent analysis using a structural topic model. Applied Energy. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118898>.

[47]. Parsa Asna Ashari, Knut Blind. (2024). The effects of hydrogen research and innovation on international hydrogen trade. Energy Policy. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113974>.

[48]. Isabel Grunevald, Liane Mahlmann Kipper, Jorge Andre Ribas Moraes, Leandro Haupt. (2023). Scientific contributions on cleaner production through

the use of patent information: A bibliometric analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113785>.

[49]. Yuxin Yuan, Xiaodong Yuan. (2023). Does the development of fuel cell electric vehicles be reviving or recessional? Based on the patent analysis. Energy. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127104>.

[50]. Lucas Faccioni Chanchetti, Sergio Manuel Oviedo Diaz, Douglas Henrique Milanez, Daniel Rodrigo Leiva, Leandro Innocentini Lopes de Faria, Tomaz Toshimi Ishikawa. (2016). Technological forecasting of hydrogen storage materials using patent indicators. International Journal of Hydrogen Energy. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.137>.

[51]. Chao-Chan Wu, Hoang-Jyh Leu. (2014). Examining the trends of technological development in hydrogen energy using patent co-word map analysis. International Journal of Hydrogen Energy. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.006>.

[52]. Vito Albino, Lorenzo Ardito, Rosa Maria Dangelico, Antonio Messeni Petruzzelli. (2014). Understanding the development trends of low-carbon energy technologies: A patent analysis. Applied Energy. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.012>.

[53]. Hoang-Jyh Leu, Chao-Chan Wu, Chiu-Yue Lin. (2012). Technology exploration and forecasting of biofuels and biohydrogen energy from patent analysis. International Journal of Hydrogen Energy. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.04.143>.

Транслитерация по BSI





## IMPROVED TECHNO-ECONOMIC OPTIMIZATION OF HYBRID SOLAR/WIND/FUEL CELL/DIESEL SYSTEMS WITH HYDROGEN ENERGY STORAGE

*Mohamed H. Hassan<sup>1</sup>, Salah Kamel<sup>2</sup>, Murodbek Safaraliev<sup>3,a</sup>, Sergey Kokin<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Ministry of Electricity and Renewable Energy, Egypt, Cairo, Ramsis St. Abbassia

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Aswan University, 81542, Aswan, Egypt

<sup>3</sup>Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University  
620002, Yekaterinburg, Russia, tel: +7 (950) 5644967; e-mail: murodbek\_03@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.133-167

Referred: 18.03.24

Received in revised form: 23.03.24

Accepted: 30.03.24

In spite of concerns about pollution and high operational costs, diesel engines continue to dominate local electricity generation in off-grid areas. However, there is significant untapped potential worldwide for utilizing local renewable energy sources (RES) instead of fossil fuel generation, particularly in remote regions. To address the intermittent nature of RES, energy storage systems are crucial for off-grid communities, enabling them to rely on locally collected renewable energy. This study explores various off-grid renewable power system configurations, including batteries and hydrogen as energy storage options, to determine the most economically viable setup for remote areas. The analysis includes the Nickel-Iron (Ni-Fe) battery and considers electrolysis technology for hydrogen production. Two Integrated Hybrid Renewable Energy System (IHRES) configurations are modeled and evaluated: PV/Diesel Generator (DG)/Battery (Ni-Fe) and PV/Wind Turbines (WT)/DG/Hydrogen Storage System (HSS). The study employs a cycle charging (CC) strategy. A novel optimization algorithm called Quadratic interpolation-based artificial rabbits optimization (QIARO) is introduced to optimize the sizing of system components, ensuring cost-effective and reliable fulfillment of load demands. The effectiveness of the QIARO algorithm is initially validated through a comprehensive performance assessment, comparing it with the original artificial rabbits optimization (ARO) algorithm and other established optimization techniques across 7 benchmark functions. The results demonstrate that the QIARO algorithm surpasses the ARO algorithm, as well as other optimization techniques such as beluga whale optimization (BWO), pelican optimization algorithm (POA), weighted mean of vectors (INFO), and RUN ge Kutta optimizer (RUN), in terms of convergence speed and solution quality. After validation, the proposed algorithm is applied to the Baris Oasis in New Valley, Egypt, chosen as a representative case study of insular microgrid environments. The resulting outcomes are compared with those obtained using the original ARO algorithm, further highlighting the effectiveness of the proposed approach. Using

*М. Х. Хасан, С. Камель, М. Сафаралиев, С. Кокин. Усовершенствованная технико-экономическая оптимизация гибридных систем на солнечной энергии/ветре/топливных элементах/дизельном топливе с накоплением энергии на водороде // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 03(420) 2024, с. 133-167*

*M. H. Hassan, S. Kamel, M. Safaraliev, S. Kokin. Improved techno-economic optimization of hybrid solar/wind/fuel cell/diesel systems with hydrogen energy storage // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 03(420) 2024, pp. 133-167*



the QIARO algorithm, the PV/DG/Battery (Ni-Fe) configuration and PV/WT/DG/HSS configuration achieve optimal Life Cycle Cost values of 645,271 USD and 1,852,421 USD, respectively.

**Keywords:** Hybrid microgrid, Hydrogen storage, Quadratic interpolation-based artificial rabbits optimization, Renewable energy resources, Battery storage, Electrolysis.

## УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ НА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ/ ВЕТРЕ/ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ/ДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ С НАКОПЛЕНИЕМ ЭНЕРГИИ НА ВОДОРОДЕ\*

*Мохаммед Хассан<sup>1</sup>, Салах Камель<sup>2</sup>, Муродбек Сафаралиев<sup>3</sup>, Сергей Кокин<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Министерство электроэнергетики и возобновляемых источников энергии,  
Египет, Каир, ул. Рамсиса Аббася, 2

<sup>2</sup>Кафедра электротехники, инженерный факультет, Асуанский университет,  
81542 Асуан, Египет

<sup>3</sup>Кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет,  
620002 Екатеринбург, Россия, тел.: +7 (950) 5644967; e-mail: murodbek\_03@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.133-167

Заключение совета рецензентов: 18.03.24

Заключение совета экспертов: 23.03.24

Принято к публикации: 30.03.24



Mohamed  
H. Hassan

Мохаммед  
Х. Хассан

**Author information:** engineer at Ministry of Electricity and Renewable Energy, Egypt.

**Education:** B. Sc. degree (Hons.) in electrical engineering from Minia University, Egypt, in 2011, the M. Sc. degree in electrical engineering from Cairo University, Egypt, in 2018, and the joint Ph. D. degree supervision between Aswan University, Egypt, and University of Jaen, Spain, in 2022.

**Research area:** optimization techniques, power system analysis, renewable energy, and smart grids.

**Publications:** more than 90 scientific articles.

**Сведения об авторе:** инженер Министерства электроэнергетики и возобновляемых источников энергии Египта.

**Образование:** бакалавр наук, степень с отличием по специальности «электротехника», полученный в университете Миниа, Египет, в 2011 году. Магистр наук, степень в области электротехники, полученная в Каирском университете, Египет, в 2018 году, и совместная защита докторской степени в Университете Ас-Ван, Египет, и Университете Хаэна, Испания, в 2022 году.

**Область научных интересов:** методы оптимизации, анализ энергосистем, возобновляемые источники энергии и интеллектуальные сети.

**Публикации:** более 90 научных статей.





Salah Kamel  
Салах Камель

**Author information:** currently an Associate Professor with the Department of Electrical Engineering, Aswan University. He is also the Leader of the Advanced Power Systems Research Laboratory (APSR Lab), Power Systems Research Group, Aswan, Egypt.

**Education:** international Ph. D. degree from Jaen University, Spain (Main), and Aalborg University, Denmark (Host), in January 2014.

**Research area:** power system analysis and optimization, smart grid, and renewable energy systems.

**Publications:** more than 600 scientific articles.

**Сведения об авторе:** доцент кафедры электротехники Асуанского университета. Руководитель исследовательской лаборатории передовых энергетических систем (PAR Lab), исследовательской группы энергетических систем, Асуан, Египет.

**Образование:** международная степень доктора философии, полученная в Университете Хаэна, Испания (основной), и Университете Ольборга, Дания (принимающая сторона), в январе 2014 года.

**Область научных интересов:** анализ и оптимизация энергосистем, интеллектуальные сети и системы возобновляемой энергетики.

**Публикации:** более 600 научных статей.

**Сведения об авторе:** к.т.н., старший научный сотрудник кафедры «Автоматизированных электрических систем» УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина.

**Образование:** академ. степень магистра по специальности «Электрические станции», Таджикский технический Университет, 2016 г.

**Награды и научные премии:** Стипендиат Губернатора Свердловской области за выдающуюся научную деятельность, 2020 г.

**Область научных интересов:** оптимизация энергетических потоков, модель оптимизации развития энергосистем, краткосрочное, среднесрочное и долгосрочное прогнозирование нагрузки и генераций.

**Публикации:** более 100 научных статей.

**Сведения об авторе:** доктор. техн. наук, профессор кафедры «Автоматизированных электрических систем» УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина.

**Образование:** инженер-электрик по специальности «Электрические станции», УПИ им. С. М. Кирова, 1978 г.

**Награды и научные премии:** почетное звание «Почетный энергетик» Министерства энергетики РФ.

**Область научных интересов:** оценка технического состояния энергетического оборудования, методы диагностики, прогнозирование остаточного ресурса оборудования и оптимизация распределительных систем.

**Публикации:** более 100 научных статей.

**Information about the author:** PhD, Senior Researcher, Department of «Automated Electrical Systems», UrFU named after the first President of Russia B. N. Yeltsin.

**Education:** academic. Master's degree in Electric Stations, Tajik Technical University, 2016.

**Awards and scientific awards:** scholarship of the Governor of the Sverdlovsk Region for outstanding scientific activity, 2020.

**Research interests:** optimization of energy flows, model optimization of energy systems development, short-term, medium-term and long-term load and generation forecasting.

**Publications:** more than 100 scientific articles.

**Information about the author:** doctor tech. sciences, Professor of the Department of «Automated Electrical Systems» UrFU named after the first President of Russia B. N. Yeltsin.

**Education:** electric engineer in «Electrical Stations», UPI. S. M. Kirova 1978.

**Awards and scientific awards:** honorary title «Honorary Energy» Ministry of Energy of the Russian Federation.

**Research interests:** evaluation of the technical condition of the energy equipment, diagnostic methods, predicting the residual equipment resource and optimization of distribution systems.

**Publications:** more than 100 scientific articles.



Safaraliev M. Kh.  
Сафаралиев  
Муродбек  
Холназарович



Kokin S. E.  
Кокин  
Сергей Евгеньевич



### a) *background*

Achieving sustainable energy objectives involves the implementation of renewable energy systems for off-grid electrification in remote areas [1]. The rapid decrease in technology expenses is making renewable energy solutions a cost-effective selection for extending electricity available to numerous unelectrified regions. There is significant potential to integrate or potentially replace off-grid diesel-based systems with renewable energy generators [2]. Dependency on local renewable energy sources (RESs) can serve as an environmentally friendly and economical method to liberate off-grid communities from reliance on fossil fuels or the need for unreliable and excessively expensive grid connections [3]. It is imperative to develop effective substitutes for fossil fuel resources in order to fulfill future energy needs since both global energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions are increasing rapidly [4].

Nevertheless, due to the fluctuating nature of variable RESs like solar and wind energy, it is essential to explore the incorporation of electrical energy storage (EES) systems to attain raised levels of RES penetration [5]. Batteries are typically the primary preference as a storage medium owing to their excellent performance, adaptability, and decreasing costs [6]. Hydrogen-based storage solutions may become essential for relying entirely on non-dispatchable renewable energy sources because of their capacity for long-term storage [7, 8]. Also, hydrogen can represent an interesting energy storage option given its high energy density, long-term storage capability and cleanness in terms of local pollutants and CO<sub>2</sub> emitted [9]. Increasing attention is therefore focusing on the investigation of hydrogen usage in off-grid remote areas, also analyzing its integration with batteries. In off-grid regions, depending only on diesel generators (DGs) can lead to raised energy costs [10]. The affordability of diesel-based power production is regularly cooperated by high operating costs attributed to topographical remoteness, accompanying transport challenges, and unpredictable fuel prices [11]. Conversely, energy systems relying only on local renewable energy sources may experience raised costs associated with system oversizing, a requirement for ensuring a dependable power supply throughout the entire year [12]. The hybridization of the energy system emerges as an effective solution to decrease the levelized cost of energy (LCOE).

### b) *motivation and purpose*

Microgrid systems are commonly either over- or undersized to meet specific load demands. An oversized system generates excess energy, leading to high system costs. Conversely, an undersized microgrid system can result in power failures due to insufficient capacity to meet the expected load demand. Therefore, it is imperative to incorporate a robust energy management strategy (EMS) along with optimizing the microgrid size to ensure effective and reliable performance [13]. Optimization

## Introduction

problems and theories span a broad band within applied calculation. The determination of the optimal size for a hybrid RE system is treated as a constrained optimization problem, categorized by a single or multi-objective function and integer or discrete variables, integrating several linear or nonlinear constraints. The RE-sizing problem is also suggested as a multi-modal task with multiple local optimal solutions and a particular global optimal solution. Consequently, the primary focus of investigation lies in finding and considerate the global optimal solution [14].

Numerous studies in microgrid sizing are documented in the literature, and these methodologies can be classified into three main categories. First, there are software tools like HOMER, RETScreen, HOGA, and IHOGA [15]. Second, deterministic methods include iterative, numerical, linear programming, graphical construction, probabilistic, and analytical methods [14]. Third, metaheuristic algorithms include Genetic Algorithm (GA) [16], Particle swarm optimization (PSO) [17], grasshopper optimization algorithm (GOA) [18] and grey wolf optimizer (GWO) [19]. Nonetheless, while software tools offer easy interfaces, they often lack the flexibility for users to choose suitable components, and their underlying algorithms and calculations are not visible or available. Consequently, microgrid sizing using such tools is limited to certain assumptions and sequences. On the contrary, deterministic approaches are believed more effective than software tools [13]. Though, because of the complicated design of microgrids, these approaches can become trapped at local optima, struggling to converge to the global optimal solution. To overcome this challenge, the metaheuristics optimization algorithms are executed multiple times with randomly selected initial conditions, although this approach may not guarantee the global best solution and can consume more time to find the optimal solution. Therefore, metaheuristic algorithms are recognized as highly promising methods and are widely employed [14].

### c) *literature review*

Over the past decade, several metaheuristic algorithms have been applied to address microgrid sizing problems. Markedly, some of these methods, such as GA, PSO, and Differential Evolution (DE), have gained recognition not only among computer scientists but also across various scientists in different fields. These algorithms, renowned for their flexibility, capability to avoid local optima entrapment, and ability to yield superior solutions compared to deterministic methods, offer several advantages. They own the adaptability to tackle a wide range of optimization problems and utilize of the inspiration from natural processes to address these challenges [13]. However, it is essential to note the No-Free-Lunch theorem, which indicates that while an optimal result can be achieved for a specific objective function using a specific metaheuristic algorithm, the

same algorithm may yield poor results for other objective functions [20]. In light of these considerations, researchers have been encouraged to explore novel algorithms precisely for microgrid sizing problems [14].

In [21], a microgrid demonstration project has been executed to assess the effectiveness of a proposed multi-energy microgrid consisting of Photo Voltaic (PV)/WT/ Gas Turbine/ Lithium-Ion (Li-Ion) battery configuration. They employed GA, PSO, Artificial Bee Colony (ABC), and Moth-Flame Optimization (MFO) algorithms, ultimately achieving optimal results with the MFO algorithm. In another study, Atef S. Almashakbeh et al. [22] investigated the off-grid Samra village in Jordan, employing a PV/WT/DG/LA battery configuration with various renewable energy fraction values using the HOMER Pro® software tool. Additionally, Ramesh and Saini [23] conducted a feasibility study for off-grid, unelectrified villages in the Chikmagalur district of Karnataka, India. They explored a PV/WT/Micro Hydro Power (MHP)/DG/BAT configuration incorporating lead acid (LA) and Li-Ion battery technologies, alongside DG scheduling, utilizing the HOMER Pro® software tool. The investigation revealed that the Li-Ion battery-based system exhibited a lower Net Present Cost (NPC) and Cost of Energy (COEs) compared to the LA battery-based system.

In a study by Upadhyay and Sharma [24], seven off-grid villages in the Uttarakhand state of India were electrified using a configuration of PV/MHP/Biomass Generator (BMG)/Biogas Generator (BGG)/DG/LA battery technology with Load Following (LF) and Cycle Charging (CC) strategies. The study employed Biogeography-based optimization (BBO), GA, and PSO algorithms, with optimal results obtained using the BBO algorithm. Similarly, Samy et al. [25] conducted a techno-economic feasibility study for an isolated remote area in Egypt, employing a PV/Fuel Cell (FC) combination. The authors aimed to minimize the total annual cost of the system at a 0 % loss of power supply (LPSP) value, utilizing Flower Pollination Algorithm (FPA), PSO, and ABC algorithms. The results indicated that the FPA algorithm offered cost-effective solutions compared to other algorithms. The authors minimized the total annual cost of the system at 0 % loss of power supply (LPSP) value by using Flower Pollination Algorithm (FPA), PSO, and ABC algorithms. From the results, it has been observed that FPA provided cost-effective solutions over the other techniques.

Doudou and Atanda [26] conducted a study aiming to minimize NPC and COE values for an off-grid remote rural area in South Africa. They employed a PV/HSS/ Super Capacitor configuration and utilized the HOMER Pro® software tool for analysis. In another study, Rajanna and Saini [27] focused on electrifying five off-grid unelectrified villages situated in the Chamarajanagar district of Karnataka, India. Their configuration included PV/WT/MHP/BMG/BGG/LA battery technology,

and the study utilized the GA algorithm. Furthermore, Ghada et al. [28] conducted a study addressing a rural telecommunication system and two sites in Aachen-Horn, Germany, and Quneitra, Syria. They employed a PV/WT/BAT/DG configuration with three different types of battery technologies: LA, Li-Ion, and vanadium redox-flow batteries. The study utilized the GA technique, with optimal results obtained using vanadium redox flow battery technology. Akbar Maleki [29] conducted a study in a grid-independent region situated in South Khorasan, Iran. The study involved six different combinations incorporating two energy storage technologies: LA battery and Hydrogen Storage Systems (HSS). Improved Bees Algorithm (IBA) and Harmony Search Algorithms were utilized to minimize the Life Cycle Cost (LCC) of the system, with the objective set at 2 % of the LPSP value. The findings indicated that the PV/WT/LA configuration offered a superior solution when employing the Improved Bees Algorithm.

In the existing literature, many studies have primarily conducted techno-economic feasibility assessments utilizing a single type of energy storage technology to ensure a consistent power supply. Furthermore, the majority of these studies has focused on one or two types of battery technologies. Additionally, when integrating DG into their investigations, numerous studies have limited their analyses to either LF or CC strategies exclusively. Lastly, many of the researchers have been compared the robustness and convergence efficacy of their proposed algorithms against only one or two alternative algorithms.

#### d) *contribution and paper organization*

Addressing the identified gaps and limitations in previous research, the current study aims to conduct a realistic investigation of an off-grid Integrated Hybrid Renewable Energy System (IHRES). Focusing on the Baris Oasis in New Valley, Egypt, chosen as a representative case study for many remotely located unelectrified villages, a techno-economic feasibility analysis is undertaken. The study aims to ensure a continuous power supply by analyzing the feasibility of two energy storage technologies, namely hydrogen and battery storage systems, and determining the more economical option.

Specifically, in the battery context, the study employs Nickel-Iron (Ni-Fe) battery technologies. Additionally, an analysis of Distributed Generation's operation is conducted with a Cycle Charging (CC) strategy to optimize DG operation for reduced fuel consumption and emissions. The study proposes a developed algorithm called Quadratic Interpolation-based Artificial Rabbits Optimization (QIARO) from the metaheuristic optimization techniques to obtain the optimal system size. The robustness and convergence efficiency of QIARO are compared with the original Artificial Rabbits Optimization (ARO) [30]. This comprehensive approach aims to contribute to a more practical understanding of off-grid IHRES feasibility and performance. Also, to meet



the global energy demand, fossil fuels reduce traditional fuel supplies, accelerate global warming, and cause additional emissions issues. This encourages alternate energy development. The main contributions of this paper are summarized as follow:

✓ Introducing the Quadratic interpolation-based artificial rabbits optimization (QIARO) technique as an advanced algorithm for well-organized load management in the microgrid system for evaluating isolated microgrid configurations.

✓ Confirming the dominance of the QIARO technique through a wide-ranging performance comparison with the conventional ARO technique and other well-known algorithms using several benchmark functions and by the convergence speed and solution quality tests.

✓ Highlighting the economic advantages of the proposed algorithm, enabling cost-effective energy solutions with enhanced reliability and accessibility rates for the microgrid system.

The structure of the paper is organized as follows: In Section 2, the modeling of microgrid components, including photovoltaic systems, wind turbines, hydrogen storage systems (HSS), batteries, and diesel engines, is presented. Section 3 discusses the goal function and limitations. The proposed improved Quadratic Interpolation-based Artificial Rabbits Optimization (QIARO) technique is detailed in Section 4. Section 5 focuses on the case study, providing information about the location and data used. The results and discussions are outlined in Section 6. Finally, Section 7 offers a summary of the obtained results.

### Nomenclature

QIARO	Quadratic interpolation-based artificial rabbits optimization	CC	Cycle charging
ARO	Artificial rabbits optimization	PV	Photovoltaic Panels
IHRES	Integrated Hybrid Renewable Energy System	DG	Diesel Generator
RES	Renewable energy sources	Ni-Fe	Nickel-Iron
HSS	Hydrogen Storage System	BWO	Beluga whale optimization
POA	Pelican optimization algorithm	INFO	weighted mean of vectors
RUN	RUNge Kutta optimizer	EES	electrical energy storage
LCOE	Levelized cost of energy (\$/kWh)	WT	Wind turbine
LPSP	Loss of power supply probability (%)	EMS	Energy management strategy
GA	Genetic Algorithm	GOA	Grasshopper optimization algorithm
PSO	Particle swarm optimization	GWO	Grey wolf optimizer
DE	Differential evolution	MFO	Moth-Flame Optimization
MHP	Micro Hydro Power	NPC	Net Present Cost (\$)
COE	Cost of energy	HRES	Hybrid renewable energy system
BMG	Biomass Generator	BGG	Biogas Generator
FC	Fuel Cell	FPA	Flower Pollination Algorithm
ABC	Artificial Bee Colony	LA	Lead acid
Li-Ion	Lithium-Ion	BBO	Biogeography-based optimization
MVLRT-GD	Multi-variable linear regression technique along with the gradient descent	ALO	Ant lion optimization
ZB	Zinc Bromine	LCC	Life Cycle Cost
HSS	Hydrogen Storage Systems	IBA	Improved Bees
DNI	direct normal irradiance	BESS	battery energy storage systems
MOERE	Ministry of Electricity and Renewable Energy	FiT	feed-in-tariff
HMGES	hybrid microgrid energy system		





### 1. Location under study

Egypt has the highest daily representative irradiance values in Northern Africa, ranging from 2000 to 3200 kWh/m<sup>2</sup>/year, with an average of 9-11 hours of sunshine per day. The Egyptian government has determined plans to expand solar energy generation capacities by an additional 3500 MW by the year 2027 [31]. However, as of 2020, solar energy contributed only 1,9 % to the total electricity production in Egypt, placement it as the country's second-highest renewable energy source. Despite being the second-highest solar energy producer in Africa after South Africa, Egypt ranks thirty-first globally in solar energy generation [32]. Solar energy farms should preferably be located near areas with a high direct normal irradiance (DNI), which are indicated by the orange and red zones in Fig. 3 (a) [33].

Since the early 1980s, solar photovoltaic (PV) systems have found diverse applications in Egypt, ranging from lighting, pumping, and commercial advertising, desalination, and cold storage. Additionally, these systems have been employed in remote locations for emergency

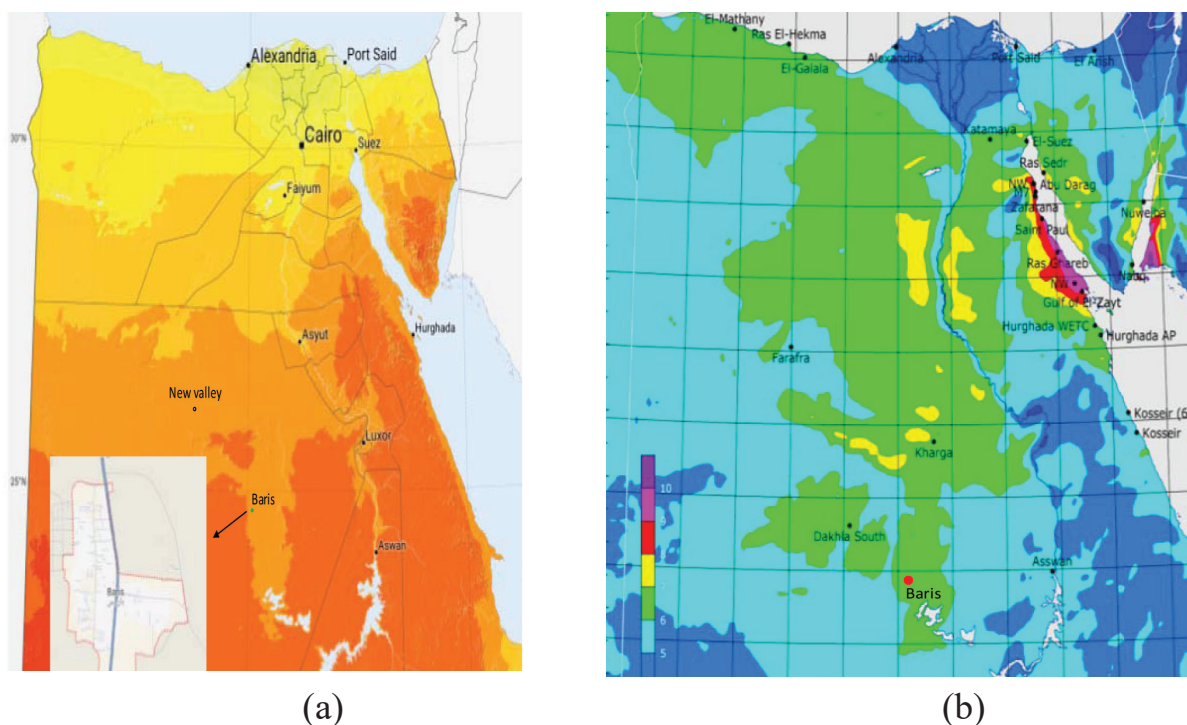
roads and navigation lighting [34]. Given Egypt's status as one of the sunbelt countries, there is significant potential to utilize PV panels across most parts of the nation. The country is also blessed with abundant and favorable wind energy resources, as depicted in Egypt's wind atlas in Fig. 3 (b), coupled with the rapid advancements in wind technologies.

Hybrid renewable generation, combining both solar and wind sources, presents a more flexible and cost-effective alternative compared to relying on one energy source. Countries with plenty sunlight radiation, significant bio-degradable waste potential, and robust wind energy resources can effectively address electricity access in remote areas [35]. To address uncertainties associated with sustainable energy sources such as solar and wind, integrating battery energy storage systems (BESS) and other reservoirs like hydrogen energy storage systems becomes vital. This integration ensures a continuous and secure power supply, contributing to uninterrupted electricity access and power security.



International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»



**Fig. 1.** Renewable resources map in Egypt  
(a) Global Horizontal Radiation and (b) Wind resource

**Рис. 1.** Карта возобновляемых ресурсов в Египте  
(а) Глобальная горизонтальная радиация и (б) Ветровые ресурсы

To address the massive increase in energy demand and combat the significant rise in CO<sub>2</sub> intensity, Egypt's electricity sector is strategically focusing on diversifying energy sources and expanding the utilization of the REs. The Ministry of Electricity and Renewable Energy (MOERE) identifies energy as a key pillar for sustainable

development [36]. From 2014 to 2022, MOERE aims to generate 20 % of Egypt's energy mix from renewable sources, with 6 % from hydropower and 14 % from wind and solar energy. The target is supported by an annual investment goal of \$2,5 billion. Looking ahead to 2035, the MOERE plans for a substantial 42 % increase, with



14 % from wind, 3 % from hydropower, and 25 % from solar energy. These ambitious objectives are underpinned by the 2014 establishment of the feed-in-tariff (FiT) scheme, designed to incentivize the production of electricity from renewable sources [37].

Given Egypt's position in the global Sunbelt region and its abundant solar and wind resources, there is a significant opportunity to implement a Hybrid Microgrid Energy System (HMGES) for the generation of electricity from these renewable and clean sources. This

presents an excellent prospect for electrifying residential communities. The chosen location for consideration is situated at 24,67369° north latitude and 30,60512° east longitude, on the edge of Baris oasis in the western desert, approximately 90 km from the El-Kharga Oasis. The input data utilized for the Baris site in this study includes hourly profiles throughout the year for solar irradiance on the photovoltaic (PV) system (measured in Wh/m<sup>2</sup>), ambient temperature (in °C), and wind speed (in m/s), as illustrated in Figures 2-4.

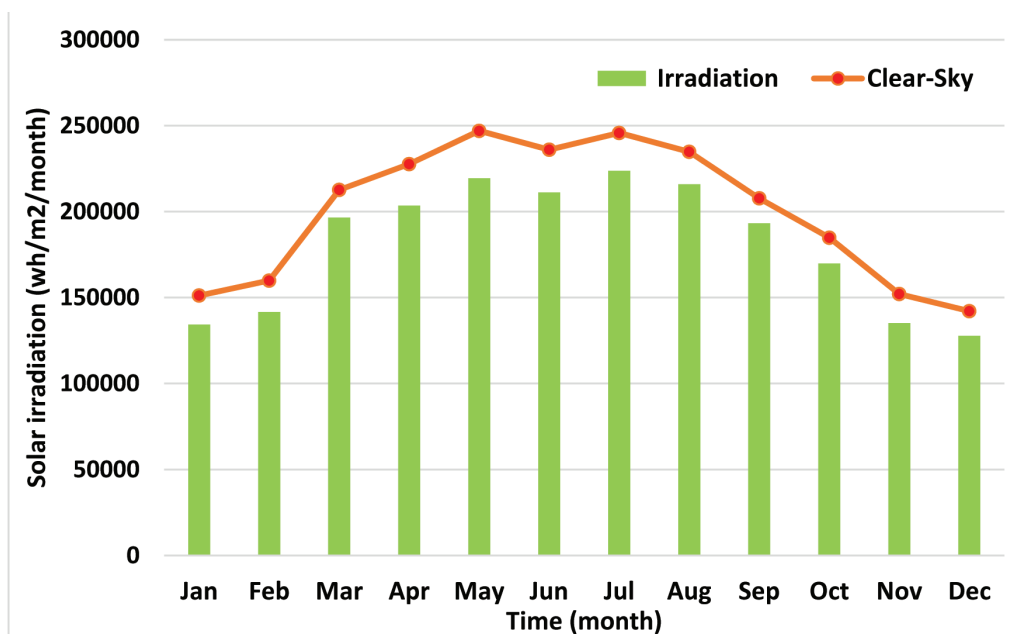


Fig. 2. Average monthly solar radiation in the study area  
 Рис. 2. Среднемесячная солнечная радиация в исследуемом районе

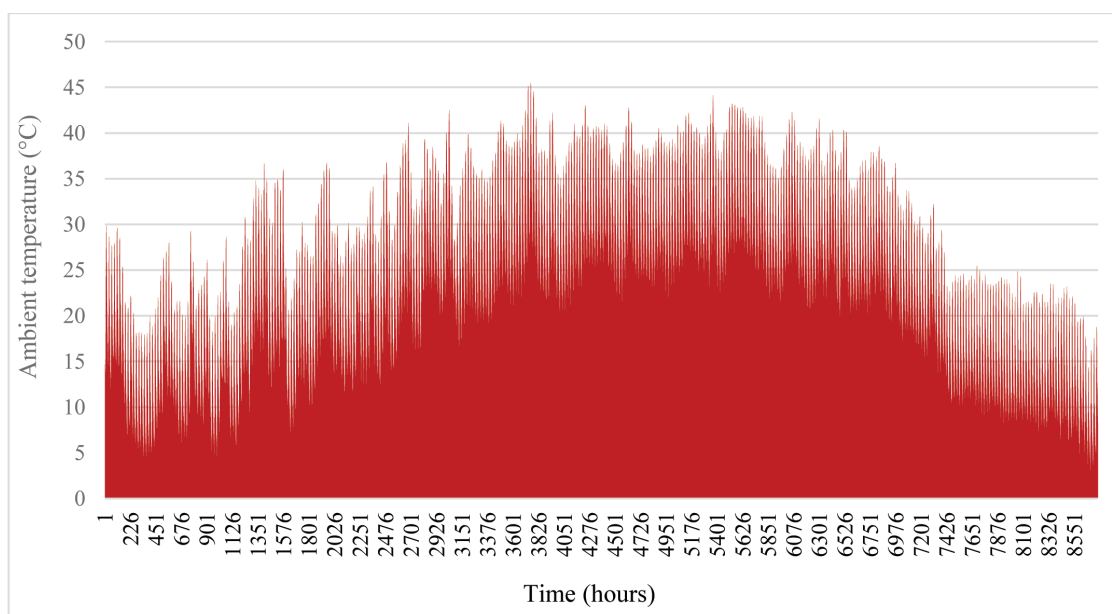
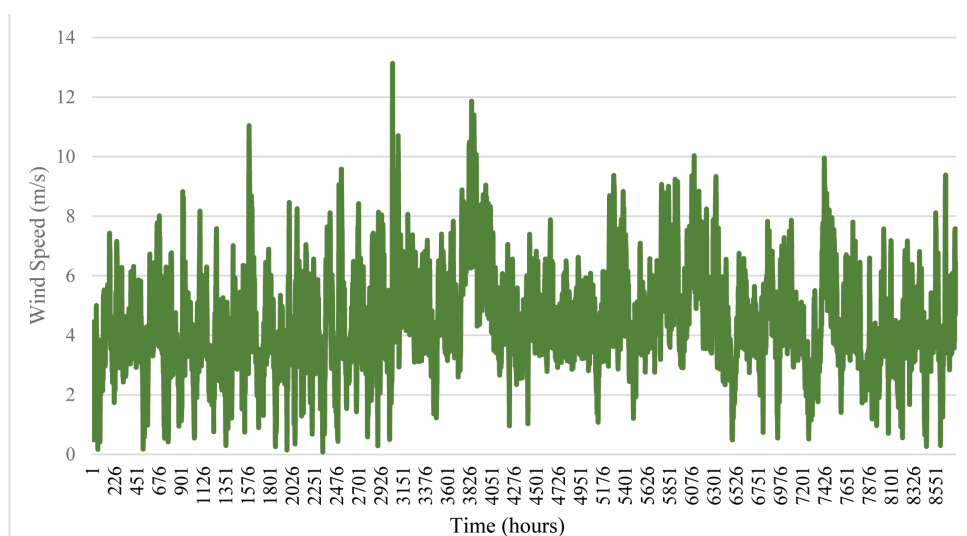


Fig. 3. The annual ambient temperature of the study area  
 Рис. 3. Годовая температура окружающей среды в районе исследования





**Fig. 4.** The annual Wind speed of the study area  
**Рис. 4.** Годовая скорость ветра в исследуемом районе

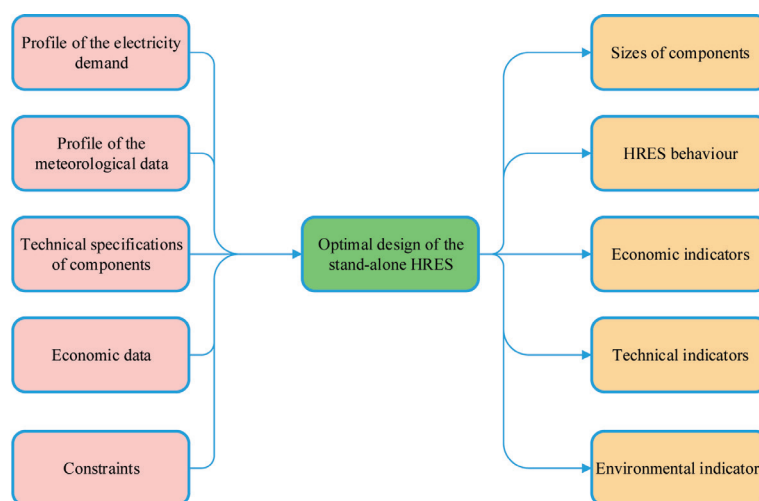
## 2. System modeling

Before commencing the optimal sizing process, it is crucial to develop precise mathematical models for the components of the Integrated Hybrid Renewable Energy System (IHRES). This study introduces an IHRES configuration integrating solar and wind resources, supported by backup power from a diesel generator, battery bank, and hydrogen storage systems. The following descriptions elucidate the mathematical models for each of these components.

### 2.1. Hybrid Renewable Energy System Modeling

Figure 5 depicts the overall structure of the proposed optimization framework, providing a detailed overview of the main input and output data. Input parameters encompass time series data for electrical demand, meteorological

data (ambient temperature, solar irradiance, wind velocity), technical specifications of Hybrid Renewable Energy System (HRES) components (efficiency curves, modulation ranges, etc.), economic data (investment, operation, maintenance and replacement costs, fuel price, discount rate), and constraints (energy system reliability, storage level periodicity, CO<sub>2</sub> emissions, maximum component size). The optimization problem yields several key outputs, including the optimal sizes of all HRES components, the energy system’s performance over the selected time horizon (renewable energy utilization, load coverage, power profiles), economic metrics (levelized cost of energy, net present cost), technical indicators (component lifetimes, etc.), and environmental indicators (CO<sub>2</sub> emissions during HRES operation).



**Fig. 5.** Optimization framework established in this article to execute the optimum design of stand-alone HRES

**Рис. 5.** Структура оптимизации, созданная в этой статье для выполнения оптимального проектирования автономных HRES



In the subsequent sub-sections, we will investigate into the configuration of the system and illustrate upon the mathematical models for each component within the off-grid system.

a) *Solar energy system*

$$P_{PV}(t) = PV_{rated} \times \left( \frac{G(t)}{G_{ref}} \right) \times [1 + K_T \times (T_C - T_{ref})]; \quad (1)$$

where  $PV_{rated}$  represents the rated power of the PV panel,  $G_{ref}$  denotes the solar radiation at reference conditions with a value of  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $K_T$  stands for the temperature coefficient of the maximum power, with a value of  $3,7 \times 10^{-3} (1/^\circ\text{C})$ , and  $T_{ref}$  signifies the PV cell temperature at standard test conditions, holding a value of  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

The cell temperature ( $T_C$ ) is computed as:

$$T_C = T_{amb}(t) + (0,0256 \times G(t)); \quad (2)$$

In this equation, ( $T_{amb}(t)$ ) represents the hourly ambient temperature ( $^\circ\text{C}$ ).

The energy generated by the PV panels ( $E_{PV}$ ) is computed as:

$$E_{PV}(t) = N_{PV}(t) \times P_{PV}(t) \times \Delta t; \quad (3)$$

where  $N_{PV}$  denotes the number of PV panels, and  $\Delta t$

Various models have been suggested in existing literature to assess the output power of photovoltaic (PV) systems. In this study, a simplified model was employed to compute the PV panel's output power ( $P_{PV}(t)$ ), as per Equation (1). This model incorporates the hourly solar radiation ( $G(t)$ ) and the hourly ambient temperature ( $T_{amb}(t)$ ) specific to the study area [13].

represents the time period, which is considered as 1 hour.

b) *The Wind turbine*

Typically, wind speed exhibits variation with height. The measured wind speed at the anemometer height ( $V_{ref}(t)$ ) is converted to the desired hub height speed ( $V_{hub}(t)$ ). The hub height speed is calculated using the wind power law as expressed in Equation (4) [13]:

$$V_{hub}(t) = V_{ref}(t) \times \left( \frac{H_{hub}}{H_{ref}} \right)^\alpha; \quad (4)$$

where  $H_{hub}$ ,  $H_{ref}$ , and  $\alpha$  represent the hub height, reference height, and ground surface roughness coefficient of the wind turbine (WT).

The power generated by the wind turbine ( $P_{WT}$ ) is calculated as follow:

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0, & V_{hub} \leq V_{cut-in}, V_{hub} \geq V_{cut-out} \\ V_{hub}^3(t) \left( \frac{P_r}{V_r^3 - V_{cut-in}^3} \right) - P_r \left( \frac{V_{cut-in}^3}{V_r^3 - V_{cut-in}^3} \right), & V_{cut-in} < V_{hub} < V_r \\ P_r, & V_r \leq V_{hub} < V_{cut-out} \end{cases} \quad (5)$$

Where,  $V_{cut-in}$ ,  $V_{cut-out}$  and  $V_r$  refer to the cut-in, cutout, and reference speeds of the wind turbine and  $P_r$  denotes the rated power of the wind turbine. The output power of WT is zero below  $V_{cut-in}$  and above  $V_{cut-off}$ ; when the turbine starts to operate and after shutting down for safety reasons. When the wind speed rise between  $V_{cut-in}$  and  $V_{rated}$ , the output power increases linearly, and rated power is produced between  $V_{rated}$  and  $V_{cut-off}$  as shown in Fig. 6.

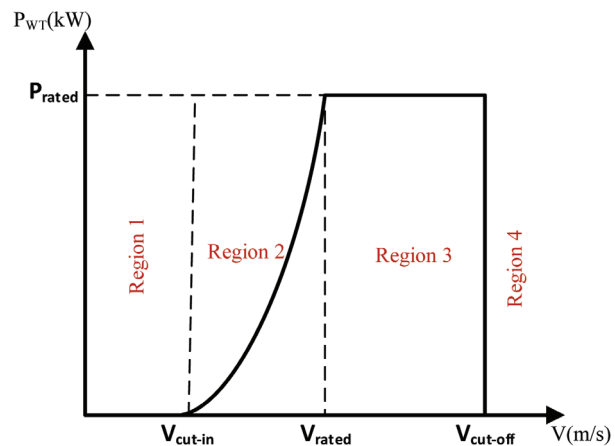


Fig. 6. Output power of a wind turbine generator according to wind speed

Рис. 6. Выходная мощность ветрогенератора зависит от скорости ветра



The energy produced using the wind turbine ( $E_{WT}$ ) can be estimated as:

$$E_{WT}(t) = N_{WT}(t) \times P_{WT}(t) \times \Delta t; \quad (6)$$

where  $N_{WT}$  represents the number of wind turbines and  $\Delta t$  is time step of 1 h.

$$E_{Bat}(t) = (1 - \sigma) \times E_{Bat}(t - 1) + \left( E_G(t) - \frac{E_L(t)}{\eta_{Conv}} \right) \times \eta_{CC} \times \eta_{rBat}; \quad (7)$$

In this equation,  $E_{Bat}(t)$  and  $E_{Bat}(t - 1)$  represent the energy levels of the battery bank at times  $t-1$  and  $t$ , respectively.  $\sigma$  denotes the hourly self-discharge rate of the battery,  $E_G$  is the generated electrical energy,  $E_L$  is the electrical energy demand,  $\eta_{Conv}$  is the efficiency of the converter,  $\eta_{CC}$  is the efficiency of the charge controller, and  $\eta_{rBat}$  is the round-trip efficiency of the battery.

The produced electrical energy  $E_G$  is calculated from the following equation:

$$E_{Bat}(t) = (1 - \sigma) \times E_{Bat}(t - 1) - \left( \frac{E_L(t)}{\eta_{Conv}} - E_G(t) \right) / \eta_{rBat}. \quad (10)$$

#### d) Hydrogen storage system (HSS)

The hydrogen storage system (HSS) consists of a fuel cell, electrolyzer, and hydrogen storage tanks. In the charging process, the electrolyzer utilizes excess generated energy to extract hydrogen and oxygen gases from water. The extracted hydrogen gas is stored in hydrogen storage tanks using compressors [39, 40]. The energy stored in the hydrogen storage tanks during the charging process can be expressed as per reference [29]:

$$E_{HST}(t) = E_{HST}(t - 1) + \left( E_G(t) - \frac{E_L(t)}{\eta_{Conv}} \right) \times \eta_{ELE}; \quad (11)$$

where  $E_{HST}(t - 1)$  and  $E_{HST}(t)$  represent the energy levels in the hydrogen storage tanks at the time 't-1 and 't' respectively, and  $\eta_{ELE}$  refers to the efficiency of the electrolyzer.

The fuel cell functions as an electrochemical cell, converting chemical fuel into electrical energy and

#### c) Battery bank

The battery bank typically provides electrical energy during periods when renewable energy (RE) resources are unavailable or during peak load hours. Surplus energy generated during these times is stored in the batteries during the charging process, which can be expressed as per references [13] and [38]:

$$E_G(t) = E_{DC}(t) \times \eta_{conv}; \quad (8)$$

where the produced DC energy ( $E_{DC}$ ) can be estimated as:

$$E_{DC}(t) = E_{PV}(t) + E_{WT}(t); \quad (9)$$

During the discharging process, when the generated electrical energy by the renewable energy (RE) resources is less than the load demand, the required deficit load can be supplied by the battery bank. This relationship can be expressed as:

supplying it during periods when renewable energy (RE) resources are unavailable or during peak load hours. In the fuel cell, two electrodes are situated on either side of the electrolyte. During the discharging process, a potential difference arises between the electrodes when hydrogen ( $H_2$ ) is supplied to the anode, and the cathode is supplied with the oxidant (air or oxygen ( $O_2$ )). This process is represented by the chemical equation:  $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$  + electrical energy + heat, wherein electrical energy and heat are produced [41]. The charging and discharging processes of the Hydrogen Storage System (HSS) are depicted pictorially in Figure 7. During the discharging process, the energy discharged from the hydrogen storage tanks can be expressed as per reference [29]:

$$E_{HST}(t) = E_{HST}(t - 1) + \left( \frac{E_L(t)}{\eta_{Conv}} - E_G(t) \right) / \eta_{FC} \quad (12)$$

where  $\eta_{FC}$  denotes the efficiency of the fuel cell.





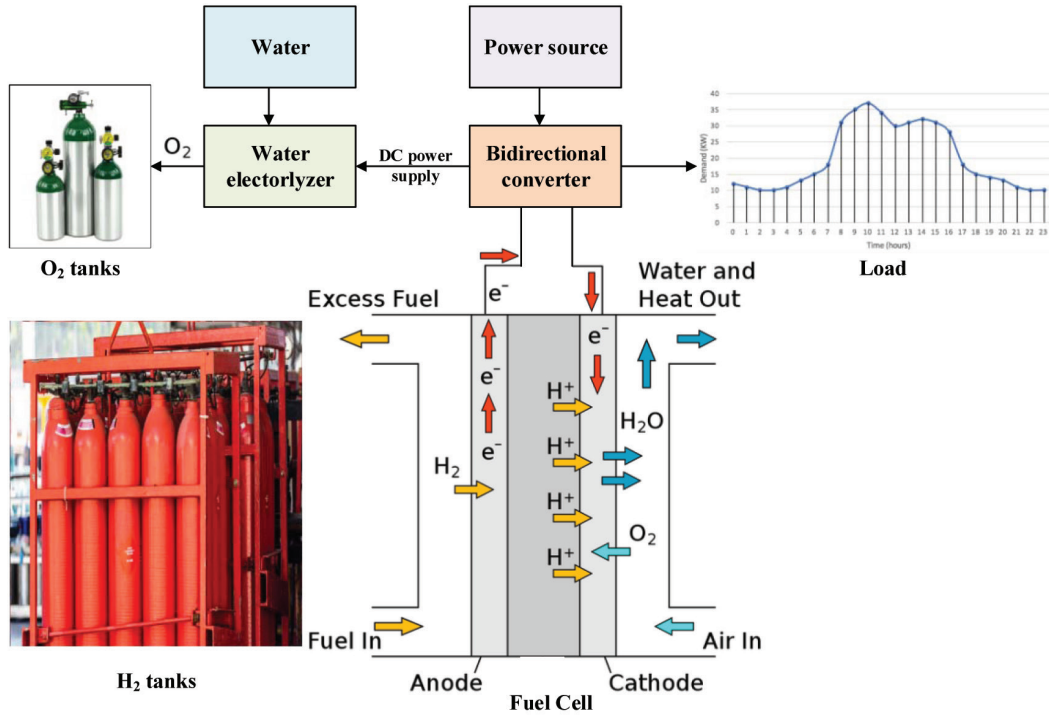


Fig. 7. Charging and discharging process in the hydrogen storage system  
 Рис. 7. Процесс зарядки и разрядки в системе хранения водорода

e) Diesel generator

Diesel generators play a pivotal role in off-grid areas, serving as a critical energy source when batteries are insufficient to meet load demands or during prolonged uncertainties in RE resources, such as continuous cloudy weather or rainy seasons. The primary concern addressed by the DG in this study is the increasing frequency of super storms and other unforeseen incidents, which often result in power outages, leaving many homes, primary health centers, and businesses without electricity. The occurrences of blackouts have doubled over the last ten years. As a result, the integration of DG sets in IHRES enhances microgrid power reliability by providing a stable power source during emergencies and assisting in managing peak loads when batteries cannot meet peak demands. The DG's hourly fuel consumption ( $F_{DG}$ ) can be determined through a linear law based on the required load demand, expressed as per reference [13]:

$$F_{DG}(t) = (a_{DG} \times P_{DG,gen}(t) + b_{DG} \times P_{DG,rat})l/h; \quad (13)$$

Here,  $a_{DG}$  and  $b_{DG}$  represents the coefficients' consumption curve of the DG and their values are  $a_{DG} = 0,246$  (1/kWh) and  $b_{DG} = 0,08145$  (1/kWh).  $P_{DG,gen}(t)$  and  $P_{DG,rat}$  refer to the hourly generated power and rated power of the DG, respectively.

The total annual fuel consumption in liters ( $TAFGIL$ ) of the DG can be calculated as follows:

$$TAFGIL = \sum_{t=1}^{8760} F_{DG}(t); \quad (14)$$

f) CO<sub>2</sub> emission

The DG's hourly CO<sub>2</sub> emission is estimated with respect to its hourly fuel consumption is estimated as [42]:

$$CO_2(t) = SE_{CO_2} \left( \frac{kg}{l} \right) \times F_{DG}(t) \left( \frac{l}{h} \right); \quad (15)$$

where  $SE_{CO_2}$  represents per liter diesel's specific emission of CO<sub>2</sub> and its value is 2,7 kg/l.

The total yearly CO<sub>2</sub> emission of the DG can be obtained from the following equation:

$$TACo_2emission = \sum_{t=1}^{8760} CO_2(t); \quad (16)$$

g) Bidirectional converter with a charge controller (BDC-CC)

The BDC-CC classically performs electrical energy conversion in both rectifier and inverter modes of operation. In the rectifier mode, it transforms Alternating Current (AC) into Direct Current (DC), and it converts Direct Current (DC) into Alternating Current (AC) in the inverter mode. The charge controller serves a crucial role in preventing overcharging and over-discharging of the battery bank. The power rating of the BDC-CC ( $P_{BDC-CC}$ ) is calculated as [43]:

$$P_{BDC-CC} = E_{T,max} \times 1,1 . \quad (17)$$

where  $E_{T,max}$  is the Maximum energy transferred through the converter and multiplication factor 1,1 indicates that the 10-percent overloading capability of the converter.

h) *Load demand*

Figure 6 illustrates the load demand curve of the

residential complex, depicting a peak load of 50 kW. The load assessment indicates that the lowest energy requirement occurs in the morning, while the highest demand is evident in the evening, as shown in Fig. 6. Additionally, the energy demand during the winter season consistently remains lower than the demand in the summer.

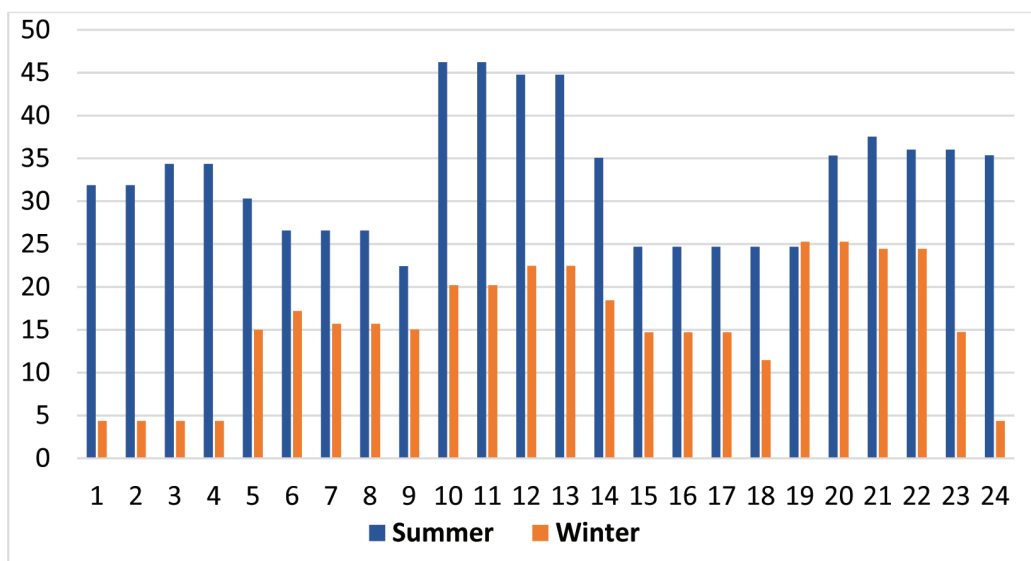


Fig. 8. Daily load demand curve in summer and winter

Рис. 8. Кривая суточной нагрузки летом и зимой

1. *The objective function*

In the preceding section, the system has been modeled by emphasizing the variable decisions crucial for minimizing the objective function. The goal is to minimize costs while achieving the optimal design and size of the Hybrid Renewable Energy System (HRES). The objective function encompasses the total cost of purchases, operations, maintenance, and other pertinent factors.

a) *Economic analysis of the system*

To evaluate the economic feasibility of the Integrated Hybrid Renewable Energy System (IHRES), various methodologies such as annual cost, net present cost, payback period, and life cycle cost (LCC) methods are applied. Among these, the LCC method is commonly utilized for economic analysis as it provides a comprehensive overview of costs throughout the entire project lifespan. In this study, LCC is determined using Equation (18), involving the summation of initial

capital costs, erection costs, present value of annual operation and maintenance (O&M) costs, present value of replacement costs, and present value of fuel costs for all system components. This study operates on the following two assumptions:

1. Erection costs for PV, WT, DG, BAT, FC, ELE, HST, and BDC-CC are assumed to be 20 %, 30 %, 5 %, 3 %, 3 %, 3 %, 3 %, and 3 % of their capital costs, respectively.

2. Replacement costs for DG, BAT, FC, ELE, BDC-CC, MEM, and CHEM (Chemicals) are taken to be 100 %, 100 %, 100 %, 100 %, 100 %, 100 %, and 100 % of their capital costs, respectively.

$$LCC = ICC + EREC + P_{V,O\&M} + P_{V,REP} + P_{V,FUEL}; \quad (18)$$

The initial capital cost (*ICC*) of the IHRES can be computed as:



$$ICC = [(N_{PV} \times C_{PV,cap}) + (N_{WT} \times C_{WT,cap}) + (C_{FC,cap}) + (C_{ELE,cap}) + (N_{HST} \times C_{HST,cap}) + (N_{BAT} \times C_{BAT,cap}) + (C_{BAT,cap}) + (C_{BDC,cap}) + (C_{MEM,cap}) + (C_{CHE,cap}) + (C_{DG,cap})]; \quad (19)$$

where,  $C_{PV,cap}$ ,  $C_{WT,cap}$ ,  $C_{FC,cap}$ ,  $C_{ELE,cap}$ ,  $C_{HST,cap}$ ,  $C_{BAT,cap}$ ,  $C_{BDC,cap}$ ,  $C_{MEM,cap}$ ,  $C_{CHE,cap}$  and  $C_{DG,cap}$  refer to the initial capital costs of the PV, WT, FC, ELE, HST, BAT, BDC-CC, MEM, CHE, and DG, respectively.

The erection cost ( $EREG$ ) of the IHRES is calculated as:

$$EREC = \left[ (N_{PV} \times C_{PV,erect}) + (N_{WT} \times C_{WT,erect}) + (N_{HST} \times C_{HST,erect}) + \left( N_{BAT} \times C_{BAT,erect} \times \sum_{b=1}^{N_r} \frac{(1+x)^{bN_c-1}}{(1+y)^{bN_c}} \right) + \left( C_{FC,erect} \times \sum_{f=1}^{N_r} \frac{(1+x)^{fN_c-1}}{(1+y)^{fN_c}} \right) + \left( C_{ELE,erect} \times \sum_{e=1}^{N_r} \frac{(1+x)^{eN_c-1}}{(1+y)^{eN_c}} \right) + \left( C_{BDC-CC,erect} \times \sum_{d=1}^{N_r} \frac{(1+x)^{dN_c-1}}{(1+y)^{dN_c}} \right) + \left( C_{DG,erect} \times \sum_{p=1}^{N_r} \frac{(1+x)^{pN_c-1}}{(1+y)^{pN_c}} \right) \right]; \quad (20)$$

where  $C_{PV,erect}$ ,  $C_{WT,erect}$ ,  $C_{HST,erect}$ ,  $C_{BAT,erect}$ ,  $C_{FC,erect}$ ,  $C_{ELE,erect}$ ,  $C_{BDC-CC,erect}$  and  $C_{DG,erect}$  represent erection costs of PV, WT, HST, BAT, FC, ELE, BDC-CC and DG, respectively.

The present value of annual O&M ( $P_{V,O\&M}$ ) cost of the IHRES components is calculated as:

$$P_{V,O\&M} = [(N_{PV} \times C_{PV,O\&M}) + (N_{WT} \times C_{WT,O\&M}) + (C_{FC,O\&M}) + (C_{ELE,O\&M}) + (N_{HST} \times C_{HST,O\&M}) + (N_{BAT} \times C_{BAT,O\&M}) + (C_{BDC-CC,O\&M}) + (C_{DG,O\&M})] \times \sum_{i=1}^N \frac{(1+x)^{i-1}}{(1+y)^i}; \quad (21)$$

where  $C_{PV,O\&M}$ ,  $C_{WT,O\&M}$ ,  $C_{FC,O\&M}$ ,  $C_{ELE,O\&M}$ ,  $C_{HST,O\&M}$ ,  $C_{BAT,O\&M}$ ,  $C_{BDC-CC,O\&M}$ , and  $C_{DG,O\&M}$  are operation and maintenance (O&M) costs of the PV, WT, FC, ELE, HST, BAT, BDC-CC, and DG, respectively, and  $y$  is defined as follows:

$$y = \frac{I_{nom} - x}{1 + x}; \quad (22)$$

In the equation,  $y$  represents the discount rate,  $y_{nom}$  denotes the nominal interest rate,  $x$  signifies the inflation rate, and  $N$  indicates the lifespan of the project. The lifetimes of certain components, including the biomass generator, fuel cell, electrolyzer, battery, bidirectional converter with charge controller, and diesel generator (DG), are shorter than the overall project lifetime. Consequently, at various stages of the project's life, these components must undergo replacement.

The present value of annual replacement cost ( $P_{V,REP}$ ) of the IHRES is calculated as:

$$\begin{aligned}
 P_{V,REP} = & \left[ \left( C_{FC,rep} \times \sum_{f=1}^{N_r} \frac{(1+x)^{fN_c-1}}{(1+y)^{fN_c}} \right) + \left( C_{ELE,rep} \times \sum_{e=1}^{N_r} \frac{(1+x)^{eN_c-1}}{(1+y)^{eN_c}} \right) + \left( N_{BAT} \times C_{BAT,rep} \times \sum_{b=1}^{N_r} \frac{(1+x)^{bN_c-1}}{(1+y)^{bN_c}} \right) \right. \\
 & + \left( C_{BDC-CC,rep} \times \sum_{d=1}^{N_r} \frac{(1+x)^{dN_c-1}}{(1+y)^{dN_c}} \right) + \left( N_{MEM} \times C_{MEM,rep} \times \sum_{m=1}^{N_r} \frac{(1+x)^{mN_c-1}}{(1+y)^{mN_c}} \right) \\
 & \left. + \left( C_{CHE,rep} \times \sum_{c=1}^{N_r} \frac{(1+x)^{cN_c-1}}{(1+y)^{cN_c}} \right) + \left( C_{DG,rep} \times \sum_{p=1}^{N_r} \frac{(1+x)^{pN_c-1}}{(1+y)^{pN_c}} \right) \right]; \quad (23)
 \end{aligned}$$

where  $C_{FC,rep}$ ,  $C_{ELE,rep}$ ,  $C_{BAT,rep}$ ,  $C_{BDC-CC,rep}$ ,  $C_{MEM,rep}$ ,  $C_{CHE,rep}$  and  $C_{DG,rep}$  refer to the replacement costs of the fuel cell, electrolyzer, battery, BDC-CC, membranes, chemicals, and DG, respectively, while the  $N_r$  represents the number of replacements needed for the system components and it is calculated as:

$$N_r = \text{int} \left( \frac{N - N_c}{N_c} \right); \quad (24)$$

where  $N_c$  represents the life span of each system component. The present value of the yearly fuel cost ( $P_{V,FUEL}$ ) of the IHRES is calculated as follows:

$$P_{V,FUEL} = [TAFCIL_{DG}] \times \sum_{i=1}^N \frac{(1+x)^{i-1}}{(1+y)^i}. \quad (25)$$

$$\min LCC(N_{PV}, N_{WT}, N_{HST}, N_{BAT}) = \sum_{C=PV,WT,BAT,FC,ELE,HST,DG,BDC-CC}^{\min} (LCC)_C. \quad (26)$$

c) *Cost of energy*

The *COE* is one of the most usually used parameters for calculating the cost-effectiveness of the IHRES and it is computed from the following equation [13]:

$$COE \left( \frac{\$}{kwh} \right) = \left( \frac{LCC}{\sum_{t=1}^{8760} E_L(t)} \right) \times CRF; \quad (27)$$

where *CRF* represents the capital recovery factor and it is computed as:

$$CRF = \frac{y \times (1+y)^N}{(1+y)^N - 1}. \quad (28)$$

where *y* refers to the nominal interest rate. *N* denotes the life span of the project.

d) *Upper and lower limits*

In this paper, it is assumed that the RE resources, solar, and wind are subjected to the following constraints.

$$0 \leq N_{PV} \leq N_{PV,max} \quad (29)$$

$$0 \leq N_{WT} \leq N_{WT,max}; \quad (30)$$

where *TAFCIL* denotes the total yearly fuel consumption in liters of the DG.

b) *Problem formulation*

The objective functions include LCC, COE, and the battery's constraints, HSS, and DG were discussed as follows:

a. *Life cycle cost*

The objective function is presented in Eq. (26), to attain the lowest LCC of the system at loss of power supply probability (LPSP) value of 0 % (power reliability index) with subject to the constraints. The objective function principally depends on four integer decision variables, namely: number of solar panels ( $N_{PV}$ ), wind turbines ( $N_{WT}$ ), hydrogen storage tanks ( $N_{HST}$ ), and batteries ( $N_{BAT}$ ).

where  $N_{PV}$  and  $N_{WT}$  represent the number of PV panels and wind turbines.

Additionally, the hydrogen and battery energy storage systems (ESSs) are subjected to the following constraints.

$$0 \leq N_{HST} \leq N_{HST,max} \quad (31)$$

$$0 \leq N_{HST} \leq N_{HST,max}$$

where  $N_{HST}$  and  $N_{BAT}$  denote the number of HST and batteries.

e) *Battery bank energy storage bounds*

The energy stored in the battery bank at any hour 't' is restricted by the following constraint [38]:

$$E_{Bat,min} \leq E_{Bat}(t) \leq E_{Bat,max} \quad (32)$$

The maximum and minimum bounds of the battery bank is computed as follows:



$$E_{Bat\_max} = \left( \frac{N_{BAT} \times V_{BAT} \times S_{BAT}}{1000} \right) \times SOC_{max-bat}; \quad (33)$$

$$E_{Bat\_min} = \left( \frac{N_{BAT} \times V_{BAT} \times S_{BAT}}{1000} \right) \times SOC_{min-bat}; \quad (34)$$

where  $V_{BAT}$  and  $S_{BAT}$  are the voltage and rated capacity (Ah) of the battery.

The minimum and maximum state of charges of the battery is calculated as follows:

$$SOC_{min-bat} = 1 - DOD; \quad (35)$$

$$SOC_{max-bat} = SOC_{min-bat} + DOD. \quad (36)$$

where  $DOD$  represents the depth of discharge of the battery.

f) Hydrogen energy storage (HST) bounds

The energy stored in the HSTs at any hour 't' is limited by the following expression [29]:

$$E_{HST\_min} \leq E_{HST}(t) \leq E_{HST\_max}; \quad (37)$$

The maximum energy stored in the HST ( $SOC_{max\_HST}$ ) is calculated as:

$$E_{HST\_max} = N_{HST} \times P_{R\_HST} \times SOC_{max\_HST}; \quad (38)$$

Here,  $P_{R\_HST}$  and  $SOC_{max\_HST}$  represent the rated power and maximum size of the hydrogen energy storage.

$$E_{HST\_min} = N_{HST} \times P_{R\_HST} \times SOC_{min\_HST}. \quad (39)$$

where  $SOC_{min\_HST}$  refers to the minimum size of the hydrogen energy storage. The assessment of the HST

$$LPS(t) = \frac{E_L(t)}{\eta_{conv}} - E_G(t) - [E_{HST}(t-1) - E_{HST\_min}] \times \eta_{fc}; \quad (41)$$

The  $LPSP$  is calculated as [29]:

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T LPS(t)}{\sum_{t=1}^T E_L(t)}. \quad (42)$$

### 1.1. Methodology of the energy management strategy

The robust Energy Management Strategy (EMS) holds a crucial role in the design of microgrids. The primary goal of the EMS is to adeptly control the power flow among various components while minimizing degradation of the batteries, fuel cell, and electrolyzer. Its objective is to optimize the utilization of Renewable Energy (RE) resources, consequently lowering fuel consumption. The incorporation of the EMS has resulted in enhancements in system reliability, leading to substantial cost savings and improved energy efficiency. The proposed EMS is formulated using a rule-based algorithm, specifically employing conditions such as 'if,' 'else,' and 'then.' The

maximum and minimum state of charges are similarly to the battery bank calculations.

g) Diesel generator operating bounds

The DG exhibits greater efficiency at higher loads. Consequently, this study imposes a minimum load requirement for DG operation, set at 40 % of its rated capacity. Thus, the DG will operate in simulations only when observing to the specified limitation as follows [44]:

$$\frac{E_L(t)}{\eta_{conv}} \geq P_{DG, rat} \times \Delta t. \quad (40)$$

where  $E_L(t)$  is the hourly energy demand.  $\eta_{conv}$  is the efficiency of the converter.  $P_{DG, rat}$  represents the rated power of the diesel generator.  $\Delta t$  denotes the time period.

h) Power reliability index

The reliability of a power system is defined by its ability to provide a steady power supply over a designated duration under specified conditions. This study assesses the power reliability of the IHRES using the LPSP. LPSP is calculated by examining the hourly loss of power supply (LPS) in comparison to the hourly energy demand. LPS is determined by considering the hourly generated energy, load demand, and the energy levels in the storage systems. Specifically, the LPS for hydrogen and battery storage systems is computed as follows [29]:

subsequent subsections elaborate on the load-following and cycle-charging strategies employed by the EMS.

a) Cycle charging strategy

The CC strategy is characterized by the activation of the diesel generator (DG) to fulfill the deficit load demand and simultaneously store excess energy in the batteries or HSTs. In Modes 1 to 3 of the CC strategy, the operations those of the LF strategy. The Mode-4 operation in the CC strategy is clarified as follows [45]:

In Mode-4 of the CC strategy, when the total energy generated by the RE resources and the batteries or HSTs falls short of meeting the load demand, the DG operates



at its rated capacity. The primary function of the DG is to fulfill the load demand while concurrently charging the batteries or HSTs. The DG remains operational until

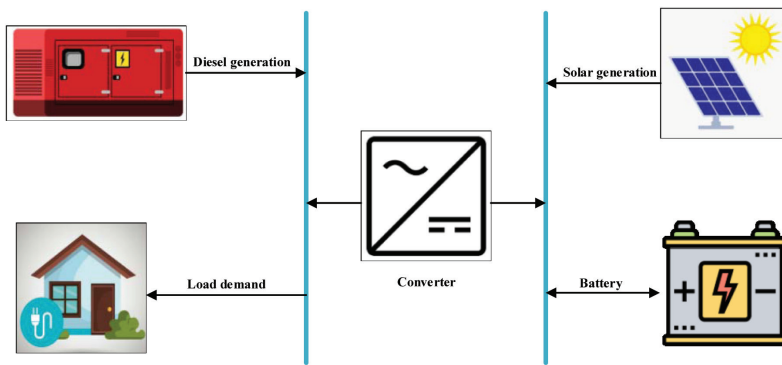
the RE resources generate sufficient power to satisfy the entire load requirements. Upon reaching this point, the DG discontinues its operation.

### 1.2. Proposed hybrid renewable energy systems

In Egypt, abundant RE sources are available, with solar energy holding a superior position from an economic standpoint compared to other resources, followed by wind energy in the second position. Therefore, in the hybrid systems proposed in this paper, solar energy is designated as the primary RES in both systems. Additionally, the choice of the energy storage device varies based on determining the option that offers the least cost and highest reliability. In the first proposed system, a battery is chosen as the storage device, while in the second system, a hydrogen storage device comprising an electrolyzer, fuel cell, and HST is employed.

#### a) First proposed system

Figure 8 depicts a schematic diagram of the initial proposed hybrid energy system (HES), showcasing its main components, including the PV module, diesel engine, and battery bank. In this system, the PV module and battery are interconnected with the DC bus, while the diesel generator and load demand are linked to the AC bus. Energy flows between the DC bus and the AC bus, either supplying power to meet the load demand or charging the battery, facilitated by a bidirectional converter. Once the electricity demand is met and the battery is fully charged, any surplus energy from the renewable sources (PV/Wind) is discarded.

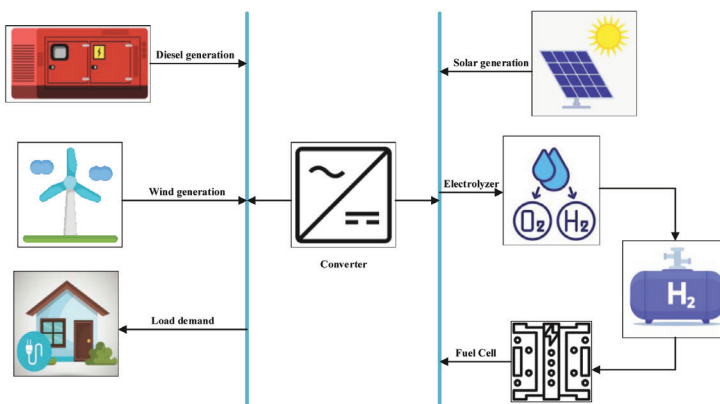


**Fig. 9.** Schematic configuration of PV/diesel hybrid with a battery storage system  
**Рис. 9.** Схематическая конфигурация фотоэлектрического/дизельного гибрида с системой аккумуляторного хранения

#### b) Second proposed system

Figure 9 displays the layout of the second proposed stand-alone hybrid system. This system incorporates PV units, wind turbines (WT), and diesel generators as the primary power sources, with a hydrogen storage device serving as the energy storage component. When the electricity generated by the PV arrays and wind turbines exceeds the demand from the load, the surplus energy is utilized by the electrolyzer to produce hydrogen through

water electrolysis. This hydrogen is then stored in the hydrogen reservoir for later use. In cases where the power generated by the energy generation units is insufficient to meet the load demand, the stored hydrogen is introduced into the fuel cell unit. The fuel cell unit converts the hydrogen into electrical energy, which is then supplied to the load.



**Fig. 10.** Schematic configuration of PV/wind/diesel hybrid with a hydrogen storage system  
**Рис. 10.** Схематическая конфигурация фотоэлектрического/ветро-дизельного гибрида с системой хранения водорода



### 1.3. HRES modeling

Figure 10 displays the flow chart utilized for modeling the proposed design, which incorporates chemical and electrochemical storage considerations. The diagram illustrates the power management process of a HRES that integrates PV, WT, DG, and either battery or fuel cell storage. The management process begins by comparing the load demand with the combined energy generated from the PV and wind turbine. If the generated energy is insufficient, the battery or fuel cell storage undergoes charging until it reaches the maximum allowable

capacity, utilizing any surplus energy. In situations where the energy generated by the PV and wind turbine falls short of meeting the demand, the diesel generator is activated to supply power to the HRES. The flow chart concludes by calculating the state of the battery or fuel cell storage, determining its current level, and assessing the amount of energy that has been stored or discarded. This comprehensive approach ensures effective energy management and optimal utilization of the available resources in the HRES.

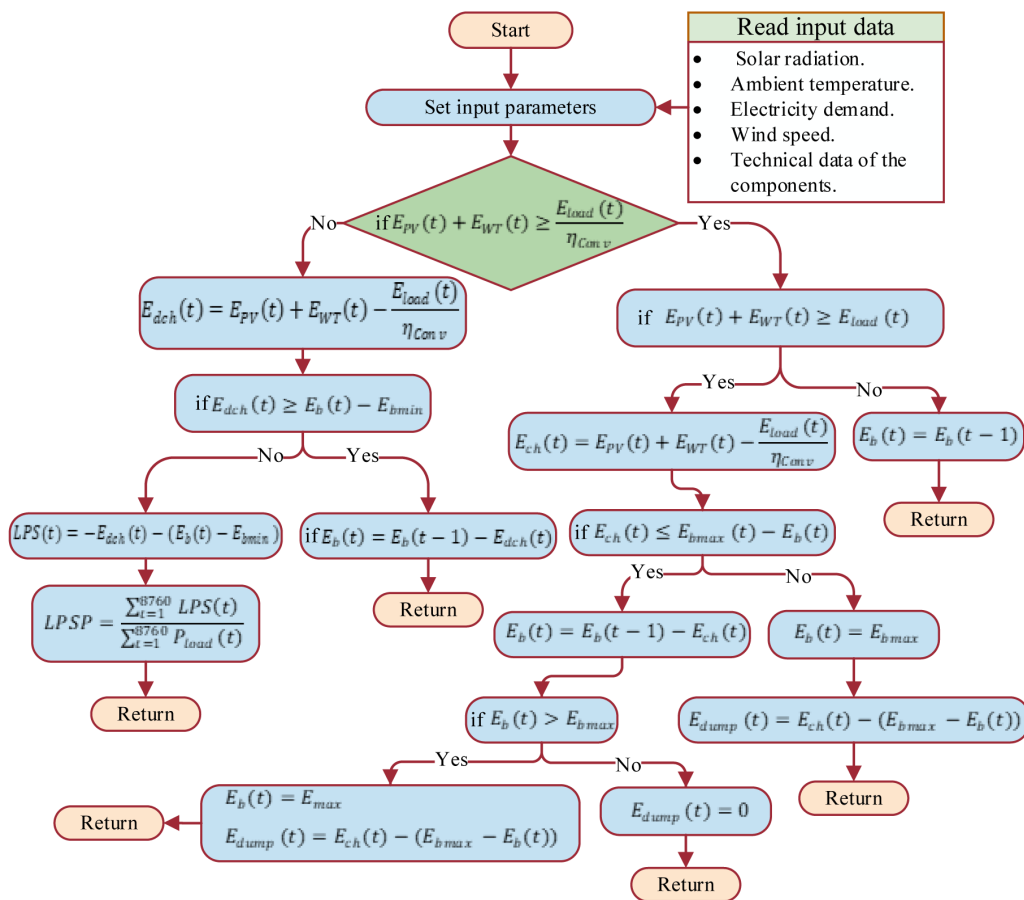


Fig. 11. Hybrid PV/ Wind with battery or fuel cell storage systems

Рис. 11. Гибридные фотоэлектрические/ветряные системы с аккумуляторами или системами хранения на топливных элементах

The technical and cost values used in the study are listed in Tables 1.

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

Table 1

Technical characteristics of the component in the intended hybrid energy system

Таблица 1

Технические характеристики компонента планируемой гибридной энергосистемы

Component	Description	Value
PV system	Project lifetime	25 years
	Nominal interest rate	13 %
	Inflation rate	5 %
	Rated power of PV panel	0,25 kWp
	Lifetime of PV Panel	25 years
	Capital cost of PV panel	\$250
	AO & M cost of PV panel	\$6.25
Wind turbine	Rated power of WT	1 kW
	Lifetime of WT	25 years
	Hub height of WT	20 m
	Reference height of WT	10 m
	Cut - in speed of WT	2,5 m / sec
	Cut - out speed of WT	21 m / sec
	Rated speed of WT	11 m / sec
	Capital cost of WT	\$2,500
	AO & M cost of WT	\$75
Fuel cell	Rated power of FC	3 kW
	Efficiency of FC	50 %
	Lifetime of FC	5 years
	C & R cost of 1 kW FC	\$2,400
	AO & M cost of 1 kW FC	\$120
Electrolyzer	Rated power of ELE	3 kW
	C & R of 1 kW ELE	\$800
	AO & M cost of 1 kW ELE	\$16
	lifetime of ELE	15 years
	Efficiency of ELE	74 %
Hydrogen storage	Capital cost of HST	\$600
	Rated capacity of HST	0,3 kWh
	Life time of HST	25 years
	AO & M cost of HST	\$5
Converter system	Rated power of BDC - CAP.C	55 kW
	Lifetime of converter	10 years
	C & R of converter	\$5,940
	AO & M cost of converter	\$15
	Efficiency of converter	95 %
Diesel generator	DG Model No: C62.5D5P )	62,5 KVA
	C & R of DG	\$5,715
	Diesel Price	\$0,97
	AO & M cost of DG	3 % of TAOHDG



## 2. Methodology of the proposed algorithm

This section begins with the arrangement of the conventional ARO technique to minimize the objective function presented in the previous section, subsequently a description of the proposed QIARO technique.

### 2.1. Original artificial rabbit algorithm

The ARO algorithm simulates the foraging and hiding strategies observed in real rabbits, where their energy levels diminishing during transitions between these tactics [30].

$$v_i(t+1) = x_j(t) + R \times (x_i(t) - x_j(t)) + \text{round}(0,5 \times (0,05 + r_1)) \times n_1, \quad i, j = 1, \dots, j \neq i; \quad (43.1)$$

$$R = L \times c; \quad (43.2)$$

$$L = (e - e^{\frac{t-1}{T}}) \times \sin(2\pi r_2); \quad (43.3)$$

$$c(k) = \begin{cases} 1 & \text{if } k == g(l) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad k = 1, \dots, d \text{ and } l = 1, \dots, [r_3 \cdot d]; \quad (43.4)$$

$$g = \text{randperm}(d), n_1 \sim N(0,1). \quad (43.5)$$

where  $v_i(t+1)$  represents the candidate location of the  $i$ th rabbit at the time  $(t+1)$ ,  $x_i(t)$  refers to the position of the  $i$ th rabbit at the time  $t$ ,  $d$  is the dimension of the problem,  $T$  is the maximal number of iterations,  $\text{randperm}$  is a random permutation of the integers from 1 to  $d$ .  $L$  denotes the running length which represents the movement pace when performing the detour foraging, and  $n_1$  represents subject to the standard normal distribution.  $R$  represents

### 2.1.1. Detour foraging

The detour foraging behavior observed in this technique suggests that each individual in the swarm tends to randomly update its position to other individuals, thereby introducing perturbations to enhance exploration. The model for the detour foraging behavior of rabbits can be expressed as follows [30]:

the running operator that is employed to simulate the running characteristic of rabbits.  $\lceil \cdot \rceil$  is the ceiling function.

### 2.1.2. Random hiding

When confronted with predators, rabbits often exhibit a defensive behavior by digging holes near their nests for protection. This behavior can be denoted by the following model [30]:

$$b_{i,j}(t) = x_i(t) + H \cdot g \cdot x_i(t), \quad i = 1, \dots, n \text{ and } j = 1, \dots, d; \quad (44.1)$$

$$H = \frac{T - t + 1}{T} \cdot r_4, \quad n_2 \sim N(0,1); \quad (44.2)$$

$$g(k) = \begin{cases} 1 & \text{if } k == j \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad k = 1, \dots, d; \quad (44.3)$$

where  $H$  represents the hiding parameter which is linearly decreased from 1 to  $1/T$  with a random perturbation over the course of iterations.

To ensure their survival, rabbits adopt a strategy of

finding a secure hiding place. They accomplish this by randomly selecting one of their available holes for shelter, effectively evading potential threats. This random hiding strategy can be represented as follows:

$$v_i(t+1) = x_i(t) + R \times (r_4 \times b_{ir}(t) - x_i(t)) \quad i = 1, \dots, n; \quad (45.1)$$

$$g(k) = \begin{cases} 1 & \text{if } k == [r_5 \times d] \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad k = 1, \dots, d; \quad (45.2)$$

$$b_{i,r}(t) = x_i(t) + H \cdot g \cdot x_i(t); \quad (45.3)$$

where  $b_{i,r}$  is a randomly selected burrow for hiding from its  $d$  burrows, and,  $r_4$  and  $r_5$  denote two random numbers in  $[0,1]$ . After performing either detour foraging

or random hiding, the update of the  $i$ -th rabbit's position can be stated as follows:

$$x_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t) & f(x_i(t)) \leq f(v_i(t+1)) \\ v_i(t+1) & f(x_i(t)) > f(v_i(t+1)) \end{cases} \quad (46)$$

### 2.1.3. Energy shrink

The energy shrink factor is utilized to mathematically model the transition from exploration to exploitation. Therefore, the energy can be expressed as follows:

$$A(t) = 4 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \ln \frac{1}{r} \quad (47)$$

where  $r$  is the random number in  $[0, 1]$ .

## 2.2. The proposed artificial rabbit algorithm QIARO

The quadratic interpolation optimization (QIO) two search approaches based on the Generalized quadratic interpolation (GQI) method. These approaches were designed to enhance the overall performance of the proposed algorithm. The quadratic interpolation way is

a regularly used method for curve fitting, which is often utilized for unary functions to exploration for the lowest point inside a given definite initial interval [46].

### 2.2.1. First search strategy

To categorize capable regions, two individuals randomly selected from the current population and the current individual are cooperatively employed in the GQI technique, and the minimizer of the interpolation function designed by three locations is attained. In the intervening time, the third individual randomly selected from the current population is used to produce the new candidate solution. It can improve population variety. When performing examination by the GQI process, the location of the current individual is updated as follows:

$$v_i(t+1) = x_{i,rand1,rand2}^*(t) + w_1 \cdot (x_{rand3}(t) - x_{i,rand1,rand2}^*(t)) + round(0,5 \cdot (0,05 + r_1)) \cdot \log \frac{r_2}{r_3}; \quad (48.1)$$

$$x_{i,rand1,rand2}^*(t) = GQI(x_i(t), x_{rand1}(t), x_{rand2}(t), f(x_i(t)), f(x_{rand1}(t)), f(x_{rand2}(t))); \quad (48.2)$$

$$w_1 = 3n_1b; \quad (48.3)$$

$$b = 0,7a + 0,15a \left(\cos \left(\frac{5\pi t}{T}\right) + 1\right); \quad (48.4)$$

$$a = \cos \left(\frac{\pi t}{2T}\right). \quad (48.5)$$

where  $x_{rand1}$ ,  $x_{rand2}$  and  $x_{rand3}$  denote the locations of the different individuals randomly selected from the current population,  $r_1$ ,  $r_2$  and  $r_3$  refer to the random numbers in  $[0, 1]$ , and  $f(\bullet)$  is the function fitness value.  $GQI(x_i(t), x_{rand1}(t), x_{rand2}(t), f(x_i(t)), f(x_{rand1}(t)), f(x_{rand2}(t)))$  represents the GQI function, by which the minimizer of the interpolation function designed using  $(x_i(t), f(x_i(t)), (x_{rand1}(t), f(x_{rand1}(t)))$  and  $(x_{rand2}(t), f(x_{rand2}(t)))$  is obtained [46]. Three randomly selected individuals in Equation (48.1) can expand the search range efficiently, and the GQI process is helpful to location the promising areas.

$b$  is an adaptive coefficient,  $n_1$  represents the standard normal distribution,  $t$  denotes the number of iterations, while  $T$  refers to the maximum number of iterations.

### 2.2.2. Second search strategy

In this strategy, two randomly selected individuals from the current population and the optimal individual found so far are used in the GQI process to produce a better solution. It is promising for the technique to find the global best solution in the region nearby the minimizer. Therefore, the location of the current individual is updated as:

$$v_i(t+1) = x_{best,rand1,rand2}^*(t) + w_2 \cdot (x_{best}(t) - round(1 + rand) \cdot \frac{u_b - l_b}{u_b^{rD} - l_b^{rD}} \cdot x_i^{rD}(t)); \quad (49.1)$$

$$x_{best,rand1,rand2}^*(t) = GQI(x_{best}(t), x_{rand1}(t), x_{rand2}(t), f(x_{best}(t)), f(x_{rand1}(t)), f(x_{rand2}(t))); \quad (49.2)$$

$$w_2 = 3 \left(1 - \frac{t-1}{T}\right) n_2; \quad (49.3)$$





Where  $W_2$  is an adaptive coefficient,  $n_2$  is the standard normal distribution,  $rD$  represents a random integer from  $[1, d]$ ,  $l_b^{rD}$  and  $u_b^{rD}$  denote the lower and

higher limits at the ( $rD$ )th dimension.

After performing either first or second strategy, the update of the  $i$ th rabbit's position is stated as follows:

$$c_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t) & f(x_i(t)) \leq f(v_i(t+1)) \\ v_i(t+1) & f(x_i(t)) > f(v_i(t+1)) \end{cases} \quad (50)$$

Figure 11 shows the flowchart of the QIARO technique, which incorporates the two search strategies based on the Generalized quadratic interpolation (GQI)

process. These strategies improve the exploration capability of the technique by perform effective searches along each dimension in the search area.

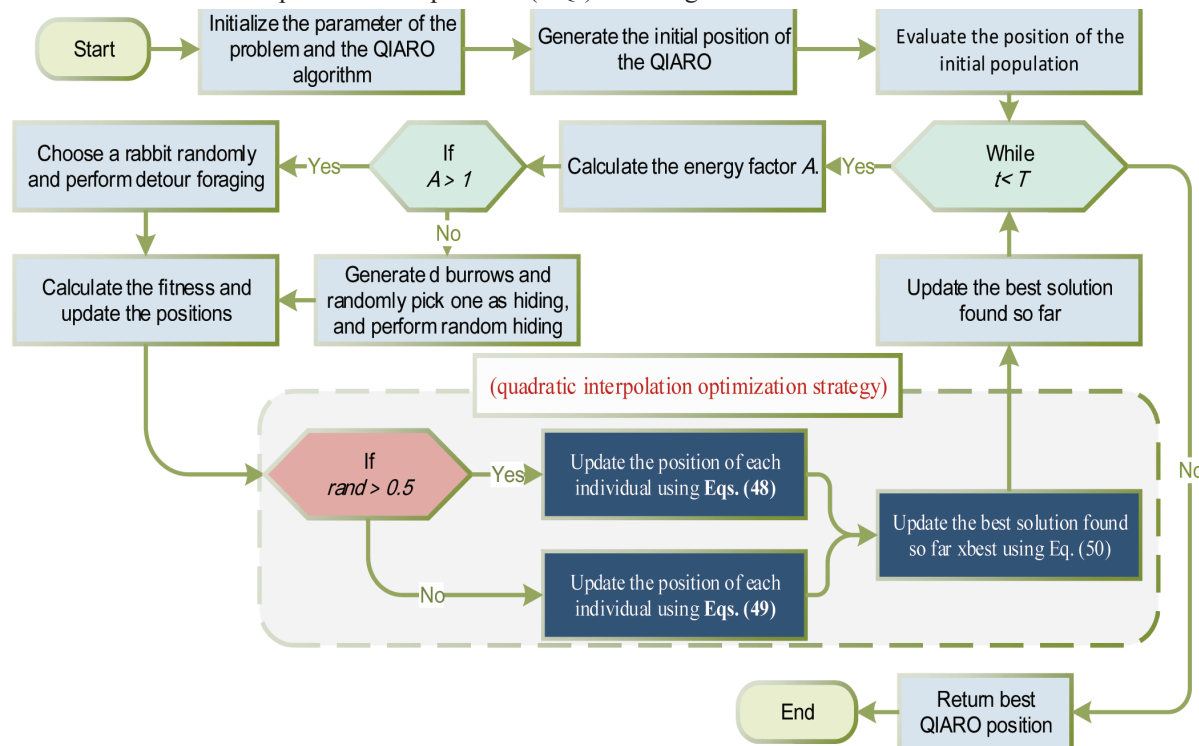


Fig. 12. Flow chart of the proposed QIARO algorithm  
 Рис. 12. Блок-схема предлагаемого алгоритма QIARO

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Benchmark functions

In this subsection, we showcase the efficacy of the proposed QIARO method using assessing its performance on 7 benchmark functions. The mathematical expressions for these test functions are available in [47]. The used benchmark experiments were conducted using MATLAB (R2016a) on a computer equipped with an Intel(R) Core i5-4210U CPU running at 2,40 GHz and 8GB of RAM. This paper utilizes seven benchmark test functions to assess and compare the performance of the QIARO method. All the metaheuristic techniques discussed in this article adhere to a consistent maximum iteration limit of 200 iterations, coupled with a population size of 50.

In this section, it is conducted a comparative analysis

of the QIARO technique against four recently proposed techniques: the Beluga whale optimization (BWO) [48], Pelican optimization algorithm (POA) [49], weighted mean of vectors optimizer (INFO) [50], Runge Kutta optimizer (RUN) [51], and original ARO algorithms. The assessment of solution quality is based on mean values and standard deviations. Minor mean values and standard deviations indicate strong global optimization competences and superior constancy. The statistical results resulting from applying the QIARO technique and five recent techniques to solve 7 benchmark functions are shown in Table 2.

As depicted in Table 2, the QIARO algorithm consistently outperforms other evaluated approaches

across the majority of benchmark functions in terms of the mean value. The data clearly indicates that the QIARO technique consistently achieves more promising solutions compared to recently proposed algorithms for solving various benchmark functions. Moreover, the QIARO approach surpasses the performance of BWO, POA, INFO, RUN, and the original ARO algorithms in tackling benchmark functions. This analysis underscores the effectiveness of the QIARO technique. The tied rank method, a statistical approach employed to compare the

performance of multiple techniques in the presence of ties in the performance metric, reveals that the QIARO technique exhibits superior performance across the majority of the seven benchmark optimization problems, as indicated by its ranking order. BWO and RUN algorithms secure the second and third positions, both demonstrating robust effectiveness. This collective evidence establishes the QIARO algorithm as a highly efficient technique for effectively identifying optimal solutions within this category of problems.

Table 2  
The statistical results of seven benchmark functions by the QIARO technique and five well-known algorithms  
Таблица 2  
Статистические результаты семи эталонных функций по методике QIARO и пяти известных алгоритмов

Function	QIARO	ARO	POA	RUN	INFO	BWO	
F1	Best	0	1.59E-26	1.18E-45	9.07E-86	4.44E-49	1.5E-111
	Average	0	1.07E-21	1.62E-37	5.02E-77	1.84E-43	3.8E-106
	Median	0	4.68E-23	1.86E-41	1.06E-82	9.67E-46	6.8E-108
	Worst	0	7.08E-21	3.09E-36	1E-75	2.45E-42	2.5E-105
	std	0	2.18E-21	6.9E-37	2.24E-76	5.79E-43	6.8E-106
	Rank	1	6	5	3	4	2
F2	Best	3E-228	1.34E-14	3.79E-23	1.04E-47	1.08E-24	1.95E-57
	Average	1.1E-159	1.15E-12	3.15E-20	1.87E-43	1.83E-22	2.56E-54
	Median	8.8E-171	1.22E-13	5.04E-21	1.2E-44	1.11E-23	1.15E-54
	Worst	1.1E-158	1.78E-11	1.67E-19	2.3E-42	3.2E-21	1.18E-53
	std	3.5E-159	3.94E-12	4.9E-20	5.35E-43	7.11E-22	3.58E-54
	Rank	1	6	5	3	4	2
F3	Best	0	4.28E-21	1.74E-43	5.75E-77	1.16E-39	6.4E-104
	Average	5.2E-270	5.08E-15	8.76E-39	2.33E-62	1.27E-32	5.5E-100
	Median	6.3E-299	6.99E-17	3.91E-41	1.5E-69	4.71E-35	1.2E-101
	Worst	4.4E-269	6.41E-14	1.19E-37	4.54E-61	1.65E-31	7.3E-99
	std	0	1.51E-14	2.76E-38	1.01E-61	3.71E-32	1.6E-99
	Rank	1	6	4	3	5	2
F4	Best	2.4E-306	8.35E-13	2.06E-24	1.35E-42	1.21E-22	9.97E-55
	Average	1.5E-138	2.6E-09	5.73E-20	2.09E-35	8.95E-19	2.03E-52
	Median	1.5E-156	7.79E-10	4.04E-21	5.61E-39	1.88E-20	5.03E-53
	Worst	1.5E-137	2.28E-08	4.68E-19	4.16E-34	1.5E-17	1.38E-51
	std	4.7E-138	5.09E-09	1.29E-19	9.3E-35	3.34E-18	4.03E-52
	Rank	1	6	4	3	5	2



F5	Best	1.47E-07	0.048127	27.59768	23.34961	23.12486	0.000406
	Average	3.75E-07	2.57084	28.57786	24.73586	24.43097	0.010977
	Median	3.15E-07	1.069097	28.75691	24.85999	24.41788	0.006422
	Worst	9.07E-07	16.26736	28.8694	26.52757	25.78378	0.05599
	std	2.4E-07	3.783419	0.376116	0.832917	0.620893	0.015734
	Rank	1	3	6	5	4	2
F6	Best	1.61E-09	0.009568	2.287489	7.23E-09	1.16E-06	2.47E-08
	Average	5.02E-09	0.044563	3.220579	1.19E-08	1.47E-05	5.36E-07
	Median	4.34E-09	0.039666	3.076281	1.19E-08	8.52E-06	3.77E-07
	Worst	1.44E-08	0.098375	4.6641	2.24E-08	3.81E-05	1.4E-06
	std	3.56E-09	0.026373	0.548631	3.7E-09	1.31E-05	4.28E-07
	Rank	1	5	6	2	4	3
F7	Best	0.000223	3.22E-05	1.74E-05	3.74E-05	0.000201	2.65E-06
	Average	0.000716	0.001407	0.000404	0.00042	0.00178	0.000257
	Median	0.00059	0.00115	0.000328	0.000413	0.00135	0.000225
	Worst	0.001386	0.003564	0.001649	0.000865	0.005593	0.000674
	std	0.000381	0.001071	0.000361	0.000268	0.001428	0.000205
	Rank	4	5	2	3	6	1
Average Rank	1.428571	5.285714	4.571429	3.142857	4.571429	2	
Final ranking	1	6	4	3	4	2	

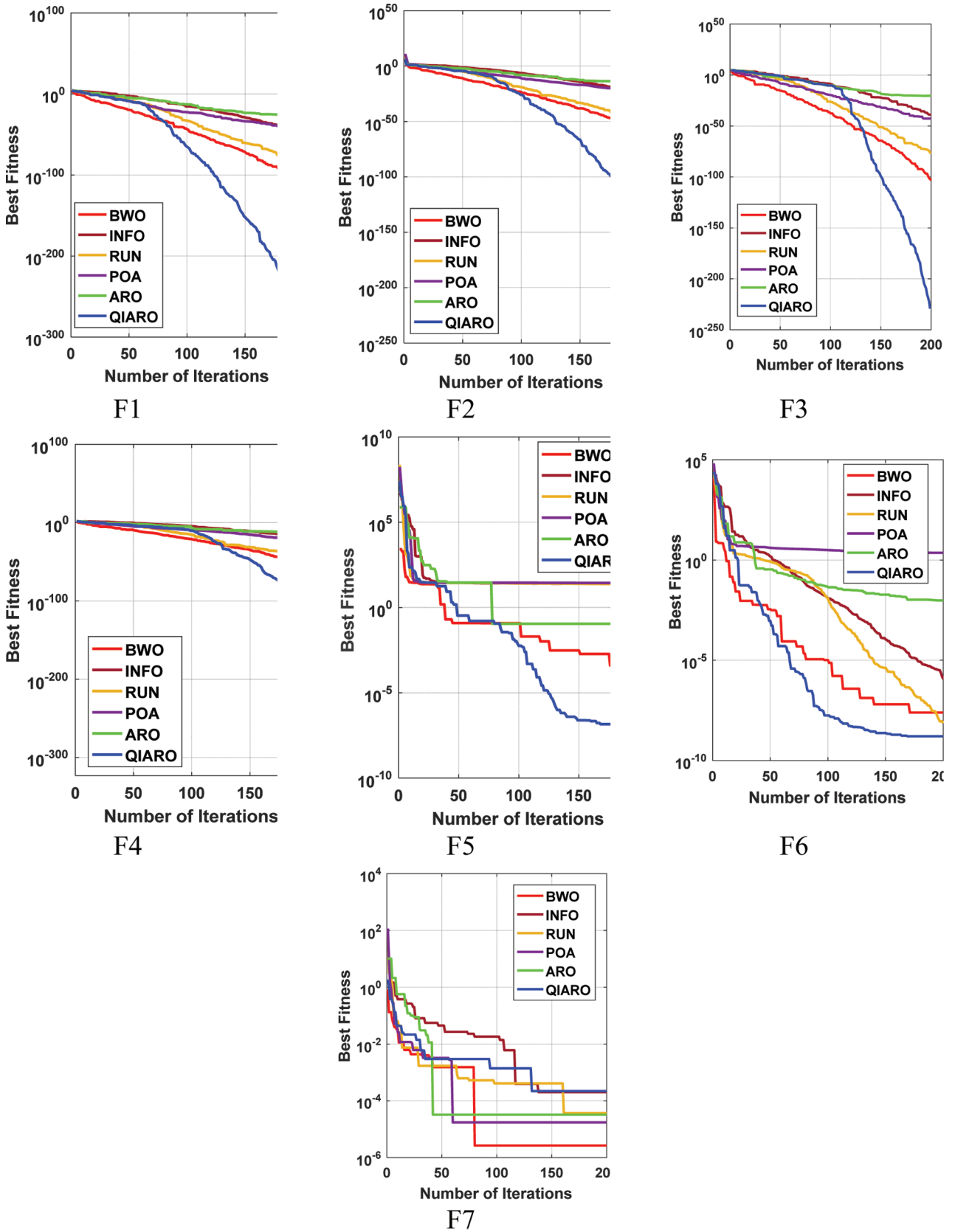
Furthermore, the convergence curves clearly demonstrate the superiority of the QIARO technique compared to other approaches for the majority of benchmark functions. This emphasizes its strength and versatility in addressing a wide range of optimization problems. The exceptional performance of the QIARO algorithm can be attributed to its effective integration of the ARO technique and two search strategies. This combination enables it to efficiently explore the search space, exploit promising regions, and achieve faster convergence with optimal solutions.

Additionally, the convergence curves, as shown in Figure 12, not only confirm the rapid convergence of the QIARO algorithm but also highlight its ability to maintain stable and consistent performance throughout the optimization process. This is a crucial characteristic for an optimization technique, ensuring that it reliably identifies optimal solutions without getting trapped in local optima. Furthermore, experimental results demonstrate that the QIARO algorithm exhibits flexibility to variations in optimization parameters, such as population size. This flexibility suggests that the QIARO technique can be easily applied to diverse problem domains without

requiring extensive parameter adjustments.

In conclusion, these results firmly establish the QIARO algorithm as a powerful and adaptable optimization technique capable of efficiently achieving optimal solutions for a wide range of real-world optimization tasks. The algorithm's fast convergence, stable performance, and parameter flexibility position the QIARO technique as the preferred choice for researchers.

The mathematical data is visually presented through box plots, which depict the different optimum values obtained across multiple runs for each specific technique. Figure 13 displays these box plots for seven benchmark functions, utilizing data collected from 30 individual iterations. Box plots excel at illustrating the spread of data, providing a robust means to highlight data reliability. Upon examining Figure 13, it becomes evident that the box plots for the QIARO algorithm exhibit narrower spreads and rank among the lowest values for most functions. These visual representations serve as powerful tools for evaluating the performance of the nonlinear system, offering a clear differentiation between various algorithms. The results undeniably underscore the superior performance of the QIARO technique.



**Fig. 13.** The convergence curves of the studied algorithms for the benchmark functions  
**Рис. 13.** Получены кривые сходимости исследуемых алгоритмов для эталонных функций

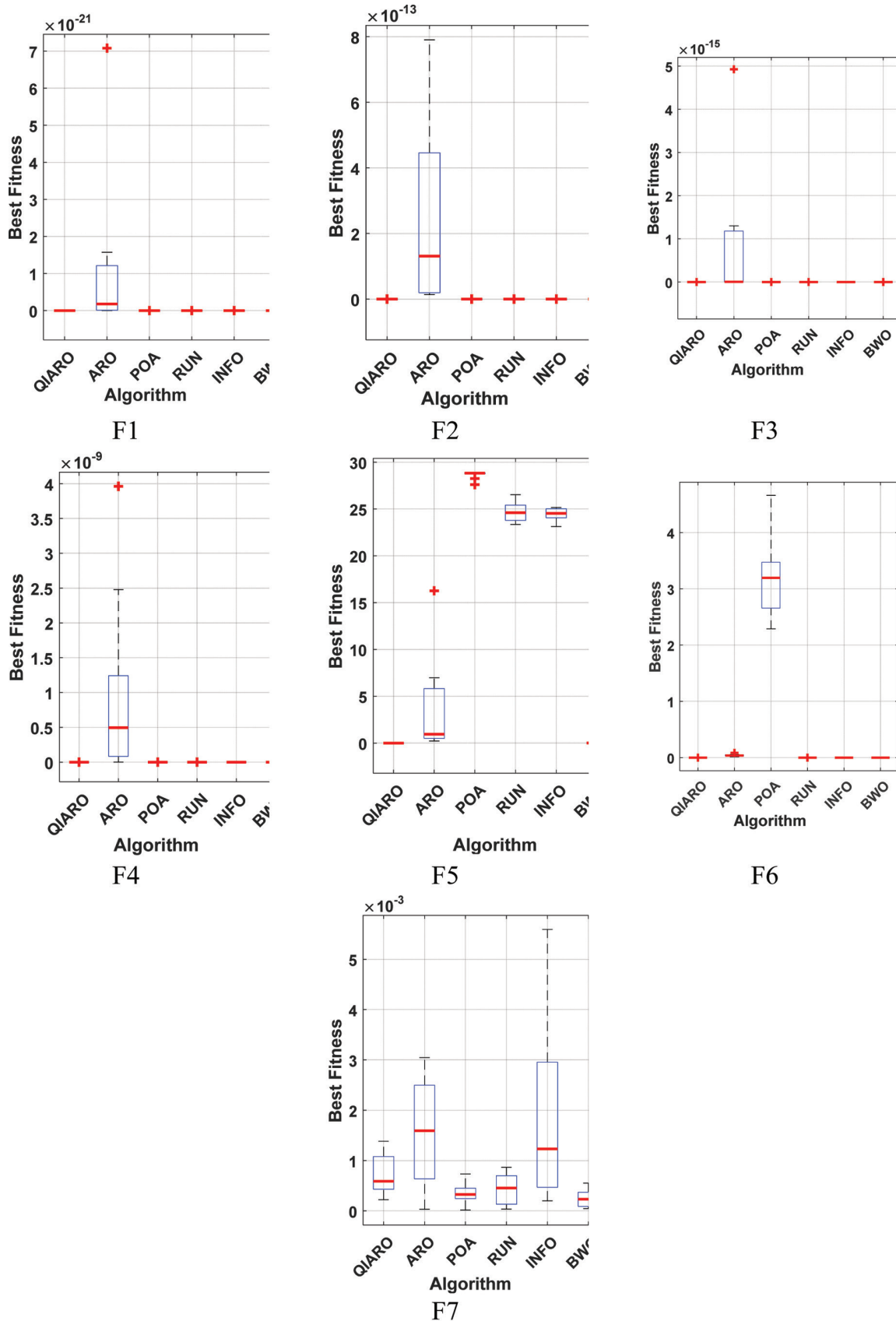


Fig. 14. Boxplots of the studied algorithms for the benchmark functions  
 Рис. 14. Блок-схемы изученных алгоритмов для эталонных функций





1) Wilcoxon's rank test results

In this section, a more detailed statistical analysis is conducted to assess the differences between QIARO and other algorithms using the Wilcoxon rank-sum test (WRST), a paired evaluation method employed to identify significant distinctions between the two algorithms. The results of these tests, presented at a significance level of  $\alpha = 0,05$ , are elucidated in Table 2. Within the table, symbols denoted as «+/-/-» indicate whether QIARO outperforms, performs equally, or underperforms compared to the alternative algorithm. Additionally, the table provides

statistical insights into QIARO's performance across various dimensions and functions, elucidating whether it exhibits superior, comparable, or inferior performance relative to the comparison technique.

It is noteworthy that QIARO demonstrates significantly higher statistical performance in F1-F7 with Dim = 30 when compared to other algorithms, affirming its substantial superiority across most functions. Hence, we can confidently assert that the QIARO algorithm exhibits the best overall performance when compared to alternative approaches.

Statistical results of the Wilcoxon rank-sum test

Table 3

Таблица 3

Статистические результаты теста суммы рангов Уилкоксона

QIARO vs	ARO		POA		RUN		INFO		BWO	
Function	P	winner	P	winner	P	winner	P	winner	P	winner
F1	6.39E-05	+	6.39E-05	+	6.39E-05	+	6.39E-05	+	6.39E-05	+
F2	1.83E-04	+	1.83E-04	+	1.83E-04	+	1.83E-04	+	1.83E-04	+
F3	1.79E-04	+	1.79E-04	+	1.79E-04	+	1.79E-04	+	1.79E-04	+
F4	1.83E-04	+	1.83E-04	+	1.83E-04	+	1.83E-04	+	1.83E-04	+
F5	1.83E-04	+	1.83E-04	+	1.83E-04	+	1.83E-04	+	1.83E-04	+
F6	1.83E-04	+	1.83E-04	+	1.01E-03	+	1.83E-04	+	1.83E-04	+
F7	5.39E-02	=	3.76E-02	-	1.62E-01	=	1.86E-01	=	5.80E-03	-
WRST (+/=-/-)	6/0/1		6/1/0		6/0/1		6/1/0		6/0/1	

2) Friedman's rank test results

Table 4 presents the statistical outcomes derived from Friedman tests applied to 7 benchmark functions using the studied techniques. In this evaluation, a lower ranking value indicates a higher performance of the technique. The results reveal a distinct ranking order among the six algorithms, namely: QIARO, ARO, POA, RUN, INFO, and BWO.

This established ranking order provides valuable insights into the relative performance of these techniques across the benchmark functions, with QIARO emerging as the top-performing algorithm, followed by BWO, RUN, INFO, POA, and ARO in descending order. These findings offer a comprehensive perspective on how the techniques compare to each other across various test functions.

Friedman test for the six techniques

Table 4

Тест Фридмана для шести методов

Таблица 4

Function	QIARO	ARO	POA	RUN	INFO	BWO
F1	1	6	4.9	3	4.1	2
F2	1	6	4.9	3	4.1	2
F3	1	6	4	3	5	2
F4	1	6	4.5	3	4.5	2
F5	1	3	6	4.6	4.4	2
F6	1.1	5	6	1.9	4	3
F7	4.2	4.6	2.8	2.5	4.7	2.2
Mean ranks	1.471429	5.228571	4.728571	3	4.4	2.171429

a. *The study case results*

In general, rural remote communities can achieve electrification through existing RE resources. However, a fundamental drawback of RE resources is their inherent variability, coupled with their reliance on meteorological conditions in the selected location for energy generation. Due to the time and weather-dependent nature of RE resources, the power supply to the study area is not continuous. Despite utilizing RE resources for electrification, a significant challenge arises from their inability to provide a consistent power supply. Therefore, the implementation of a reliable storage system becomes essential to ensure a continuous and uninterrupted power supply. As a solution, this study proposes the adoption of Nickel-Iron (Ni-Fe) battery technology and electrolysis technology for hydrogen production. To assess the effectiveness and robustness of the QIARO technique,

it is compared with the conventional ARO technique. Both of these configurations are subjected to testing using metaheuristic techniques within the MATLAB© environment.

*First Case study*

The outcomes outlined in Table 5 were obtained with an LPSP value of 0 % for the first configuration discussed earlier, employing both the proposed QIARO and conventional ARO techniques as described above. In this configuration, the table showcases the most favorable Life Cycle Cost (LCC) values, along with the optimal number of PV panels and batteries. Notably, the proposed QIARO technique generated the overall best optimal solutions in this scenario. Consequently, the effectiveness of QIARO in identifying global optimum solutions is affirmed when compared to the original QRO algorithm.

Table 5

Таблица 5

Optimization results of the IHRES for the PV/DG/BAT configuration (Case 1)

Результаты оптимизации IHRES для конфигурации PV/DG/BAT (Случай 1)

Quantity and Cost	QIARO	ARO
$N_{PV}$	675	679
$N_{BAT}$	735	733
TAFCL	1314	1335
$TA_{CO_2}$ (kgs)	3548	3603
LCC (\$)	<b>645271</b>	645531
COE (\$/kWh)	0.194405	0.194483

Fig. 14 displays the convergence curves of the studied techniques of the Ni-Fe battery-based IHRES configuration; these curves are valuable to assess the

convergence rapidity of the QIARO technique with regard to the original ARO algorithm in achieving the global optimum solution.

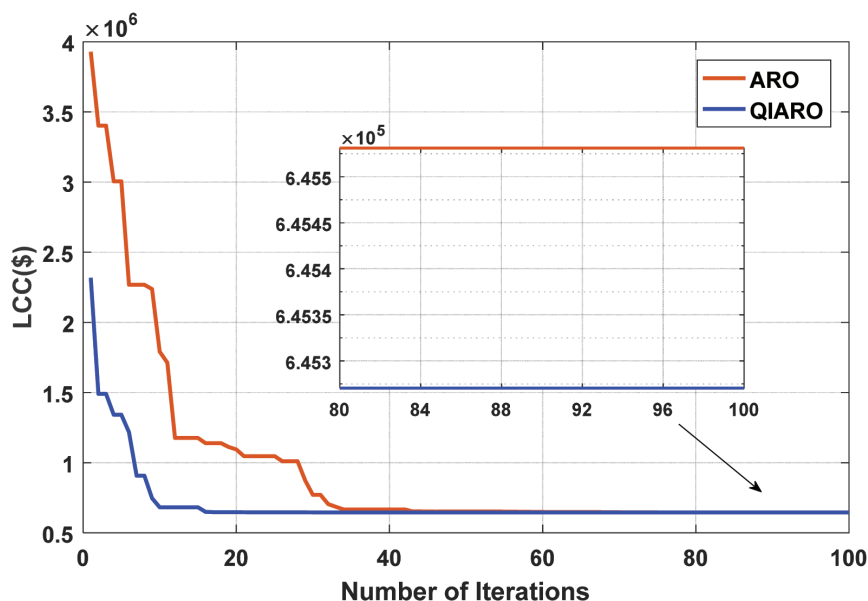


Fig. 15. Convergence curves of the Ni-Fe battery-based IHRES (Case 1)

Рис. 15. Кривые сходимости IHRES на основе Ni-Fe аккумуляторов (пример 1)

In Figures 15 and 16, diverse components of energy graphs for case 1 are depicted, covering both the summer and winter seasons over one week. These visuals demonstrate that from morning to evening (7 A.M to 5 PM in summer and 8 A.M to 4 PM in winter), the PV panels independently fulfill the estimated load demand. Within this timeframe, any surplus energy generated by the PV panels is effectively harnessed to charge the batteries.

However, during the evening hours (from 4 PM) until the subsequent morning (from 7 A.M to 8 A.M), when solar radiance is insufficient, the PV panels are incapable of producing energy. To ensure an uninterrupted power supply during this period, the batteries discharge to cover the shortfall in load, meeting the majority of the load demand. This cyclic pattern persists throughout all days in both the summer and winter seasons.

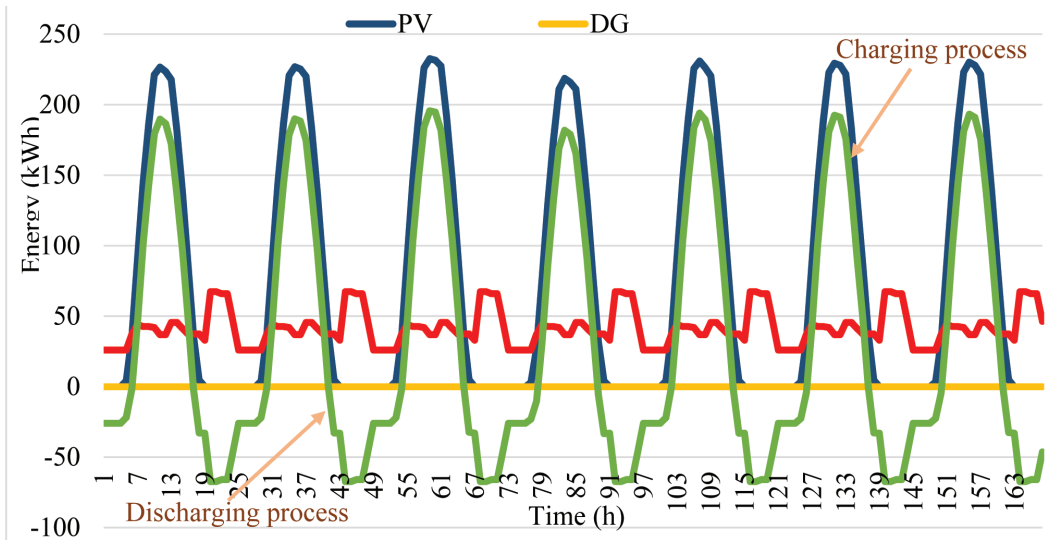


Fig. 16. PV system output through the summer season of one week in July month (Case 1)

Рис. 16. Производительность фотоэлектрической системы в течение летнего сезона в течение одной недели в июле месяце (пример 1)

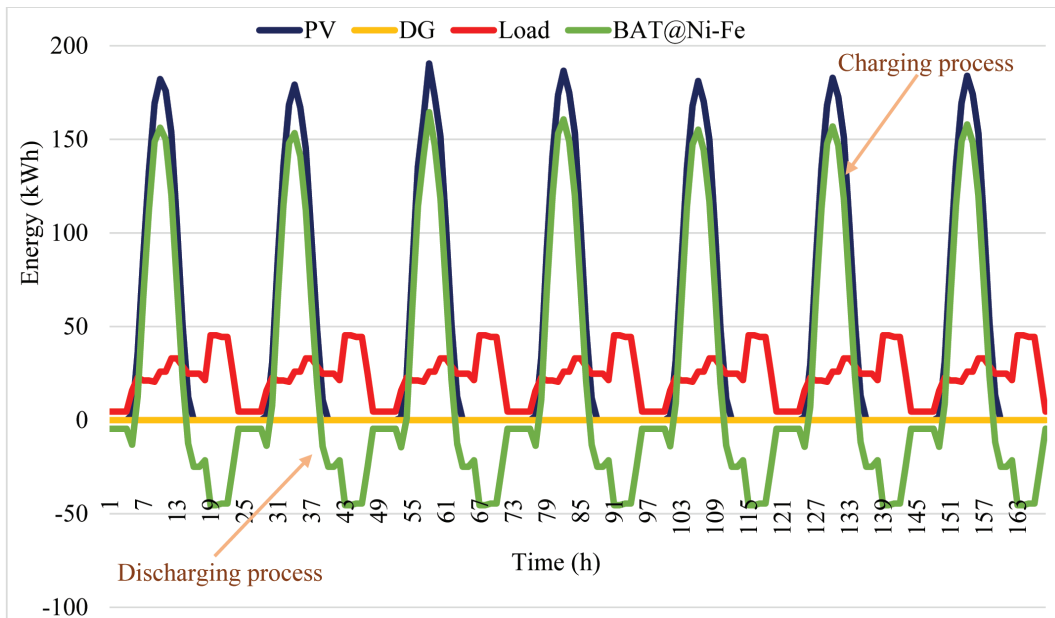


Fig. 17. PV system output through the winter season of one week in December month (Case 1)

Рис. 17. Производительность фотоэлектрической системы в течение зимнего сезона в течение одной недели в декабре месяце (пример 1)

Fig. 17 illustrates the variation between the load demand and the energy supplied by the PV system for LPSP = 0 %. The depicted curves confirm that the overall

power generated by the PV modules consistently fulfills the load condition, remaining consistently equal to or higher than the required power.



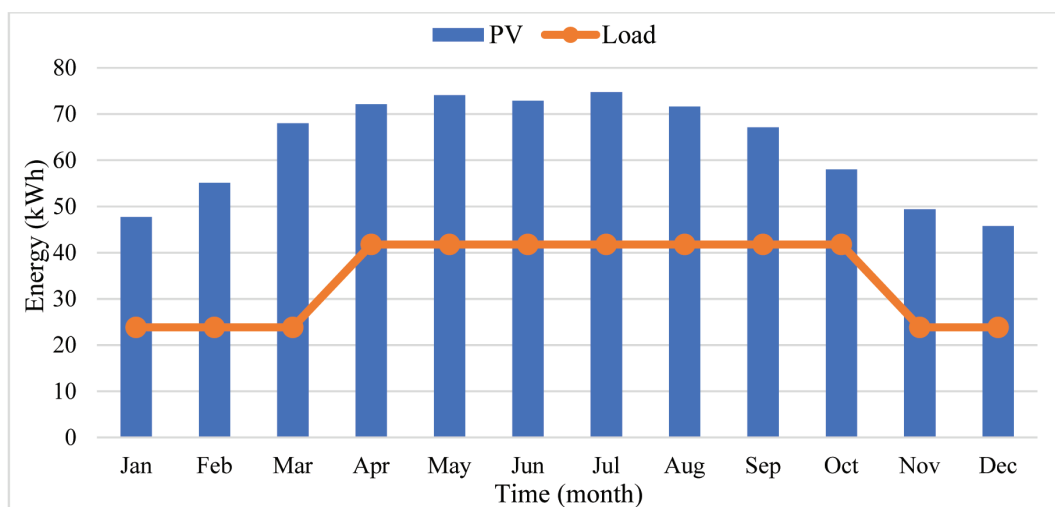


Fig. 18. Monthly average energy share of PV system using QIARO algorithm (Case 1)

Рис. 18. Среднемесячная доля энергии в фотоэлектрической системе с использованием алгоритма QIARO (пример 1)

### Second Case study

Hydrogen holds substantial potential for expediting the expansion of clean and renewable energy, yet its integration into power systems remains relatively understudied. Common hydrogen generation methods, such as steam reforming, coal gasification, and water electrolysis, are predominantly employed for industrial hydrogen production. Alternative approaches, such as enhancing ethanol and sugars, water bio-photolysis,

photochemical water splitting, and high-temperature water splitting, are still in the developmental stages and are infrequently implemented on an industrial scale. Presently, with the declining cost of renewable electricity, there is growing interest in water electrolytic hydrogen generation, which utilizes electricity to extract hydrogen from water without producing carbon byproducts like CO<sub>2</sub>. In this study, the optimal outcomes of the PV/WT/DG/HST configuration using the examined techniques at an LPSP value of 0 % are detailed in Table 6.

Optimization results of the IHRES for the PV/WT/HST/DG configuration (Case 2)

Table 6

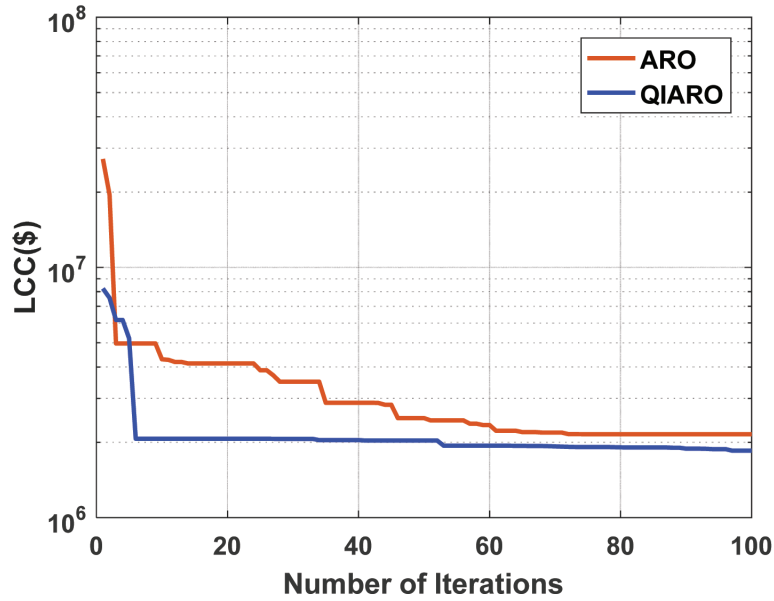
Результаты оптимизации IHRES для конфигурации PV/WT/HST/DG (Случай 2)

Таблица 6

Quantity and Cost	QIARO	ARO
$N_{PV}$	1207	1153
$N_{WT}$	1	3
$N_{HST}$	1589	2416
TAFCIL	18369,13	6937,028
TA <sub>CO2</sub> (kgs)	49595,64	18729,98
LCC (\$)	<b>1852421</b>	2155420
COE (\$/kWh)	0,710305	0,826489

Evaluating the convergence characteristics of the proposed QIARO algorithm in comparison to the original ARO algorithm is a crucial aspect when assessing their performance within the context of Hydrogen storage-based Integrated Hybrid Renewable Energy Systems (IHRES). The convergence curves illustrated in Fig. 18 offer valuable insights into the efficiency and effectiveness of the proposed QIARO algorithm. In Fig. 18, the convergence curve of the QIARO algorithm illustrates its rapid convergence toward an optimal solution for the

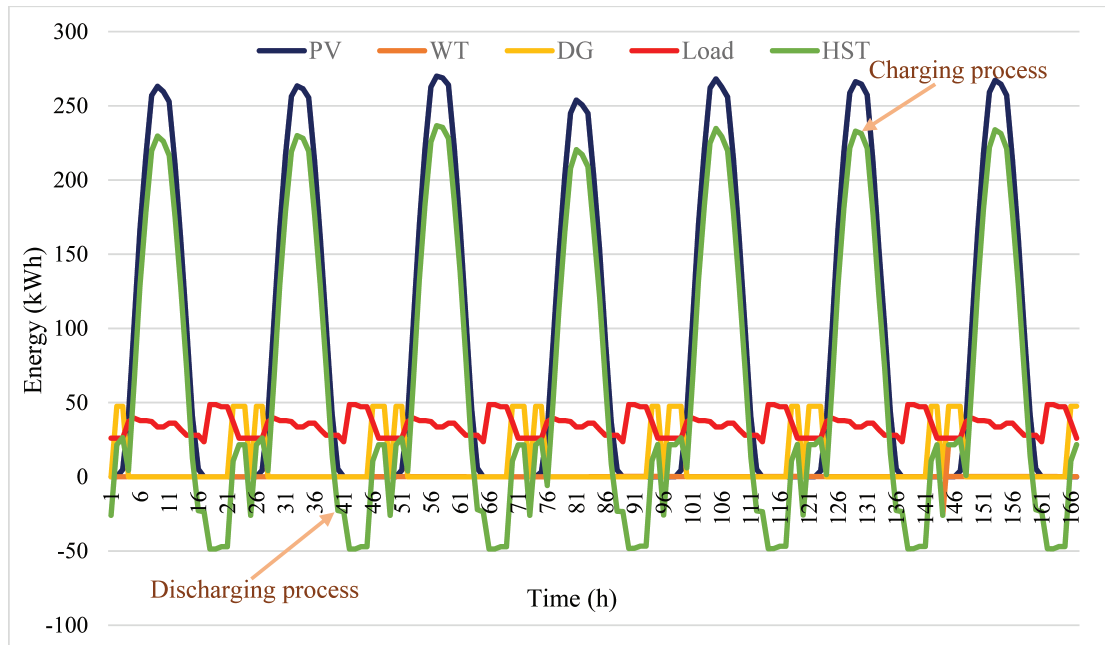
Hydrogen storage-based IHRES (Case 2). The algorithm's adaptability and a well-balanced exploration-exploitation approach are evident, demonstrating its effectiveness in identifying an optimal configuration for the system. Comparing the convergence curves of both algorithms is essential for evaluating their performance. If the QIARO algorithm exhibits faster convergence, it suggests that the quantum-inspired features contribute to efficiently navigating the solution space.



**Fig. 19.** Convergence curves of the Hydrogen storage-based IHRES (Case 2)  
**Рис. 19.** Кривые сходимости IHRES, основанных на хранении водорода (пример 2)

In Figures 19 and 20, various components of energy graphs for case 2 are illustrated during the summer and winter seasons over one week. Observations from these figures indicate that from morning to evening (7 A.M to 5 P.M in summer and 8 A.M to 4 P.M in winter), the PV panels effectively fulfill the estimated load demand. Surplus energy generated during this period is directed towards charging the batteries. However, in the evening (from 4 P.M) until the following morning (from 7 A.M

to 8 A.M), when solar radiance is insufficient, the PV panels are unable to generate energy. To maintain an uninterrupted power supply during this timeframe, the Diesel Generator (DG) and batteries collaborate to supply the deficit load, meeting the majority of the load demand. This cycle repeats throughout all days of both the summer and winter seasons. Additionally, due to the limited wind in the chosen region, the contribution of the Wind Turbine (WT) is minimal.



**Fig. 20.** PV system output through the summer season of one week in July month (Case 2)  
**Рис. 20.** Производительность фотоэлектрической системы в течение летнего сезона в течение одной недели в июле месяце (пример 2)





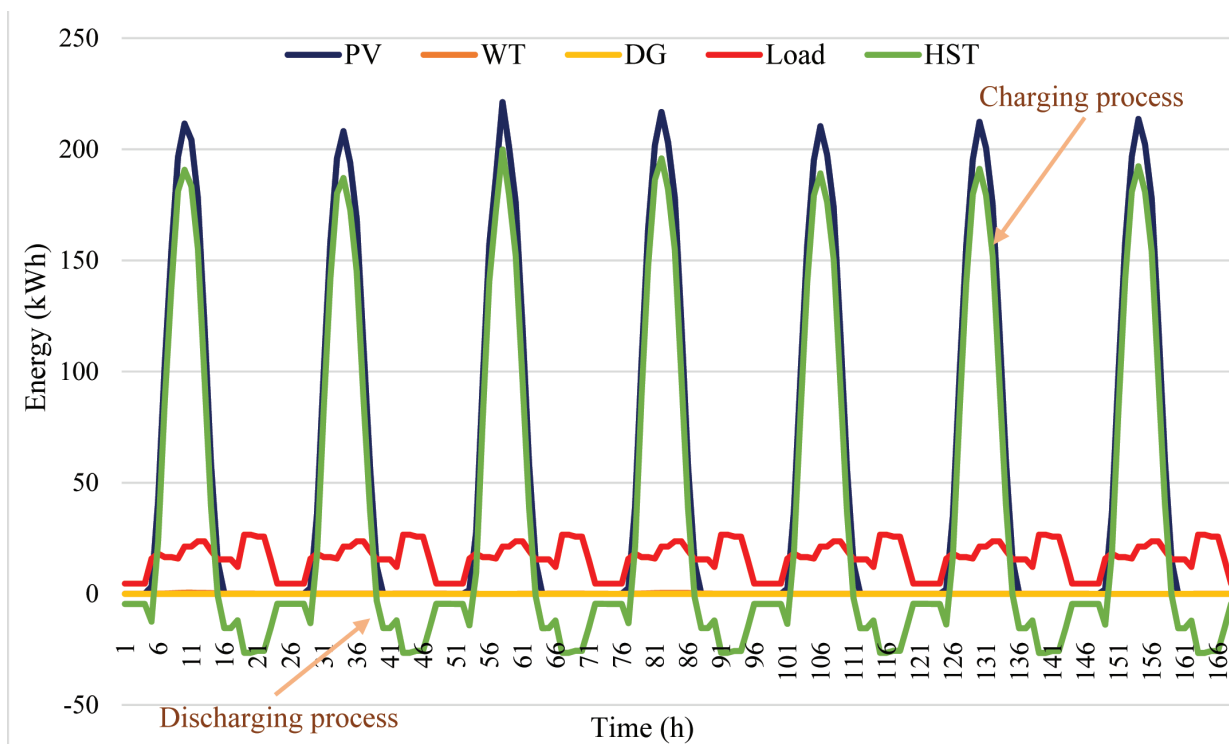


Fig. 21. PV system output through the winter season of one week in December month (Case 2)

Рис. 21. Производительность фотоэлектрической системы в течение зимнего сезона в течение одной недели в декабре месяце (пример 2)

Figure 21 demonstrates the highest annual energy production, featuring a higher ratio of installed capacity for solar PV in comparison to the installed wind turbine and diesel generator. The findings reveal that the PV systems play a pivotal role in power generation, especially from April to September, coinciding with an increase in load demand during these months. Consequently, there

is a notable reduction in monthly fuel consumption and emissions over the system's lifespan. This underscores the increased feasibility of the Hybrid Renewable Energy System (HRES) compared to relying solely on a Diesel Generator (DG), as it achieves a significant decrease in fuel consumption while still ensuring a consistent electricity supply to the load.

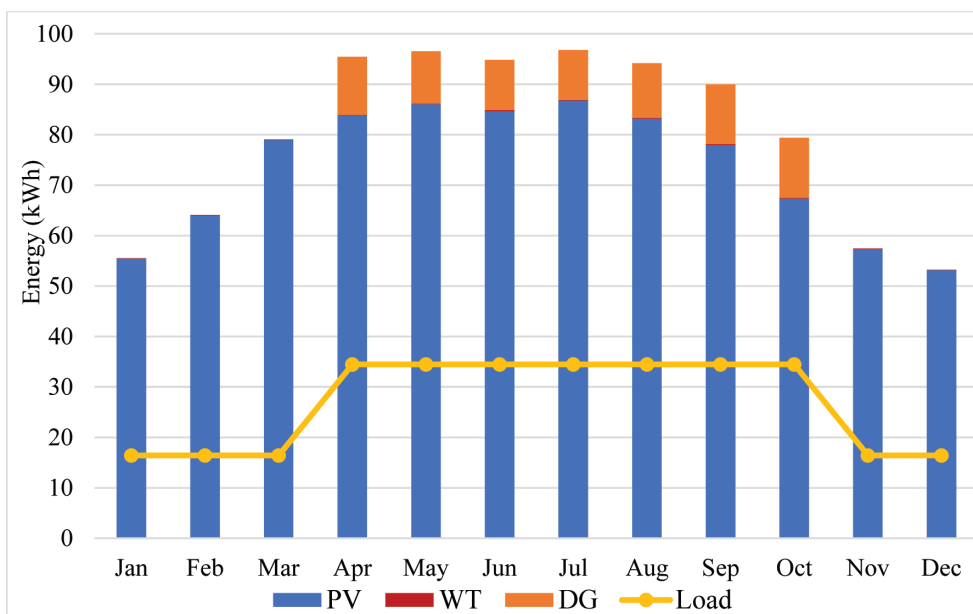


Fig. 22. Monthly average energy share of PV, WT, and DG systems using QIARO algorithm (Case 2)

Рис. 22. Среднемесячная доля энергии в фотоэлектрических, весовых и централизованных системах с использованием алгоритма QIARO (пример 2)

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

The Cost of Energy (COE) serves as a pivotal economic indicator crucial for decision-making within an exclusive economic perspective [52]. Figure 22 represents the COE of two hybrid energy generation systems. The comparison focuses on the performance of the proposed QIARO algorithm and the conventional (ARO) algorithm in achieving optimal COE values. In the first case, the QIARO algorithm attains an optimal COE value of 0,194405, showcasing its prowess in minimizing the cost of electricity production. Simultaneously, the ARO algorithm achieves a competitive COE of 0,194483. This narrow margin underscores the effectiveness of the proposed algorithm in optimizing the economic aspect of the hybrid energy generation system. In the second case, the QIARO algorithm outperforms the ARO

algorithm by achieving a COE of 0,710305 compared to ARO's 0,826489. This signifies a notable improvement in economic efficiency attributed to the proposed two search strategies based on the Generalized quadratic interpolation (GQI) approach. The 0,116 reduction in COE may seem modest, but in the realm of energy economics, even minor improvements can translate into substantial economic savings over the operational life of a hybrid energy system. Analyzing the COE for different optimal systems (as depicted in Fig. 22) provides insights into the economic viability of each algorithm's solutions. The QIARO algorithm's consistent ability to approach or achieve optimal COE values in both cases suggests its effectiveness in cost reduction and economic optimization compared to the ARO algorithm.

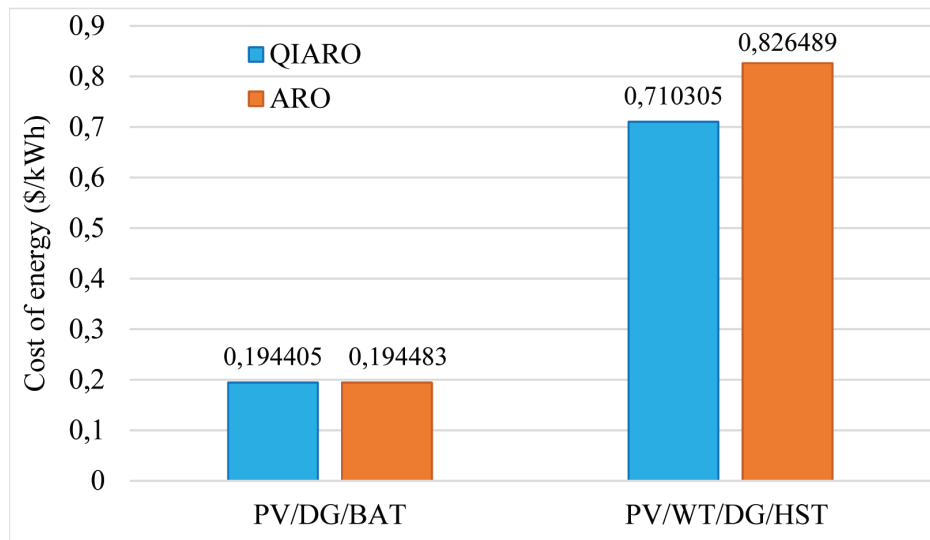


Fig. 23. Cost of electricity for different optimal systems

Рис. 23. Стоимость электроэнергии для различных оптимальных систем

### Conclusion

The article has suggested conducting a study in off-grid regions in Baris Oasis, New Valley, which were chosen as a representative case due to their high number of villages without electricity in Egypt. The study aims to design an Integrated Hybrid Renewable Energy System (IHRES) using a novel optimization algorithm called Quadratic interpolation-based artificial rabbits optimization (QIARO). The IHRES incorporates various technologies such as photovoltaic (PV) panels, wind turbines (WT), diesel generators (DG), batteries, and hydrogen storage systems (HSS). Previous studies have primarily focused on evaluating the feasibility of using a single type of energy storage technology for continuous power supply. However, this study examines two energy storage technologies, namely batteries and HSS, along with DG, to ensure uninterrupted electricity supply to the remote un-electrified villages in Baris, Egypt, which heavily rely on renewable energy (RE) sources like solar and wind. Due to the weather-dependent nature of RE resources, continuous power supply is a challenge. The study explores two IHRES configurations, PV/DG-Ni-Fe

and PV/WT/DG/HSS, and evaluates them using a cycle charging (CC) dispatch strategy and two metaheuristic techniques in MATLAB. The article starts by validating the effectiveness of the proposed QIARO algorithm through a comprehensive performance assessment and comparison with other optimization techniques. The QIARO algorithm outperforms the original ARO algorithm and several other techniques in terms of convergence speed and solution quality across seven benchmark functions. Having established the superiority of the QIARO algorithm, it is then applied to the two IHRES configurations mentioned earlier. The QIARO algorithm proves its strength in finding optimal values, including life cycle cost (LCC) and cost of energy (COE), surpassing the original ARO algorithm. The findings of this study can serve as a guide for supplying electricity to similar rural off-grid areas, contributing to socio-economic development, pollution reduction, and the creation of employment opportunities to improve the livelihoods of the local population in these regions.



## References

- [1]. Blechinger P., Cader C., Bertheau P., Huyskens H., Seguin R., Breyer C. Global analysis of the techno-economic potential of renewable energy hybrid systems on small islands. *Energy Policy* 2016; 98:674-87. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.043>.
- [2]. Nagpal D., Parajuli B. Off-grid renewable energy solutions to expand electricity access: An opportunity not to be missed. International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi 2019.
- [3]. Marocco P., Ferrero D., Gandiglio M., Ortiz M. M., Sundseth K., Lanzini A. et al. A study of the techno-economic feasibility of H<sub>2</sub>-based energy storage systems in remote areas. *Energy Convers Manag* 2020; 211:112768. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112768>.
- [4]. Kalamaras E., Belekoukia M., Lin Z., Xu B., Wang H., Xuan J. Techno-economic Assessment of a Hybrid Off-grid DC System for Combined Heat and Power Generation in Remote Islands. *Energy Procedia* 2019; 158:6315–20. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.406>.
- [5]. Koochi-Fayegh S., Rosen M. A. A review of energy storage types, applications and recent developments. *J Energy Storage* 2020; 27:101047. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101047>.
- [6]. Yang Y., Bremner S., Menictas C., Kay M. Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018; 91:109-25. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.047>.
- [7]. Kovač A., Paranos M., Marciuš D. Hydrogen in energy transition: A review. *Int J Hydrogen Energy* 2021; 46:10016-35. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.256>.
- [8]. You C., Kim J. Optimal design and global sensitivity analysis of a 100 % renewable energy sources based smart energy network for electrified and hydrogen cities. *Energy Convers Manag* 2020; 223:113252. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113252>.
- [9]. Buffo G., Marocco P., Ferrero D., Lanzini A., Santarelli M. Power-to-X and power-to-power routes. *Solar Hydrogen Production*, Elsevier; 2019, p. 529-57. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00015-1>.
- [10]. Malheiro A., Castro P. M., Lima R. M., Estanqueiro A. Integrated sizing and scheduling of wind/PV/diesel/battery isolated systems. *Renew Energy*, 2015; 83:646-57. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.066>.
- [11]. Cai W., Li X., Maleki A., Pourfayaz F., Rosen M. A., Alhuyi Nazari M. et al. Optimal sizing and location based on economic parameters for an off-grid application of a hybrid system with photovoltaic, battery and diesel technology. *Energy*, 2020; 201:117480. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117480>.
- [12]. Odou O. D. T., Bhandari R., Adamou R. Hybrid off-grid renewable power system for sustainable rural electrification in Benin. *Renew Energy*, 2020; 145:1266-79. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.032>.
- [13]. Bukar A. L., Tan C. W., Lau K. Y. Optimal sizing of an autonomous photovoltaic/wind/battery/diesel generator microgrid using grasshopper optimization algorithm. *Solar Energy*, 2019; 188:685-96. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.050>.
- [14]. Bukar A. L., Tan C. W. A review on stand-alone photovoltaic-wind energy system with fuel cell: System optimization and energy management strategy. *J Clean Prod*, 2019; 221:73-88. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.228>.
- [15]. Sinha S., Chandel S. S. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014; 32:192-205. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.035>.
- [16]. Man K. F., Tang K. S., Kwong S. Genetic algorithms: concepts and applications [in engineering design]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1996; 43:519-34. <https://doi.org/10.1109/41.538609>.
- [17]. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*, vol. 4, IEEE; 1995, p. 1942-8.
- [18]. Saremi S., Mirjalili S., Lewis A. Grasshopper Optimisation Algorithm: Theory and application. *Advances in Engineering Software*. 2017; 105:30-47. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.01.004>.
- [19]. Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*. 2014; 69:46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>.
- [20]. Alamir N., Kamel S., Hassan M. H., Abdelkader S. M. An effective quantum artificial rabbits optimizer for energy management in microgrid considering demand response. *Soft Comput*, 2023; 27:15741-68. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08814-5>.
- [21]. Wang Y., Li F., Yu H., Wang Y., Qi C., Yang J. et al. Optimal operation of microgrid with multi-energy complementary based on moth flame optimization algorithm. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2020; 42:785-806. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1587067>.
- [22]. Almashakbeh A. S., Arfoa A. A., Hrayshat E. S. Techno-economic evaluation of an off-grid hybrid PV-wind-diesel-battery system with various scenarios of system's renewable energy fraction. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 2023; 45:6162-85. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1673515>.
- [23]. Ramesh M., Saini R. P. Effect of different batteries and diesel generator on the performance of a stand-alone hybrid renewable energy system. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 2020:1-23. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1763520>.
- [24]. Upadhyay S., Sharma M. P. Selection of a suitable energy management strategy for a hybrid energy system in a remote rural area of India. *Energy*, 2016; 94:352-66. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.134>.
- [25]. Samy M. M., Barakat S., Ramadan H. S. A flower pollination optimization algorithm for an off-grid PV-Fuel cell hybrid renewable system. *Int J Hydrogen Energy*, 2019; 44:2141-52. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.127>.
- [26]. Luta D. N., Raji A. K. Optimal sizing of hybrid fuel cell-supercapacitor storage system for off-grid renew-

able applications. *Energy*, 2019; 166:530-40. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.070>.

[27]. Rajanna S., Saini R. P. Development of optimal integrated renewable energy model with battery storage for a remote Indian area. *Energy*, 2016; 111:803-17. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.005>.

[28]. Meri G., Berger C., Sauer D. U. Optimization of an off-grid hybrid PV–Wind–Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm. *Solar Energy*, 2013; 97:460-73. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.016>.

[29]. Maleki A. Design and optimization of autonomous solar-wind-reverse osmosis desalination systems coupling battery and hydrogen energy storage by an improved bee algorithm. *Desalination*, 2018; 435:221-34. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.05.034>.

[30]. Wang L., Cao Q., Zhang Z., Mirjalili S., Zhao W. Artificial rabbits optimization: A new bio-inspired meta-heuristic algorithm for solving engineering optimization problems. *Eng Appl Artif Intell*, 2022; 114:105082. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105082>.

[31]. Shouman E. R. International and national renewable energy for electricity with optimal cost effective for electricity in Egypt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 77:916-23. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.107>.

[32]. IRENA GEC. Renewable capacity statistics 2020. International Renewable Energy Agency 2020.

[33]. Salah S. I., Eltaweel M., Abeykoon C. Towards a sustainable energy future for Egypt: A systematic review of renewable energy sources, technologies, challenges, and recommendations. *Clean Eng Technol* 2022; 8:100497. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100497>.

[34]. IRENA I. R. Renewable energy outlook: Egypt. International Renewable Energy Agency Abu Dhabi, 2018.

[35]. Gamil M. M., Lotfy M. E., Hemeida A. M., Mandal P., Takahashi H., Senjyu T. Optimal sizing of a residential microgrid in Egypt under deterministic and stochastic conditions with PV/WG/Biomass Energy integration. *Aims Energy* 2021;9.

[36]. Mondal Md. A. H., Ringler C., Al-Riffai P., Eldidi H., Breisinger C., Wiebelt M. Long-term optimization of Egypt's power sector: Policy implications. *Energy*, 2019; 166:1063-73. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.158>.

[37]. Kotb K. M., Elkadeem M. R., Elmorshedy M. F., Dán A. Coordinated power management and optimized techno-enviro-economic design of an autonomous hybrid renewable microgrid: A case study in Egypt. *Energy Convers Manag*, 2020; 221:113185. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113185>.

[38]. Chauhan A., Saini R. P. Discrete harmony search based size optimization of Integrated Renewable Energy System for remote rural areas of Uttarakhand state in India. *Renew Energy* 2016; 94:587-604. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.079>.

[39]. Ghenai C., Bettayeb M. Modelling and performance analysis of a stand-alone hybrid solar PV/Fuel Cell/Diesel Generator power system for university building. *Energy*, 2019; 171:180-9. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.019>.

[40]. Razipour R., Moghaddas-Tafreshi S. -M., Far-

hadi P. Optimal management of electric vehicles in an intelligent parking lot in the presence of hydrogen storage system. *J Energy Storage*, 2019; 22:144-52. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.02.001>.

[41]. Argyrou M. C., Christodoulides P., Kalogirou S. A. Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid scale applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018; 94:804-21. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.044>.

[42]. Ogunjuigbe A. S. O., Ayodele T. R., Akinola O. A. Optimal allocation and sizing of PV/Wind/Split-diesel/Battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building. *Appl Energy*, 2016; 171:153-71. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.051>.

[43]. Patel A. M., Singal S. K. Optimal component selection of integrated renewable energy system for power generation in stand-alone applications. *Energy*, 2019; 175:481-504. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.055>.

[44]. Tu T., Rajarathnam G. P., Vassallo A. M. Optimization of a stand-alone photovoltaic–wind–diesel–battery system with multi-layered demand scheduling. *Renew Energy*, 2019; 131:333-47. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.029>.

[45]. Upadhyay S., Sharma M. P. Development of hybrid energy system with cycle charging strategy using particle swarm optimization for a remote area in India. *Renew Energy*, 2015; 77:586-98. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.051>.

[46]. Zhao W., Wang L., Zhang Z., Mirjalili S., Khodadadi N., Ge Q. Quadratic Interpolation Optimization (QIO): A new optimization algorithm based on generalized quadratic interpolation and its applications to real-world engineering problems. *Comput Methods Appl Mech Eng*. 2023; 417:116446. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116446>.

[47]. Hassan M. H., Kamel S., Alateeq A., Alassaf A., Alsaleh I. Optimal Power Flow Analysis With Renewable Energy Resource Uncertainty: A Hybrid AEO-CGO Approach. *IEEE Access*, 2023; 11:122926-61. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3328958>.

[48]. Zhong C., Li G., Meng Z. Beluga whale optimization: A novel nature-inspired metaheuristic algorithm. *Knowl Based Syst*. 2022; 251:109215. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.109215>.

[49]. Trojovský P., Dehghani M. Pelican Optimization Algorithm: A Novel Nature-Inspired Algorithm for Engineering Applications. *Sensors*. 2022; 22:855. <https://doi.org/10.3390/s22030855>.

[50]. Ahmadianfar I., Heidari A. A., Noshadian S., Chen H., Gandomi A. H. INFO: An efficient optimization algorithm based on weighted mean of vectors. *Expert Syst Appl*. 2022; 195:116516.

[51]. Ahmadianfar I., Heidari A. A., Gandomi A. H., Chu X., Chen H. RUN beyond the metaphor: An efficient optimization algorithm based on Runge Kutta method. *Expert Syst Appl*. 2021; 181:115079.

[52]. Odoi-Yorke F., Woenagnon A. Techno-economic assessment of solar PV/fuel cell hybrid power system for telecom base stations in Ghana. *Cogent Eng*. 2021; 8. <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1911285>.





ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ, СИСТЕМЫ,  
МАТЕРИАЛЫ И ПРИБОРЫ

ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES, SYSTEMS,  
MATERIALS, AND INSTRUMENTS

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ

ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES

Статья поступила в редакцию 06.03.24 Ред. Рег. № 309-003-24

The article has entered in publishing office 06.03.24 Ed. Reg. No. 309-003-24

УДК 621.314.1

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО СОПРЯЖЕНИЯ ЭНЕРГОСЕТИ С ЭЛЕКТРОЛИЗЕРАМИ И ВОДОРОДНЫМИ ТОПЛИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ ПАРИРОВАНИЯ ПРОВАЛЬНОГО ПЕРИОДА

*Кучак С. В.<sup>1</sup>, Штейн Д. А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия.

e-mail: kuchak.2012@corp.nstu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.168-176

Заключение совета рецензентов: 18.03.24

Заключение совета экспертов: 21.03.24

Принято к публикации: 30.03.24

В работе представлены результаты анализа параметров последовательного резонансного преобразователя с фиксирующими диодами CSRC. Условия работы преобразователя подразумевают широкий диапазон изменения входного напряжения и мощности нагрузки. Предложена система управления на основе частотно-импульсного регулирования. Задание частоты производится на основе входного напряжения, выходного тока и параметров преобразователя. Применимость способа управления проверена моделированием. Рассмотрены режимы пуска на максимальную мощность при минимальном входном напряжении. Полученные результаты соответствуют техническому заданию.

**Ключевые слова:** водород, водородные топливные элементы, водородный электролизер, резонансный преобразователь, широкий диапазон входного напряжения, система управления, имитационная модель, резкие изменения нагрузки.

*Кучак С. В., Штейн Д. А.. Разработка системы управления для оптимального сопряжения энергосети с электролизерами и водородными топливными элементами для парирования провального периода // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 03(420) 2024, с. 168-176*

*Kuchak S. V., Shtein D. A. Development of a control system for optimal interfacing of the power grid with electrolyzers and hydrogen fuel cells to parry the down period // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 03(420) 2024, pp. 168-176*





# DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM FOR OPTIMAL INTERFACING OF THE POWER GRID WITH ELECTROLYZERS AND HYDROGEN FUEL CELLS TO PARRY THE DOWN PERIOD

*Kuchak S. V.<sup>1</sup>, Shtein D. A.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.  
e-mail: kuchak.2012@corp.nstu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.03.168-176

Referred: 18.03.24

Received in revised form: 21.03.24

Accepted: 30.03.24

The paper presents the results of an analysis of the parameters of a series resonant converter with clamping diodes CSRC. The operating conditions of the converter imply a wide range of changes in input voltage and load power. A control system based on pulse-frequency regulation is proposed. The frequency is set based on the input voltage, output current and converter parameters. The applicability of the control method has been verified by simulation. Starting modes at maximum power and minimum input voltage are considered. The results obtained correspond to the technical specifications.

**Keywords:** hydrogen, hydrogen fuel cells, hydrogen electrolyzer, resonant converter; wide input voltage range, control system, simulation model, sudden load changes.



Кучак  
Сергей Викторович  
Sergey V. Kuchak

#### Сведения об авторе:

**Место работы:** ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», доцент кафедры электроники и электротехники.

**Образование:** Новосибирский государственный технический университет.

**Ученая степень:** кандидат технических наук.

**Область научных интересов:** разработка и исследование автономных источников питания.

**Публикации:** более 29 научных трудов, в том числе 2 изобретений. Индекс Хирша РИНЦ 4.

#### Author information:

**Place of employment:** Novosibirsk State Technical University, assistant professor of Electronics and Electrical Engineering Department.

**Education:** Novosibirsk State Technical University.

**Academic degree:** Candidate of Technical Sciences.

**Scientific interests area:** development and investigation of autonomic power supply devices.

**Publications:** more than 29 scientific works, including 2 inventions. RSCI Hirsch index 4.



Штейн  
Дмитрий  
Александрович  
Dmitry A. Shtein

#### Сведения об авторе:

**Место работы:** ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», заместитель директора Института силовой электроники НГТУ.

**Образование:** Новосибирский государственный технический университет.

**Награды и научные премии:** лауреат государственной премии Новосибирской области.

**Область научных интересов:** многоуровневые силовые преобразователи, системы автономного электроснабжения, цифровые системы управления.

**Публикации:** более 58 научных трудов, в том числе 4 изобретения. Индекс Хирша РИНЦ 4.

#### Author information:

**Place of employment:** Novosibirsk State Technical University, vice-director of Institute of Power Electronic.

**Education:** Novosibirsk State Technical University.

**Awards and scientific prizes:** laureate of the state prize of the Novosibirsk region.

**Scientific interests area:** multi-level power converters, autonomous power supply systems, digital control systems.

**Publications:** more than 58 scientific works, including 4 inventions. RSCI Hirsch index 4.

## Введение

Среди широкого перечня различных типов *DC/DC*-преобразователей особое место занимают резонансные преобразователи. Достоинствами данных схем являются возможность повышения частоты коммутации, синусоидальная форма протекающего в цепи тока и, как следствие, способность к реализации мягкой коммутации [1-7]. Положительные характеристики позволяют уменьшить массу и габариты применяемых компонентов, а также снизить потери мощности в преобразователе. Данные свойства позволяют применять их в таких сферах, как аэрокосмическая и автомобильная промышленность, где вопросы энергоэффективности и массогабаритных показателей стоят достаточно остро.

В системах, где основным источником служат водородные топливные элементы, аккумуляторные батареи или фотовольтаические панели, важным аспектом является широкий диапазон входных напряжений [8-19]. При условии, что выходное напряжение требуется поддерживать на постоянном уровне, задача преобразования напряжения с таких источников требует эффективного решения. Для решения данной задачи существует ряд схем резонансных преобразователей [20-26]. Например, в [23] рассмотрена мостовая реализация классического резонансного *LLC*-преобразователя и его система управления. Проект

предназначен для поддержания стабильного напряжения на выходе фотовольтаической системы. В работе [24] рассмотрена аналогичная структура. Отличие состоит в том, что на вторичной стороне трансформатора расположено не 2, а 4 обмотки. Дополнительная пара обмоток коммутируется для обеспечения высокого коэффициента усиления по напряжению при низком входном напряжении, а также продления времени удержания при отключении питания переменного тока. В статье [25] представлен преобразователь, на первичной стороне которого последовательное соединение двух полумостовых схем и соответствующая система управления. Особое подключение ключей приводит к снижению коммутационного напряжения до половины входного напряжения.

Рассматриваемый последовательный резонансный преобразователь с фиксирующими диодами (*Clamped Series Resonant Converter*, далее *CSRC*) – преобразователь (см. рис. 1), в основу которого также заложен принцип резонансного преобразователя с резонансной частотой, равной:

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{L_r \cdot C_r}} \quad (1)$$

где  $L_r$  и  $C_r$  – индуктивность и ёмкость резонансного контура соответственно.

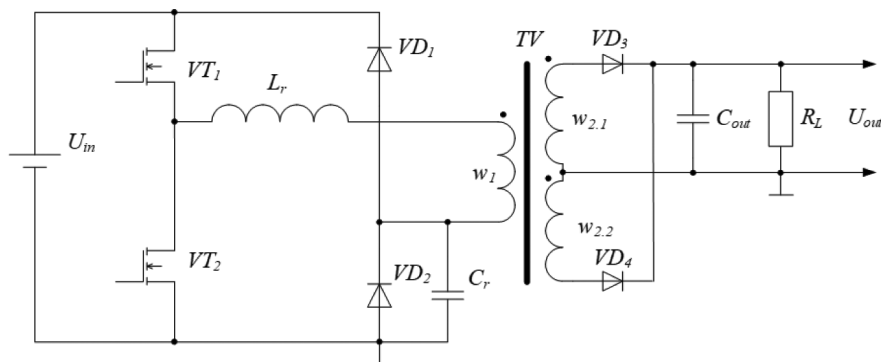


Рис. 1. Принципиальная схема *CSRC*

Fig. 1. *CSRC* circuit

Отличительной особенностью преобразователя являются [28]:

- встроенная защита от короткого замыкания индуктивности  $L_r$ ;
- принудительное перемагничивание сердечника из-за двухтранзисторной конфигурации;
- напряжения резонансной емкости  $C_r$ , ограниченного  $U_m$  и землей;
- отсутствие протекания тока через встроенные диоды транзисторов.

Ряд работ посвящен разработке данного преобразователя и способов управления им. Так,

например, в работе [29] представлены основные этапы разработки данного преобразователя, но не представлен способ управления. В работе [30] рассматривается передаточная функция преобразователя, в которой в качестве сигнала обратной связи принимается выходное напряжение. ПИ-регулятор используется в качестве регулятора. В работе показано, что при изменении нагрузки на 10 % от номинального значения возникают колебания выходного напряжения, вызванные инерционностью ПИ-регулятора. В связи с этим целью данной работы является разработка способа управления

CSRC, обеспечивающего с высокой точностью поддержание стабильного выходного напряжения

при существенных изменениях выходной мощности и входного напряжения.

<b>Таблица сокращений</b>	
<i>Аббревиатуры</i>	
ПИ	пропорционально-интегральный
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
AND	Логическое умножение
$C_r$	Емкость резонансного контура
Comp1 Comp2 Comp3 Comp4	Блоки компараторов
$C_{out}$	Емкость выходного фильтра
CSRC	Clamped Series Resonant Converter, последовательный резонансный преобразователь с фиксирующими диодами
DC/DC	Преобразование постоянного тока в постоянный ток
$D$	Коэффициент заполнения
$f(u)$	Блок задания математической функции
$f_r$	Резонансная частота преобразователя
$f_s$	Текущая частота коммутации транзисторов
$I_{in}$	Ток входного источника
IS	Идеальный ключ
IR1, IR2	Блоки сбрасываемых интеграторов
$K_f$	Коэффициент задания частоты коммутации
LLC	Две индуктивности и одна емкость
$L_r$	Индуктивность резонансного контура
$n$	Коэффициент преобразования трансформатора
NOT	Логическая инверсия
$n_{w1/w2,1'} n_{w1/w2,2}$	Коэффициенты преобразования между первичной и вторичными обмотками соответственно
$P_{out}$	Мощность на выходе преобразователя
$R_L$	Сопротивление нагрузки
RL1	Базовая нагрузка при моделировании преобразователя
RL2	Коммутируемая нагрузка при моделировании преобразователя

$T_{0'} T_{1'} T_{2'}$	Условное время начала, середины и конца периода работы преобразователя соответственно
$t_{Cr0}$	Момент времени относительно начала периода, при котором напряжение на ёмкости резонансного контура достигает величины напряжения входного источника
$t_{DT}$	«Мертвое» время
$t_{Lr0}$	Момент времени относительно начала периода, при котором ток индуктивности резонансного контура снижается до нуля
$t_S$	Момент коммутации нагрузки при моделировании преобразователя
Sat	Блок ограничения
$t_f$	Время фронта нарастания напряжения в выходной цепи
TV	Трехобмоточный трансформатор
$U_{in}$	Напряжение входного источника
$U_{w2,1'} U_{w2,2}$	Напряжение на вторичных обмотках трансформатора
$U_{out}$	Выходное напряжение преобразователя
$VD_{1'} VD_{2'}$ $VD_{3'} VD_{4'}$	Диоды
$V_m$	Блок задания максимального коэффициента заполнения
$VT_{1'} VT_{2'}$	Транзисторы
$w_1$	Первичная обмотка трансформатора
$w_{2,1'} w_{2,2}$	Вторичные обмотки трансформатора
$Z_r$	Характеристическое сопротивление резонансного контура
<i>Greek letters</i>	
$\Delta I_{out}$	Пульсации тока нагрузки
$\Delta U_{out}$	Размах пульсаций выходного напряжения
$\pi$	Математическая постоянная, равная отношению длины окружности к её диаметру ( $\pi \approx 3,1415926536\dots$ )
$\tau_{out}$	Постоянная времени выходного звена
$\omega_r$	Циклическая резонансная частота
<i>Индексы нижние</i>	
av	Среднее значение
max	Максимальное значение
min	Минимальное значение



## Теория

Процесс заряда ёмкости начинается в момент коммутации транзистора  $VT_1$  и завершается в момент достижения напряжения на ёмкости величины, равной напряжению на источнике питания  $U_{in}$ . По окончании заряда ёмкости, под действием энергии, накопленной в индуктивности, открывается диод  $VD_1$ , и формируется ток, протекающий по контуру  $L_r - w_1 - VD_1 - VT_1 - L_r$ . Скорость снижения тока в индуктивности пропорциональна напряжению на вторичной стороне трансформатора и коэффициенту трансформации, а также обратно пропорциональна

величине самой индуктивности.

При коммутации транзистора  $VT_2$  происходит аналогичный процесс, но противоположный по полярности тока индуктивности и ёмкости: разряд конденсатора  $C_r$  до нулевого напряжения, накопление энергии в индуктивности  $L_r$ , открытие диода  $VD_2$ , разряд индуктивности по контуру  $L_r - VT_2 - VD_2 - w_1 - L_r$ .

Принцип работы схемы отражен на временных диаграммах рис. 2.

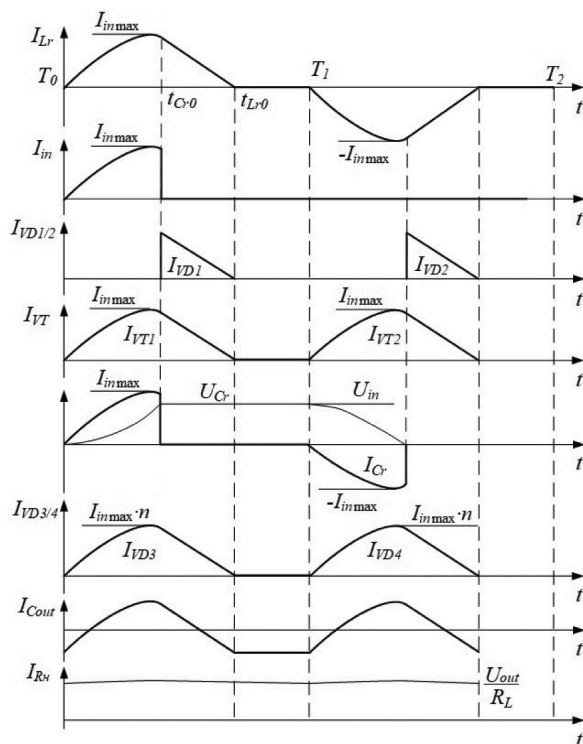


Рис. 2. Теоретические временные диаграммы работы CSRC

Fig. 2. Theoretical timing diagrams of CSRC operation

Для регулирования выходного тока необходимо изменять длительность бестоковой паузы между промежутками  $(T_0; t_{Lr0})$  и  $(T_1; T_2)$ , а именно разнести по времени моменты включения транзисторов  $VT_1$  и  $VT_2$ . Таким образом, соответствующим способом управления будет частотно-импульсное регулирование: при неизменной длительности импульса открытия транзисторов изменять частоту подачи импульсов.

Анализ рабочих соотношений схемы показал, что коэффициент задания частоты коммутации относительно максимального значения зависит от величины напряжения на входе  $U_{in}$  и тока на выходе  $I_{out}$  согласно следующему выражению:

$$K_f(U_{in}, I_{out}) = \frac{2}{I_{out}} \cdot \frac{n \cdot D_{max} \cdot U_{in}}{2\pi \cdot Z_r} \cdot \frac{U_{in}}{U_{inmin}} \quad (2)$$

где  $K_f = \frac{f_{Smax}}{f_S}$  – коэффициент задания частоты коммутации;  
 $f_S$  – текущая частота коммутации;  
 $n$  – коэффициент преобразования трансформатора;  
 $D_{max} = \frac{f_{Smax}}{f_r}$  – коэффициент заполнения;  
 $f_r$  – резонансная частота контура;  
 $Z_r$  – характеристическое сопротивление резонансного контура;  
 $U_{inmin}$  – минимальное напряжения на входе.

## Экспериментальная часть Описание модели

Для подтверждения применимости выражения (2) для управления преобразователем, в среде *Matlab Simulink* проведено моделирование рассматриваемой схемы и соответствующей системы управления. На рис. 3 представлена модель силовой части *CSRC*. В качестве входного источника рассматривается регулируемый источник напряжения  $U_{in}$ . В качестве нагрузки рассматривается переменная нагрузка: базовая нагрузка  $RL1$  и нагрузка  $RL2$ , коммутируемая идеальным ключом  $IS$  в момент времени  $tS$ . Параметры

элементов соответствуют расчетным значениям и принятым ранее допущениям.

На рис. 4 представлена модель системы управления *CSRC*. В качестве сигналов обратной связи от силового преобразователя в систему управления поступает входное напряжение  $U_{in}$  и ток нагрузки  $I_{out}$ . Блок  $f(u)$  осуществляет вычисление текущего значения частоты путем деления максимальной частоты коммутации на выражение (5).

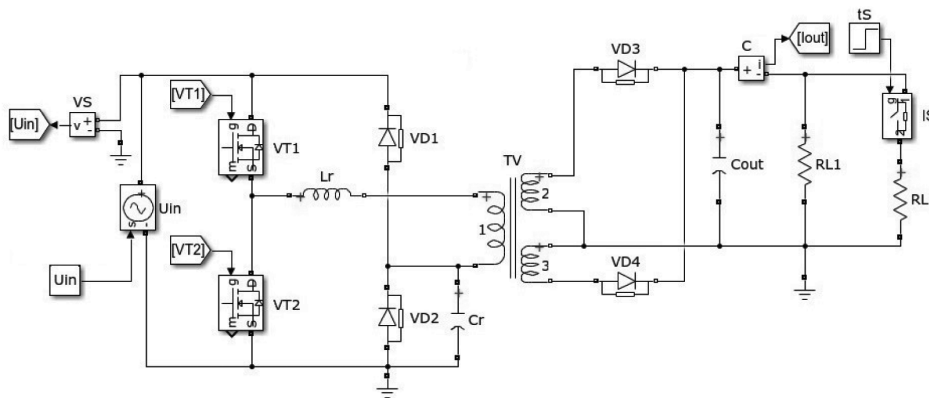


Рис. 3. Модель силовой схемы

Fig. 3. Model of the power circuit

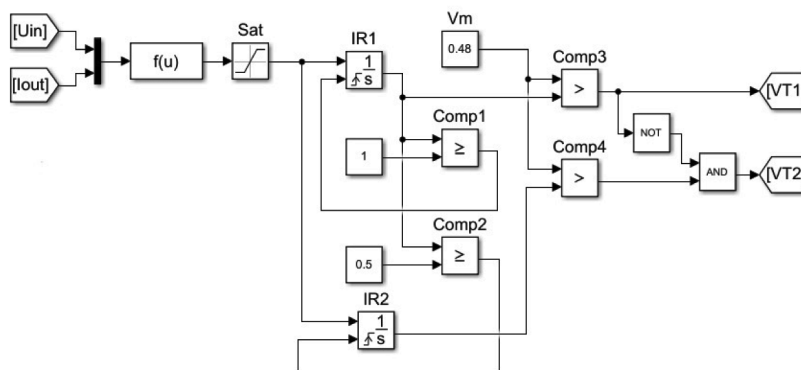


Рис. 4. Модель системы управления

Fig. 4. Model of the control system

Стоит отметить, что при постоянстве большинства параметров, входящих в выражение, формула сводится к двум умножениям и одному делению. Блок ограничения *Sat* необходим для задания начального значения частоты в области нижних частот и исключения выхода схемы из режима мягкой коммутации в области высших частот.

Блоки сбрасываемых интеграторов *IR1* и *IR2* формируют линейно нарастающий сигнал с заданной скоростью нарастания. Сброс блока *IR1* производится блоком *Comp1* в момент перехода его выходного

сигнала через 1,00. Таким образом, формируется пилообразный сигнал с диапазоном выходных сигналов [0; 1]. Для задания второго пилообразного сигнала, смещенного на половину периода, сброс блока *IR2* производится блоком *Comp2* в момент перехода выходного сигнала блока *IR1* через 0,50. Для упрощения системы управления, длительность открытого состояния каждого транзистора однозначно задается блоком *Vm* пропорционально максимальному коэффициенту заполнения  $D_{max}$  и компараторами *Comp3* и *Comp4*. Для исключения одновременного



включения транзисторов на первом периоде после включения, в цепь управления транзистором  $VT2$  введена цепь логических элементов  $NOT$  и  $AND$ .

Выходные сигналы  $VT1$  и  $VT2$  подаются на затворы соответствующих транзисторов.

### Условия эксперимента

Исходные данные для расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Table 1

Initial data for calculation

Параметр	Символ	Значение
Напряжение источника питания, В	$U_{in}$	от 56 до 96
Среднее значение выходного напряжения, В	$U_{out}$	$100 \pm 1$
Размах пульсаций выходного напряжения, В	$\Delta U_{out}$	0,5
Максимальная мощность нагрузки, Вт	$P_{out\ max}$	700
Максимальная частота коммутации, кГц	$f_{S\ max}$	500
Максимальный коэффициент заполнения	$D_{max}$	0,98

В ходе эксперимента рассматривается пуск преобразователя в наиболее высокочастотном режиме: входное напряжение  $U_{in} = 56$  В, выходная мощность

$P_{out} = P_{out\ max} = 700$  Вт (сопротивление нагрузки  $R_L = RL1 // RL2$ ).

### Результаты моделирования

На рисунке 5 представлены результаты моделирования: на левой части рисунка представлен весь переходный процесс пуска, а на правой части – де-

тальное представление измеренных величин в установившемся режиме.

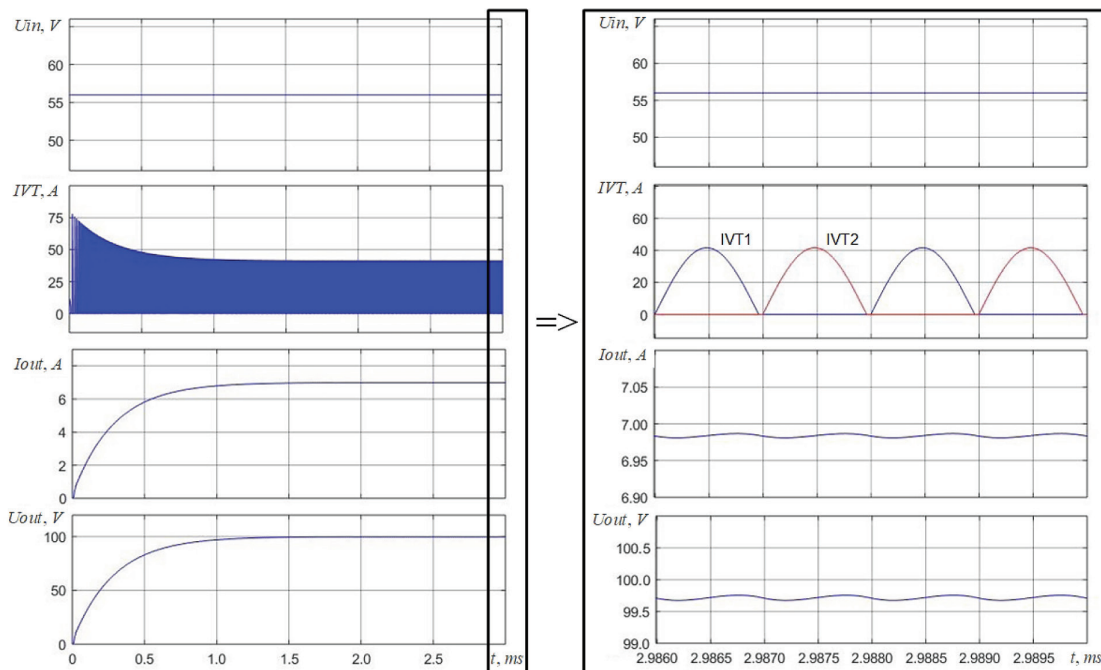


Рис. 5. Временные диаграммы пуска преобразователя.

$U_{in}$  – входное напряжение,  $I_{out}$  – ток нагрузки,  $IVT$  – ток транзистора VT,  $U_{out}$  – выходное напряжение

Fig. 5. Converter start-up timing diagrams.

$U_{in}$  – input voltage,  $I_{out}$  – load current,  $IVT$  – current of transistor VT,  $U_{out}$  – output voltage

Время фронта нарастания выходного напряжения составило 628,4 мкс. Для сравнения, постоянная времени выходного звена  $\tau_{out} = C_{out} \cdot R_L = 285,6$  мкс, а время фронта  $t_f = 2 \cdot \tau_{out} = 628,3$  мкс. Таким образом, время выхода преобразователя на рабочий режим зависит только от постоянной времени выходной цепи. При этом, за счет настраиваемого значения частоты коммутации, сохраняется режим мягкой коммутации для каждого из транзисторов при всех

уровнях выходного напряжения.

В Таблице 2 представлены результаты анализа численных значений. Из результатов видно, что требования технического задания по величине пульсаций и уровню выходного напряжения удовлетворены. Частота коммутации с пренебрежимо малой погрешностью соответствует максимально допустимому значению.

Таблица 2

Параметры работы схемы в установившемся режиме

Table 2

Parameters of circuit operation in in steady state

Параметр	Значение
Частота коммутации, $f_s$ , кГц	499,966
Пульсации тока нагрузки, $\Delta I_{out}$ , А	0,003
Среднее значение тока нагрузки, $I_{outav}$ , А	6,985
Пульсации выходного напряжения, $\Delta U_{out}$ , В	0,041
Среднее значение выходного напряжения, $U_{outav}$ , В	99,74

### Заключение

В работе рассмотрен последовательный резонансный преобразователь с фиксирующими диодами, применяемый при широком диапазоне входных напряжений. Представлены основные рабочие соотношения, на основе которых получено значение коэффициента задания частоты коммутации для системы частотно-импульсного управления. Предложен способ управления, отличающийся высокой точностью поддержания выходного напряжения при апериодическом переходном процессе пуска преобразователя. В качестве сигналов обратной связи служат входное напряжение и выходной ток. Рассмотрены режимы пуска преобразователя на максимальную нагрузку при

минимальном напряжении входного источника.

Проверка работоспособности разработанной системы управления проведена моделированием. Результаты показали погрешность в поддержании среднего значения напряжения не более 0,26 %, величина пульсаций соответствует требуемой, режим мягкой коммутации ключей соблюден. Дальнейшим развитием системы управления является исследование динамических характеристик источника питания, а также введение обратной связи по выходному напряжению, что является необходимым при разбросе параметров преобразователя, в частности, температурном дрейфе и старении элементов резонансной цепи.

### Список литературы

[1]. D. Concha, H. Renaudineau, M. S. Hernández, A. M. Llor, S. Kouro. «Evaluation of DCX converters for off-grid photovoltaic-based green hydrogen production». International Journal of Hydrogen Energy, Volume 46, Issue 38, 2021, pp. 19861-19870.

[2]. G. Spiazzi. «Analysis and design of the soft-switched clamped-resonant interleaved boost converter» in CPSS Transactions on Power Electronics and Applications. – Vol. 4, no. 4, pp. 276-287.

[3]. I. Voronin, P. Voronin and O. Osipov. «The Efficiency Analysis of Resonant Circuits in High-Power Converters of Electrical Energy with Soft Switching Mode». 2021 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED), Moscow, Russia, 2021, pp. 1-6.

[4]. Q. Duan, G. Sha, C. Zhao and C. Ma. «Soft-Switching Analysis of Isolated Bidirectional LC Series Resonant DC-DC Converter with Phase-Shift Con-

trol». 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, China, 2018, pp. 1-9.

[5]. E. Chu, X. Hou and H. Zhang. «A Novel Soft Switching Converter with Active Auxiliary Resonant Commutation» in Chinese Journal of Electronics, vol. 21, no. 4, pp. 751-755, October 2012.

[6]. Y. Dong-Ying, K. Shih-Hao, S. Yong-Long, C. Huang-Jen, L. Kuo-Chi and Y. Ta-Yung. «An Improved 48-to-12V Series-Parallel Resonant Switched-Capacitor Converter for Data Center Applications» 2021 IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEC), Taipei, Taiwan, 2021, pp. 1-6.

[7]. X. Li, H. Hu, L. Guo and R. Zou. «A Matrix-Converter-Based Single-Stage AC-DC Converter with a LLC Resonant Tank to Realize Soft Switching». 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia), Nan-



jing, China, 2020, pp. 1555-1559.

[8]. S. Khan, A. Chub and D. Vinnikov. «An Overview of Wide-Voltage Range Isolated DC-DC Converters», 2023 IEEE 64th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 2023, pp. 1-6.

[9]. S. Pourjafar, P. Mohseni, O. Matiushkin, O. Husev and D. Vinnikov. «Novel Isolated High Step-up DC-DC Converter with Wide Input Voltage Regulation Range». 2023 IEEE 64th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 2023, pp. 1-6.

[10]. K. V. Anandkrishnan, S. S. Kumar, A. T. T and J. P. «High Gain Converter Based Fuel Cell-Battery System for Electric Vehicles and Residential Applications». 2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2022, pp. 1-6

[11]. A. Rajabi, M. G. Marangalu, A. Rajaei, F. M. Shahir, M. R. Islam and R. Shah. «Implementation and Efficiency Calculation of Fuel-Cell Vehicles Using a Bidirectional DC/DC Converter with ZVS». 2022 IEEE 1st Industrial Electronics Society Annual On-Line Conference (ONCON), kharagpur, India, 2022, pp. 1-5

[12]. S. Chaudhary and Y. K. Chauhan. «Studies and performance investigations on fuel cells». 2014 International Conference on Advances in Engineering & Technology Research (ICAETR – 2014), Unnao, India, 2014, pp. 1-6.

[13]. Xiangwan Liu, Yang Yang, Lingxian Zhang, Shenpei Zhou, Lamei Xu, Changjun Xie, Bo Zhao, Leiqi Zhang. «Uncertainty assessment of a semi-empirical output voltage model for proton exchange membrane fuel cells». International Journal of Hydrogen Energy. – Vol.48, Issue 29, 2023, pp. 11071-11085.

[14]. H. Liu, L. Xu, Z. Hu, J. Li, H. Jiang and M. Ouyang. «Experimental Study and Performance Analysis on High Power Fuel Cell System». IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, 2020, pp. 2031-2035

[15]. S. V. Kuchak, A. N. Voroshilov and E. A. Chudinov. «Discharge characteristics of lithium-ion accumulators under different currents». 2017 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, Russia, 2017, pp. 435-438.

[16]. S. Ananda, N. Lakshminarasamma, V. Radhakrishna, M. S. Srinivasan, P. Satyanarayana and M. Sankaran. «Generic Lithium ion battery model for energy balance estimation in spacecraft». 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Chennai, India, 2018, pp. 1-5.

[17]. W. Roshen. «Load Independent, Enhanced Power Extraction from a Solar Cell: Modifying the Output Characteristics of a Solar Cell Externally». 2023 Middle East and North Africa Solar Conference (MENA-SC), Dubai, United Arab Emirates, 2023, pp. 1-3

[18]. T. Nakamura, L. Zhu, M. Yoshita, M. Imaizumi, H. Akiyama and Y. Okada. «Quantitative loss analysis of voltage output characteristics on multi-junction solar cells». 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference

of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC), Waikoloa, HI, USA, 2018, pp. 0921-0926

[19]. M. S. Khesbak and A. A. Ibraheem. «Design and Simulation of a Solar Power System Oriented for Mobile Base Station Sites». 2021 IEEE International Conference in Power Engineering Application (ICPEA), Malaysia, 2021, pp. 18-23.

[20]. X. Sun, X. Li, Y. Shen, B. Wang, and X. Guo. «Dual-Bridge LLC Resonant Converter with Fixed-Frequency PWM Control for Wide Input Applications». IEEE Trans. Power Electron. – Vol. 32, no. 1, pp. 69–80, 2017.

[21]. W. Sun, Y. Xing, H. Wu, and J. Ding. «Modified High-Efficiency LLC Converters with Two Split Resonant Branches for Wide Input-Voltage Range Applications». IEEE Trans. Power Electron. – Vol. 33, no. 9, pp. 7867-7879, 2018.

[22]. Y. Chen, H. Wang, Y. F. Liu, J. Afsharian, and Z. A. Yang. «Efficiency-wise optimal design methodology of LCLC converter for wide input voltage range applications». ECCE 2016 – IEEE Energy Convers. Congr. Expo. Proc., pp. 1-8, 2016.

[23]. Z. Liang, R. Guo, G. Wang, and A. Huang. «A new wide input range high efficiency photovoltaic inverter». 2010 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2010. – Proc., pp. 2937-2943, 2010.

[24]. B. R. Lin, J. J. Dai, and Y. K. Du. «Analysis of a new resonant converter with auxiliary windings to extend input voltage range». Proc. 2nd Int. Conf. Intell. Green Build. Smart Grid, IGBSG 2016, pp. 1-6, 2016.

[25]. S. M. S. I. Shakib and S. Mekhilef. «A Frequency Adaptive Phase Shift Modulation Control Based LLC Series Resonant Converter for Wide Input Voltage Applications». IEEE Trans. Power Electron. – Vol. 32, no. 11, pp. 8360-8370, 2017.

[26]. W. Sun, H. Wu, H. Hu, and Y. Xing. «Modified LLC resonant converter with secondary paralleled bidirectional switch for applications with hold-up time requirement». IET Power Electron. – Vol. 10, no. 3, pp. 398-404, 2017.

[27]. K. H. Yoon, Y. J. Noh, S. Phum, S. Meas, S. H. Jang, and E. S. Kim. «LLC resonant converter with wide input voltage and load range at fixed switching frequency». – Conf. Proc. – IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. – APEC, pp. 1338-1342, 2012.

[28]. D. Temkin, U. Carlsson, G. Dakermanji. «Development of a multiple output resonant converter for space applications». APEC'88 Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2/New Orleans, LA, USA, 1988, pp. 167-181.

[29]. R. Ramabhadran, X. She, Y. Levy, J. Glaser, R. Raju and R. Datta. «Universal AC input high density power adapter design with a Clamped Series Resonant Converter». 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, Canada, 2015, pp. 5857-5864.

[30]. M. A. Khoroshev, D. V. Makarov, A. G. Volkov and I. V. Zaev. «Analysis of dynamic properties of resonant converter in a power supply system of autonomous object». 2017 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, Russia, 2017, pp. 487-490.

## В России создадут первую в мире газотурбинную установку на метано-водородном топливе

Самарский университет совместно с компанией «Силловые 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 получают 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 слаборывных. 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.



## Uponor поддерживает тренд на модульное строительство

# Uponor

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 представляется 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](mailto:uponor@pr-consulta.ru)



**Водородная энергетика – от стратегических концепций к коммерческим проектам | АТОМЭКСПО-2024**

**25 марта в г. Сочи на площадке Международного форума «Атомэкспо-2024» прошел круглый стол «Водородная энергетика – от стратегических концепций к коммерческим проектам».**

Председатель Комитета Государственной Думы по энергетике, Павел Завальный, в своем выступлении на круглом столе заявил, что развитие водородной энергетики является стратегически важным для подтверждения статуса России как энергетической сверхдержавы, наших позиций на мировых энергетических рынках.

Водородная энергетика, как отрасль, находится на этапе своего становления. Необходимость ее раз-

вития во многом связана с климатической повесткой. Большинство стран, принявших стратегические документы по развитию водородной энергетике, объявили о необходимости государственной поддержки производства водорода в качестве «низкоуглеродного» энергоносителя. ЕС, Индия, КНР и другие напрямую связывают цели по снижению уровня выбросов парниковых газов с развитием водородных технологий, отводя водороду значительную роль, в том числе, в качестве накопителя энергии в программах развития ВИЭ.

*atomic-energy.ru*

**Поезд FLIRT H2, работающий на водороде, продержался на полном баке почти два дня, побив мировой рекорд автономности**

Поезд швейцарской компании Stadler Rail, работающий на водороде, недавно побил рекорд дальности поездки во время испытаний в Колорадо (США). Хотя модель рассчитана на 460 км на одном баке во-

дорода, во время испытаний ей удалось преодолеть еще 2340 км. Настоящий технический успех.

*atomic-energy.ru*

**РФЯЦ-ВНИИТФ принял участие в форуме «Атомэкспо-2024»**



*Сотрудники РФЯЦ-ВНИИТФ принимают участие в форуме «АТОМЭКСПО» – главном событии мировой атомной отрасли*

Специалисты отдела продвижения продукции ядерного центра представляют на выставочной площадке макет комплекса РФЯЦ-ВНИИТФ для решения задач по обеспечению безопасности на объектах водородной энергетике.

В деловой программе форума принимает участие заместитель директора ВЭИ, Евгений Милкин. Он выступает в качестве эксперта на пленарной сессии по теме «Независимая электротехника: международный опыт и перспективы создания технологической инфраструктуры».

Сотрудница НИИК Мария Семёнова приглашена, как амбассадор фонда «Объединение женщин атомной отрасли», и присоединилась к сессии «Женское лидерство в развитии высоких технологий и инноваций».

*atomic-energy.ru*

## Инвесторам в Российскую водородную энергетику создадут налоговые стимулы



Правительство РФ ведет работу по внесению корректив в законодательства, включая создание налоговых стимулов для инвесторов в Российскую водородную энергетику и системы накопления энергии. Речь об этом шла на совещании по реализации

высокотехнологичных направлений по развитию водородной энергетики, которое провел вице-премьер РФ Александр Новак, сообщает пресс-служба кабмина.

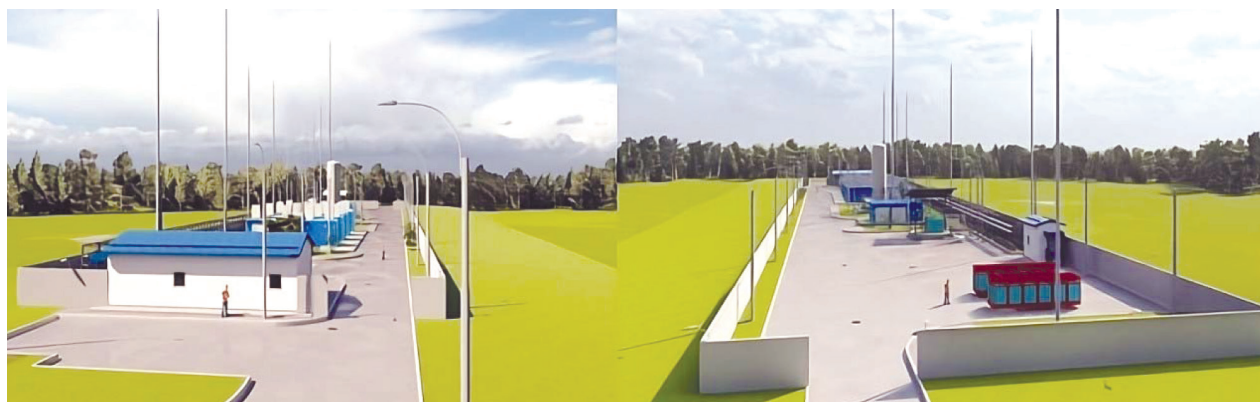
Кроме того, активно идет создание отечественного электролизера и ведется работа по укреплению кадрового потенциала отрасли.

В ходе совещания вице-премьеру доложили о результатах реализации в 2023 году «дорожных карт» по развитию отечественных технологий производства, хранения и транспортировки водорода, а также по созданию производств литиево-ионных аккумуляторов и других современных систем накопления энергии в различных регионах страны.

Александр Новак поручил подготовить предложения по дальнейшей доработке «дорожных карт» по развитию водородной энергетики и систем накопления энергии.

atomic-energy.ru

## Общественность поддержала строительство стендового испытательного комплекса по производству водорода на Кольской АЭС



Внешний вид Стендового испытательного комплекса (Скриншот трансляции слушаний / Полярные Зори)

13 марта 2024 года в Полярных Зорях прошли общественные обсуждения проектной документации «Стендовый испытательный комплекс по производству водорода производительностью 200 нм<sup>3</sup>/час», включая предварительные материалы оценки воздействия объекта на окружающую среду.

В слушаниях, которые проводились в соответствии с нормами российского законодательства, приняли участие 708 человек: жители города, представители общественных организаций, учёные-экологи, руководители муниципалитета, депутаты местного Совета и министр природных ресурсов, экологии и рыбного хозяйства Мурманской области. Все, кто не

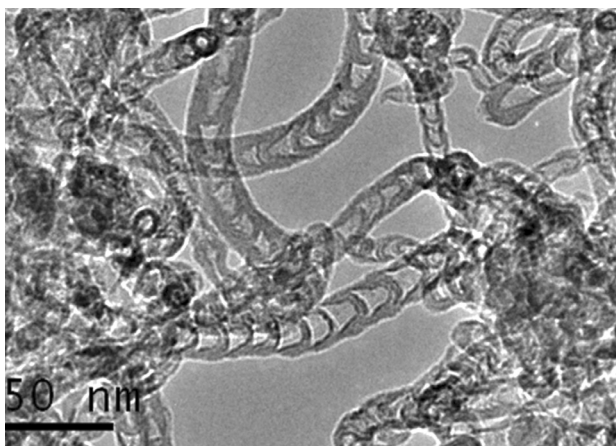
смог присутствовать лично, следили за прямой трансляцией мероприятия в социальной сети ВКонтакте.

Начиная с 21 февраля, проектная документация «Стендовый испытательный комплекс по производству водорода производительностью 200 нм<sup>3</sup>/час», включая предварительные материалы оценки воздействия на окружающую среду, были доступны для ознакомления всем желающим в информационном центре Кольской АЭС, а также на сайте [www.pz-city.ru](http://www.pz-city.ru) [external link, opens in a new tab](#) и в разделе «Общественные слушания» на сайте [www.rosenergoatom.ru](http://www.rosenergoatom.ru) [external link, opens in a new tab](#).

atomic-energy.ru



### «Институт катализа СО РАН» рекордно повысил скорость реакции получения водорода из муравьиной кислоты



Ученые ФИЦ «Институт катализа СО РАН» разработали способ получения водорода из муравьиной кислоты с помощью модифицированных азотом углеродных наноматериалов. Он позволил рекордно повысить скорость реакции в пять раз и добиться практически полной селективности по водороду – 99,4 %.

Специалисты ИК СО РАН разрабатывают различные способы получения азотсодержащих углеродных наноматериалов, исследуют их физико-химические и каталитические свойства. Ученые

успешно синтезируют азотсодержащие углеродные нановолокна со структурами «рыбья кость» или «колода карт», а также бамбукоподобные нанотрубки.

Специалисты в своей работе используют два основных подхода к синтезу азотсодержащих углеродных наноматериалов. В первом азот встраивается в углеродную структуру непосредственно в ходе роста самого материала и равномерно распределяется по всему объему. Во втором случае, гетероатом с помощью постобработки встраивается преимущественно во внешние графеновые слои исходного углеродного материала.

Азотсодержащие углеродные наноматериалы используют в качестве эффективных носителей для получения стабильных нанесенных катализаторов с мономолекулярной или атомарной дисперсностью. Высокодисперсные металлические катализаторы проявляют высокую активность в различных важных процессах, в том числе в разложении муравьиной кислоты. Эта реакция важна для эффективного получения водорода, в частности, для топливных элементов. Ученым удалось достичь рекордного роста скорости реакции в газофазной среде, при температурах ниже 150 °С.

*atomic-energy.ru*

### В Полярных Звездах пройдут общественные слушания на тему создания стендового испытательного комплекса по производству водорода



13 марта 2024 года в городе расположения Кольской АЭС – Полярные Зори Мурманской области, состоятся общественные обсуждения проектной документации «Стендовый испытательный комплекс по производству водорода производительностью 200 нм<sup>3</sup>/час», включая предварительные материалы оценки его воздействия на окружающую среду.

*atomic-energy.ru*

### Росатом в 2024 году примет инвестиционное решение о строительстве четырехблочной АЭТС по производству водорода



Госкорпорация «Росатом» планирует к концу 2024 года принять инвестиционное решение о строительстве атомной энерготехнологической станции (АЭТС) по выпуску водорода. Об этом заявил в Совете Федерации вице-президент АО «Росатом Оверсиз» Антон Москвин.

«Это флагман всей нашей технологической программы. Работа идет не первый год. На текущий момент разработан технический проект реакторной



установки. На 2024 год запланирована разработка материалов обоснования инвестиций. К концу текущего года мы планируем принять инвестиционное решение и запустить проект в реализацию», – сказал Москвин.

АЭС будет состоять из четырех энергоблоков производительностью 153 тысячи т водорода в год на один энергоблок. Ввод станции в эксплуатацию планируется поэтапно до 2035 года, говорится

в презентации Москвина.

«Технология производства предполагает применение природного газа», – отметил он.

Ранее сообщалось, что в качестве потенциальной площадки размещения АЭС «Росатом» рассматривает Татарстан.

*atomic-energy.ru*

### В Японии прошли первые испытания судового двигателя MAN ES на водороде



Японская компания Mitsui Engineering and Shipbuilding (Mitsui E&S), имеющая лицензию MAN Energy Solutions (MAN ES) на производство двигателей, провела испытания двухтактного двигателя серии MAN B&W с полной нагрузкой при работе на водороде.

Испытания показали стабильную работу двигателя при различных нагрузках и режимах эксплуатации, в том числе сжигание водорода при полной нагрузке. Mitsui также подтвердила сокращение выбросов парниковых газов до 95 %, оставшаяся часть пришлось на пилотный газ, использовавшийся во время испытаний, сообщает пресс-служба MAN ES.

Испытания проводились на заводе Mitsui E&S в Тамано (префектура Окаяма). Ранее компании провели совместную работу по переводу одного из четырех цилиндров двухтопливного двигателя MAN B&W ME-GI для работы на водороде. В 2023 году Mitsui самостоятельно разработала систему подачи водородного газа.

Mitsui Engineering & Shipbuilding основана в Японии в 1917 году, является крупной многопрофильной компанией, предоставляющей услуги проектирования, инжиниринга, поставки оборудования и строительства крупных производственных комплексов во всех отраслях промышленности. Входит в одну из крупнейших в мире финансово-промышленных групп Mitsui Group.

Компания MAN Energy Solutions с головным офисом в Германии (до 2018 года – MAN Diesel and Turbo), основанная 1758 году, является мировым лидером на рынке крупных дизельных двигателей для использования на судах и электростанциях. Линейка продукции компании включает двухтактные и четырехтактные двигатели для морских судов и стационарных объектов, турбокомпрессоры и винты, газовые и паровые турбины, компрессоры и химические реакторы. MAN Energy Solutions входит в энергетическое подразделение группы MAN SE, одной из 30 ведущих немецких компаний.

*atomic-energy.ru*





## Продолжается строительство первого в России судна на водородном топливе



Специалисты Верхне-Волжского филиала «Российского классификационного общества» (РКО) продолжают техническое наблюдение за строительством первого отечественного прогульно-экскурсионного судна с энергетической

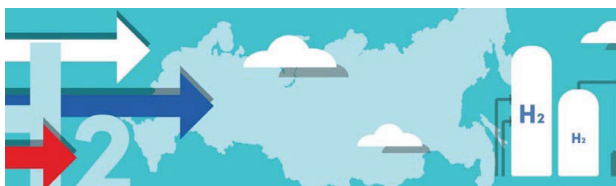
установкой на водородных топливных элементах проекта 00393. Об этом говорится в сообщении РКО от 5 марта.

Напомним, договор о строительстве первого в России судна с энергетической установкой на базе опытного образца универсального функционального модуля на водородных топливных элементах был подписан между Зеленодольским заводом имени А. М. Горького (входит в Судостроительную корпорацию «Ак Барс») и Крыловским государственным научным центром (КГНЦ) 15 сентября 2022 года. Закладка судна состоялась на Зеленодольском заводе 28 февраля 2023 года.

Прогульно-экскурсионное судно на водородном топливе строится по проекту 00393, разработанному в ЦКБ «Балтсудопроект» (входит в состав КГНЦ).

*atomic-energy.ru*

## Обнародована стратегия Росатома по развитию водородных технологий

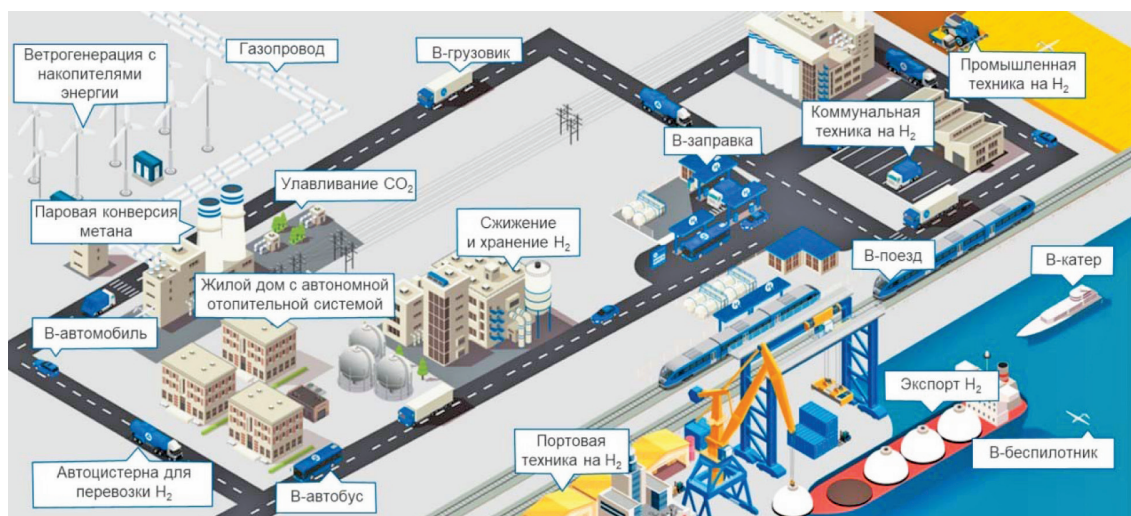


В настоящее время водородными технологиями в России занимается несколько десятков компаний, в том числе «Росатом», «Роснано», «НОВАТЭК», «H2

Чистая энергетика», АФК «Система», «Норникель» в том числе и те, что занимаются добычей газа, как например «Газпром» и другие. Они инвестируют в разработку технологий производства, хранения и транспортировки водорода, утилизации CO<sub>2</sub>, а также работают над использованием водорода в различных областях промышленности.

*atomic-energy.ru*

## В нынешнем году на Сахалине будет запущен водородный полигон



В конце июня в Южно-Сахалинске должен заработать Центр водородного инжиниринга с опытным полигоном на базе СКБ САМИ. Сегодня сюда доставляют оборудование, которое позволит

производить водород с помощью энергии солнца и ветра.

На полигон уже пришли элементы будущей солнечной станции – 600 панелей мощностью 500





Вт каждая. Водород будет производиться в процессе электролиза. Полностью оборудование для новейших установок планируется поставить к 15 мая и в течение месяца провести монтаж и пусконаладку.

Сахалинский водородный полигон – это первая площадка подобного рода в России. Островной регион выиграл право реализовать пилотный проект

по развитию водородной энергетики, который инициировал Президент Владимир Путин. Если эксперимент будет успешен, через несколько лет будет запущен водородный завод и налажен экспорт чистого топлива в страны Азиатско-Тихоокеанского региона.

*atomic-energy.ru*

### ОИЯИ принял участие в Неделе высоких технологий и технопредпринимательства



В этом году Объединенный институт стал одним из главных партнеров Недели высоких технологий и технопредпринимательства (НВТиТ), стартовавшей 18 марта по всей России. Мероприятие, охватывающее 79 регионов страны, включает в себя тематические

уроки, мастер-классы, научные квесты и кейс-турниры, посвященные разным наукам. Участники – школьники, их родители и учителя. Организатором мероприятий выступает АНПО «Школьная лига».

*atomic-energy.ru*

### Кто покупает атомную энергию?



Учитывая весь этот шум вокруг ядерных сделок и соглашений между странами, Вы, возможно, задаетесь вопросом: «Что движет спросом на новую ядерную энергию?» Ответ прост: клиенты. Они бывают разных

форм и размеров со всего мира, как и сами ядерные реакторы, но у них всех есть одна общая черта – им нужна энергия, и в больших количествах.

*atomic-energy.ru*



### Минэнерго Турции: «Решения по проекту второй АЭС «Синоп» еще нет»



Переговоры насчет реализации проекта второй АЭС в Турции продолжаются, они не завершены. Так представитель Минэнерго Турции прокомментировал ТАСС заявления главы Росатома Алексея Лихачева о наличии «политического решения» об участии России в строительстве второй АЭС в республике.

*atomic-energy.ru*

### В Словакии планируется строительство новых мощностей АЭС



В Словакии может быть возведен новый энергоблок атомной электростанции в Ясловске Богунице мощностью более 1000 МВт. Об этом сегодня, 29 февраля, заявил премьер-министр республики Роберт Фицо.

*atomic-energy.ru*

### Fesco организовала перевозку сепараторов-пароперегревателей для АЭС «Аккую»



Транспортная группа Fesco организовала прямую отправку крупнотоннажного негабаритного оборудования для АЭС «Аккую» в Турции. Как сообщили в пресс-службе группы 29 февраля, из порта Санкт-Петербург на стройплощадку направлены два сепаратора-пароперегревателя (СПП).

Масса одного СПП составляет 330 тонн, длина 22,3 метра, наружный диаметр 4,5 метра. Общая масса грузовой партии составила 780 тонн. Оборудование изготовлено Машиностроительным дивизионом «Росатома».

*atomic-energy.ru*

### На канадской АЭС «Брюс» планируется строительство новых блоков суммарной мощностью 4800 МВт



Правительство Канады выделит 50 миллионов канадских долларов на работы по анализу целесообразности строительства 4800 МВт новых генерирующих мощностей на АЭС «Брюс» в провинции Онтарио.

*atomic-energy.ru*





## Росатом обсуждает сооружение малых АЭС в Киргизии, Узбекистане, Мьянме и островных государствах Юго-Восточной Азии



Госкорпорация (ГК) «Росатом» ведет обсуждение о строительстве малых АЭС с Киргизией, Узбекистаном, Мьянмой и островными государствами Восточной Азии, заявил гендиректор ГК Алексей Лихачев в Государственной думе.

«Спрос [на малые АЭС] очень высокий и наши аналитики говорят, что в ближайшие 10-15 лет до 30-40 ГВт АЭС малой мощности будет создано на планете», – сказал он, напомнив о том, что уже ведутся переговоры с российскими компаниями, в том числе с «Норникелем», «Газпромнефтью», «Лукойлом» и «Русской платиной» по проектам малых АЭС.

*atomic-energy.ru*

## Регулирующий орган Кении призывает к ускоренному созданию в стране атомной энергетики



Атомная энергетика поможет Кении реализовать планы этого африканского государства по промышленному развитию.

Так считает генеральный директор кенийского агентства по ядерному регулированию (KNRA) Джеймс Кетер (James Keter).

Выступая в Найроби в ходе рабочего совещания с представителями кенийского института исследований и анализа государственной политики (KIPRA), глава атомного регулятора назвал планы по строительству АЭС «своевременными».

Согласно прогнозам, потребление электроэнергии в Кении будет расти, причём пиковый спрос бу-

дет возрастать в среднем на 3,1 % в год и превысит 2000 МВт(э).

Кетер отметил, что, благодаря надёжному регулированию, партнёрским отношениям с мировыми лидерами отрасли и постоянному наращиванию потенциала, Кения будет развивать атомную энергетику в соответствии с руководящими принципами МАГАТЭ.

Он призвал к «общегосударственному подходу» при определении пути экономического роста и индустриализации страны.

*atomic-energy.ru*

## Эмиратская ENEC запустила четвертый южнокорейский энергоблок APR-1400 АЭС «Барака»



Эмиратская корпорация по атомной энергии (ENEC) объявила об успешном запуске № 4 энергоблока АЭС «Барака» в Объединенных Арабских Эмиратах. ENEC также объявила, что в ближайшие недели четвертый энергоблок будет подключен к национальной электросети и вступит в фазу тестирования, чтобы постепенно увеличить свою мощность до полного проектного значения.

*atomic-energy.ru*

**На энергоблоке № 7 индийской АЭС «Раджастан» завершено горячее кондиционирование**



**Горячее кондиционирование было завершено на энергоблоке № 7 индийской АЭС «Раджастан» (RAPP).**

В корпорации Nuclear Power Corporation of India Ltd (NPCIL) заявили, что горячее кондиционирование «представляет собой процесс этапа ввода в эксплуатацию, предусматривающий создание адгезивного защитного слоя магнетита на внутренних поверхностях трубопроводов, выполненных из

углеродистой стали, системы передачи тепла первого контура (Primary Heat Transport – PHT)». Горячее кондиционирование «было проведено за счет выполнения циркуляции легкой воды с контролируемыми показателями водно-химического режима через систему PHT в условиях поддержания температуры среды около 256 °С и давления около 100 кг/см<sup>2</sup>».

*atomic-energy.ru*

**Канцлер Германии счел нерентабельным строительство новых АЭС в стране**



Канцлер Германии Олаф Шольц выступил против возвращения страны к ядерной энергетике, указав на нерентабельность строительства атомных электростанций.

*atomic-energy.ru*

**Росатом планирует в декабре произвести физический пуск реактора ВВЭР-1200 первого блока АЭС «Руппур»**



Росатом надеется в декабре произвести пуск реактора блока № 1 АЭС «Руппур», которую госкорпорация строит в Бангладеше. Об этом сообщил гендиректор госкорпорации Алексей Лихачев, выступая на Всемирном фестивале молодежи в Сочи.

*atomic-energy.ru*



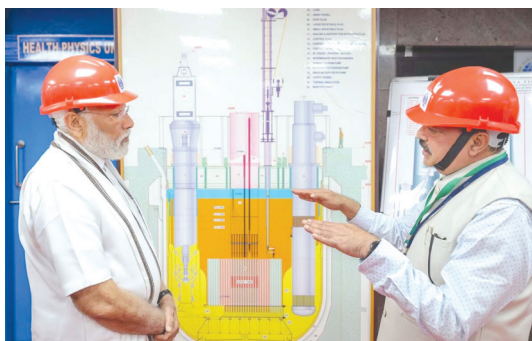
International Publishing House of scientific periodicals «Space»



Международный издательский дом научной периодики «Спейс»



## Премьер-министр Индии принял участие в церемонии загрузки топлива в быстрый реактор PFBR-500 на АЭС «Калпаккам»



4 марта 2024 года премьер-министр Индии Нарендра Моди принял участие в церемонии начала загрузки топлива в реактор-размножитель на быстрых нейтронах мощностью 500 МВт на АЭС «Калпаккам» в штате Тамилнад.

На АЭС «Калпаккам» (другое название – АЭС «Мадрас») в настоящее время эксплуатируются два коммерческих тяжеловодных реактора PHWR-220 мощностью по 220 МВт, введённые в эксплуатацию в 1984 и 1985 годах. Находящийся на этой же площадке прототип быстрого реактора-размножителя (PFBR) является экспериментальным реактором, представляющим собой второй этап трехступенчатой ядерной программы Индии.

PFBR был разработан компанией BHAVINI (Bharatiya Nabhikiya Vidyut Nigam Limited – государственным предприятием при Департаменте атомной энергии (DAE), которое было создано в 2003 году с целью сосредоточиться на реакторах-размножителях на быстрых нейтронах. Строительство реактора-размножителя на быстрых нейтронах началось в 2004 году, а первоначально предполагалось, что оно завершится в 2010 году.

*atomic-energy.ru*

## Правительство Эстонии рассмотрело министерский отчет для принятия решения о внедрении атомных технологий



Министр климата Кристен Михаль представил отчет Рабочей группы по ядерной энергетике, поддерживающей внедрение атомной энергетике в Эстонии, правительству страны.

*atomic-energy.ru*

Строительство шести новых атомных реакторов EPR2 во Франции подорожало на 30 %. Французская энергетическая компания EDF скорректировала в сторону увеличения оценочную стоимость строительства в республике шести атомных реакторов. Об этом сообщила газета Les Echos [external link](#), opens in a new tab.

*atomic-energy.ru*

## Блок № 4 американской АЭС «Вогтль» впервые подключён к сети



Пусковой блок «Vogtle-4» («Вогл-4», США) был впервые подключён к сети 1 марта 2024 года, сообщили в компании «Georgia Power».

Это второй и на сегодняшний день последний блок с реактором AP-1000 на территории США.

Строительство блока началось 19 ноября 2013 года.

*atomic-energy.ru*

## Rolls-Royce лидирует среди претендентов на строительство малых атомных реакторов в Великобритании



Компания «Rolls-Royce» является фаворитом в споре за право построить в Британии парк малых атомных станций, считает глава компании Туфан Эргинбильгич (Tufan Erginbilgic).

В интервью газете «The Mail» менеджер заявил, что предлагаемый его компанией проект «более продвинут» по сравнению с проектами других компаний-претендентов.

Он добавил, что проект малого реактора от «Rolls-Royce» опережает проекты включённых в шорт-лист конкурса конкурентов «примерно на два года» по степени готовности.

Кроме «Rolls-Royce», участие в конкурсе продолжают ещё пять компаний.

*atomic-energy.ru*



## Будущая АЭС Sirik в Иране будет состоять из четырёх блоков по 1250 МВт



АЭС «Sirik» (Sirik), о начале строительства которой в Иране было объявлено в феврале 2024 года, будет полностью завершена через 18 лет.

Об этом заявил президент организации по атомной энергии (АЕОИ) Ирана Мохаммад Эслами.

Он добавил, что станция будет состоять из

четырёх энергоблоков электрической мощностью 1250 МВт(э) каждый.

В настоящее время на сооружении станции ведутся работы в рамках первого этапа, стартовавшие 1 февраля 2024 года в присутствии Эслами.

*atomic-energy.ru*



## Всеитайское собрание народных представителей рассмотрело стратегию развития атомной отрасли страны



В ходе двух сессий этого года (заседания Всеитайского собрания народных представителей, ВСНП, и Всеитайского комитета Народного политического консультативного совета Китая, ВК НПКСК) председатель корпорации «China Nuclear Power Engineering Corporation» (CNPE) Сюй Пэнфэй (Xu Pengfei) дал интервью каналу CGTN.

*atomic-energy.ru*

**В мире статус действующего имеют 414 блоков, статус строящегося 57 блоков**



В мире статус действующего имеют 414 блоков, а статус строящегося – 57 блоков. Такие данные приводятся в базе PRIS, поддерживаемой МАГАТЭ.

В очередном обновлении базы учтено первое подключение к сети блока «Какрагар-4» (Индия), состоявшееся 20 февраля 2024 года.

Реакторная установка – PHWR-700. Тепловая мощность реактора – 2166 МВт(т). Электрическая мощность блока – 700 МВт(э) брутто, или 630 МВт(э).

Дата первого бетона – 22 ноября 2010 года.

Таким образом, по данным PRIS в Индии 20 действующих и семь строящихся атомных энергоблоков.

По данным PRIS, в 2024 году в мире осуществлён энергопуск одного энергоблока (в Индии).

Общее количество реакторо-лет эксплуатации атомных энергоблоков в мире составляет 19780.

*atomic-energy.ru*

## Россия и Венгрия подтвердили высокие темпы продолжающегося строительства двух новых энергоблоков АЭС «Пакш-2»



По итогам переговоров Алексей Лихачев и Петер Сийярто отметили, что работы по сооружению новых энергоблоков АЭС «Пакш» ведутся высокими темпами. В прошлом году с опережением графика был разработан котлован на глубину 5 метров, до уровня грунтовых вод. Завершено сооружение противодиффузионной защиты – специальной подземной бетонной стены вокруг котлована длиной 2700 метров, которая защитит рабочий котлован от проникновения грунтовых вод и позволит обеспечить

безопасную работу действующих энергоблоков в процессе строительства новых. Сейчас активно идет укрепление грунта, и летом 2024 года запланировано начало разработки котлована до проектных отметок –

до глубины 30 метров. После этого начнутся работы по бетонной подготовке – армированию для будущей фундаментной плиты.

*atomic-energy.ru*

### АЭС «Аккую» в Турции в полном объёме войдёт в эксплуатацию в 2028 году



**Все реакторы строящейся в Турции АЭС «Аккую» планируется ввести в эксплуатацию к 2028 году.**

Об этом заявил президент страны Реджеп Тайип Эрдоган.

«Строительство АЭС «Аккую», которая будет вырабатывать ежегодно 35 миллиардов киловатт-часов электроэнергии, продолжается. Все реакторы станции планируется ввести в эксплуатацию к 2028 году», – отметил он во время выступления на предвыборном митинге в провинции Мерсин, которое транслировал телеканал TRT.

*atomic-energy.ru*

### Облачный гигант Amazon Web Services приобрел гигаваттный кампус ЦОД, запитанный от АЭС «Саскуэханна»



Облачный гигант Amazon Web Services (AWS) приобрёл у Talen Energy Corporation кампус ЦОД, строящийся у атомной электростанции Susquehanna в Пенсильвании (США). По данным Datacenter Dynamics, ещё на минувшей неделе Talen объявила о продаже кампуса «крупному облачному провайдеру». В презентации для инвесторов было раскрыто, что речь идёт об AWS.

*atomic-energy.ru*

### В Словении инициирован референдум о строительстве нового блока АЭС



В Словении инициирован референдум о строительстве нового блока атомной электростанции Кршко. Ходатайство о проведении референдума подали представители партий «Движение свободы», Словенской демократической партии, «Новой Словении» и социал-демократы. Ожидается, что референдум состоится во второй половине ноября 2024 года.

*atomic-energy.ru*

### Росатом установил нижнюю часть купола ВЗО на строящемся в Китае восьмом энергоблоке АЭС «Тяньвань»



На энергоблоке № 8 АЭС «Тяньвань», сооружаемой в Китае по российскому проекту ВВЭР-1200, на штатное место установлена нижняя часть купола внутренней защитной оболочки (ВЗО). Предварительно крупногабаритные металлоконструкции были смонтированы на земле на отдельном стенде. Общий вес конструкции составил 375,5 тонны.

*atomic-energy.ru*





### Чехия до осени 2025 года может принять решение о строительстве еще двух энергоблоков АЭС



Правительство Чехии до завершения срока своих полномочий после предстоящих в республике осенью 2025 года очередных парламентских выборов, может принять решение о строительстве двух новых энергоблоков на действующих АЭС «Дукованы» (юго-восток страны) и АЭС «Темелин» (Южная Чехия). Такое мнение высказал министр промышленности и торговли Чехии Йозеф Сикела.

*atomic-energy.ru*

### Техническая академия Росатома начала обучение специалистов-инструкторов АЭС «Сюйдапу»



В Нововоронежском филиале Технической академии Росатома стартовало обучение специалистов-инструкторов АЭС «Сюйдапу» (Китай) для получения углубленных знаний по эксплуатации реактора ВВЭР-1200. Оно продлится около двух месяцев. За это время китайские атомщики пройдут курс подготовки на многофункциональном тренажере энергоблока – прототипе Ленинградской АЭС-2.

*atomic-energy.ru*

### Эмиратская ENEC приступила к опытно-промышленной эксплуатации четвертого энергоблока APR-1400 АЭС «Барака»



Четвертый энергоблок атомной электростанции (АЭС) «Барака» начал выработку тепловой энергии, следует из сообщения Корпорации по атомной энергии Объединенных Арабских Эмиратов (The Emirates Nuclear Energy Corporation, ENEC). Новый реактор в ближайшие недели будет подключен к общей сети для проведения тестовых испытаний и постепенного выхода на проектную мощность.

*atomic-energy.ru*

### Студенты снежинского филиала МИФИ приняли участие в строительстве египетской АЭС «Эль-Дабаа»



АЭС «Эль-Дабаа» – первая атомная электростанция в Египте, которая будет построена в городе Эль-Дабаа провинции Матрух на берегу Средиземного моря, примерно в 300 км к северо-западу от Каира. В ее строительстве приняли участие студенты СФТИ.

*atomic-energy.ru*



## Парламент Болгарии ратифицировал соглашение с США о сотрудничестве в атомной энергетике



Народное собрание (парламент) Болгарии ратифицировало межправительственное соглашение о сотрудничестве в атомной энергетике, подписанное в феврале между Болгарией и США. За ратификацию проголосовали 149 депутатов, против – 50.

*atomic-energy.ru*

## «Атомстройэкспорт» и АЭС «Пакш-2» начали процесс заводской приемки ловушки расплава для будущего пятого энергоблока ВВЭР-1200



Специалисты АО «Атомстройэкспорт» (АСЭ, входит в инжиниринговый дивизион Госкорпорации «Росатом», генеральный подрядчик строительства АЭС «Пакш-2») и представители венгерского заказчика – ЗАО «Пакш-2» начали приемку устройства локализации расплава (УЛР) для энергоблока № 5 АЭС «Пакш-2». УЛР, или ловушка расплава, – одно из специальных устройств безопасности энергоблоков ВВЭР-1200.

*atomic-energy.ru*

## Канадская OPG завершила подготовительные работы на площадке сооружения первого малого модульного реактора BWRX-300 на АЭС «Дарлингтон»



Подготовительные работы на площадке сооружения проекта Ontario Power Generation завершены вовремя и в рамках бюджета, что открыло путь к началу основных работ на площадке.

Работы на ранней стадии начались в сентябре 2022 года партнером проекта Ontario Power Generation (OPG) ES Fox. Строительные работы, завершённые на этом этапе, включают планировку

площадки, строительство временных дорог и площадок для строительства, установку устройств ливневой канализации, а также создание на площадке инженерных коммуникаций, включая электроэнергию, бытовую и противопожарную воду, а также ИТ-инфраструктуру.

*atomic-energy.ru*





## Для экономики Болгарии требуется строительство 4 новых блоков АЭС



Депутат Европарламента – Цветелина Пенкова организовала в Брюсселе конференцию о роли Болгарии в развитии европейской энергетики и промышленности.

«Конференция «Энергетическая безопасность – основа развития европейской промышленности. Роль Болгарии», которую я организую в Европейском парламенте в Брюсселе 19 марта, является логичным шагом для разработки четкого плана промышленного и энергетического развития Болгарии и ее роли в ЕС. Будут присутствовать видные представители болгарской энергетики и промышленности, представители Европейской комиссии, в том числе еврокомиссары, а также представители крупных европейских компаний, отраслевых ассоциаций, посольств европейских стран.

*atomic-energy.ru*

## МАГАТЭ готово помочь Ирану в разработке мирной ядерной программы

Ирак решил заняться развитием атомной энергетики. Представители страны направятся в штаб-квартиру Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), чтобы «наметить дорожную карту для мирной ядерной программы». Между тем эксперты

считают, что проблемы безопасности в Ираке до сих пор не решены и вряд ли это произойдет в обозримом будущем. А в таких условиях скорое начало строительства АЭС выглядит малореалистичным.

*atomic-energy.ru*

## Парламент Нидерландов утвердил план строительства к 2035 году четырёх новых энергоблоков АЭС

В ответ на предложение правительства Нидерландов возвести два новых энергоблока вблизи уже существующей АЭС Борселе, парламент страны одобрил предложение, предусматривающее постройку

как минимум четырех новых блоков атомной электростанции.

*atomic-energy.ru*

## Президент Республики Беларусь наградила 40 специалистов за вклад в строительство БелАЭС



Глава государства Александр Лукашенко подписал указ и распоряжение, в соответствии с которыми 40 человек удостоены орденов, медалей и Благодарности Президента Республики Беларусь за добросовестный плодотворный труд, высокий профессионализм, значительный вклад в реализацию инвестиционного проекта по строительству Белорусской атомной электростанции. Об этом БЕЛТА сообщили в пресс-службе белорусского лидера.

*atomic-energy.ru*

## Американская Constellation выпустила первую в стране зеленую облигацию для ядерного проекта



заявку на продление лицензии на 20 лет для АЭС в Клинтоне (штат Иллинойс), что позволит ей продолжать работу до 2047 года.

Последним реактором, запущенным в США до третьего энергоблока АЭС «Вогтль», был второй энергоблок АЭС «Уотс-Бар» в 2016 году. Строительство этого реактора началось в 1973 году и было приостановлено в 1985 году, после чего работы возобновились в 2007 году.

*atomic-energy.ru*

### Кения планирует построить у себя первую АЭС к 2034 году



Агентство ядерной энергетики Кении представило стратегический план, который будет определять развитие программы ядерной энергетики в течение следующих пяти лет, в т.ч. в связи с планами по строительству своей первой атомной электростанции.

*atomic-energy.ru*

### Турция намерена в 2024 году ввести в строй первый реактор ВВЭР-1200 АЭС «Аккую»



Министр энергетики Турции Алпарслан Байрактар заявил, что, несмотря на возникающие проблемы и препятствия, первый энергоблок АЭС «Аккую» всё же планируют ввести в эксплуатацию в 2024 году.

*atomic-energy.ru*

### Пакистан запланировал ввод в эксплуатацию 40 ГВт атомной мощности на 32 блоках АЭС к 2050 году



Пакистан находится на пути к переходу на экологически чистую энергетику с нулевым уровнем выбросов, планируя к 2050 году нарастить мощность своих АЭС до 40 ГВт.

В соответствии с национальной концепцией развития атомной энергетики до 2050 года, Пакистан планирует ввести в эксплуатацию 40 000 МВт атомной мощности на 32 энергоблоках АЭС для удовлетворения 25 % энергетических потребностей страны.

Специальный помощник премьер-министра по вопросам изменения климата Малик Амин Аслам заявил, что Пакистан намерен адаптироваться к цели нулевых выбросов углерода к 2050 году в области энергетики, используя все виды возобновляемых и низкоуглеродных источников.

*atomic-energy.ru*

### Госдума РФ рекомендовала Правительству содействовать доведению доли атома в энергобалансе до 25 %



Госдума рекомендует правительству РФ проработать меры для доведения к 2045 году доли атомной энергетики до 25 % в общем объеме производства электроэнергии в РФ. Такое предложение содержится в постановлении нижней палаты парламента о принятии к сведению генерального директора госкорпорации по атомной энергии «Росатом» Алексея Лихачева на тему «Роль атомной промышленности в обеспечении технологического суверенитета».

*atomic-energy.ru*





## Глава канадской Atkins Réalis предостерег от спешки в реализации ядерных проектов на Западе



По данным Financial Times, энергия атома все чаще рассматривается как критически важная для перехода на чистые источники электроэнергии, но строительство ядерных реакторов, как правило, сопровождается перерасходом средств и задержками, вызывая опасения по поводу безопасности и последствий хранения радиоактивных отходов.

*atomic-energy.ru*

## Франция предоставила гранты разработчикам жидкосолевых реакторов Thorizon и Stellaria



Разработчики реакторов на расплавах солей Thorizon и Stellaria, оба входящие в консорциум с Orano, были выбраны французским правительством для получения финансирования в рамках национального инвестиционного плана Франции до 2030 года.

*atomic-energy.ru*

## Развитие ветровой энергетики может нести риски для планеты

До 2034 года в Европе объем энергии, вырабатываемой ветровыми электростанциями, увеличится на 140 гигаватт. Ветер, как источник возобновляемой энергии, имеет как свои плюсы, так и серьезные минусы. Если ветроэнергетика составит 33% от уровня нынешней общей генерации на планете, то это более негативно скажется на климате, чем увеличение содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере. И в том, и в другом случае последствия будут катастрофическими.



Среди доводов противников ВЭС можно услышать следующие: неэстетичность внешнего вида ветряков на фоне естественной природы, шум, создаваемый лопастями при их вращении, мелькание лопастей, высокая стоимость строительства станций, аккумулирующих и преобразующих мощности, высокая стоимость и длительность предварительных исследований местности.

В экологическом аспекте все чаще звучат доводы о рисках для птиц и летучих мышей. В США от столкновения с лопастями за год гибнет несколько десятков тысяч пернатых. С летучими мышами дело обстоит еще хуже, так как они в большей степени пользуются врожденной эхолокацией, а не зрением, залетают в области пониженного давления за вращающимися лопастями генераторов. Как следствие – травмы легких и смерть.

*ixbt.com*

## Китай готовится производить 30-МВт ветрогенераторы с лопастями длиной более 150 метров



Китайская компания Sany создала испытательный стенд для тестирования лопастей ветряных турбин длиной свыше 100 метров. Это будет первый в мире испытательный комплекс для проверки сверхдлинных лопастей на вибрационную устойчивость одновременно по двум осям. По словам производителя, это заложило основу подготовки к производству ветрогенераторов мощностью 30 МВт. Три десятка таких генераторов заменят один ядерный реактор на АЭС.

В последние годы китайские производители ветрогенераторов подняли планку на недостижимую для западных компаний высоту. В Китае наладили массовое производство 16- и 18-МВт турбин. Совсем скоро там начнут выпускать 22-МВт генераторы, длина лопастей для которых будет достигать 150 м. В

любом случае, лопасти длиной более 100 м становятся самым востребованным товаром, поэтому проверка их на усталость материала остро стоит на повестке дня.

*atomic-energy.ru*

### Росатом ввел в эксплуатацию 2-ю очередь Труновской ветроэлектростанции мощностью 35 МВт



Вторая очередь Труновской ВЭС Росатома в Ставропольском крае установленной мощностью 35 МВт начала поставлять электроэнергию в единую сеть России. Суммарно Труновская ВЭС имеет установленную мощность 95 МВт и состоит из 38 ветроэнергетических установок.

*atomic-energy.ru*

### Глобальные выбросы углекислого газа от объектов электроэнергетики достигли рекордного объема в 2023 году

Международное энергетическое агентство (МЭА) зафиксировало рекордный объем глобальных выбросов углекислого газа, возникающего в процессе выработки энергии, который достиг отметки в 37,4 млрд тонн. Об этом говорится в докладе, опубликованном на сайте агентства.

Отмечается, что в 2023 году этот показатель увеличился на 410 млн тонн. Между тем в 2022 году объем выбросов возрос на 490 млн тонн. По мнению экспертов МЭА, ослабление динамики роста связано с расширением глобального использования АЭС,

солнечных панелей и ветроэлектростанций. При этом в прошлом году объем выбросов мог бы достичь еще меньших показателей, если бы аномально сильная засуха, наблюдаемая в некоторых регионах планеты, не повлияла на работу ГЭС, говорится в докладе.

Ранее МЭА опубликовало прогноз, согласно которому мировой спрос на уголь, использование которого приводит к наибольшим выбросам углекислого газа, снизится на 2,6 % к 2026 году.

*atomic-energy.ru*

### В Европе планируется строительство самой большой гибридной плавучей электростанции



Голландская компания SolarDuck совместно со своими итальянскими партнерами разрабатывает проект гибридной плавучей солнечно-ветряной электростанции Корильяно мощностью 540 мегаватт, которую планируется построить у южного побережья

Италии, в Ионическом море.

Ожидается, что проект Корильяно будет запущен в эксплуатацию в 2028 году.

*atomic-energy.ru*





**«Новавинд» и Газпромбанк подписали соглашение о взаимодействии в рамках организации финансирования проектов по ветроэнергетике**



25 марта в г. Сочи в рамках первого дня работы XIII Международного форума «АТОМЭКСПО» состоялась церемония подписания соглашения о взаимодействии в рамках организации финансирования проектов по строительству ветроэлектростанций между АО «Новавинд» и АО «Газпромбанк». Общая запланированная мощность проектов составит 460 МВт.

Предметом соглашения является установление базовых условий взаимодействия сторон в целях дальнейшего кредитования строительства ветроэлектростанций в период с 2025 по 2027 гг. в рамках выполнения обязательств по договорам о предоставлении мощности квалифицированных генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии.

*atomic-energy.ru*

**Мировой ветроэнергетике не хватает судов для морских установок**

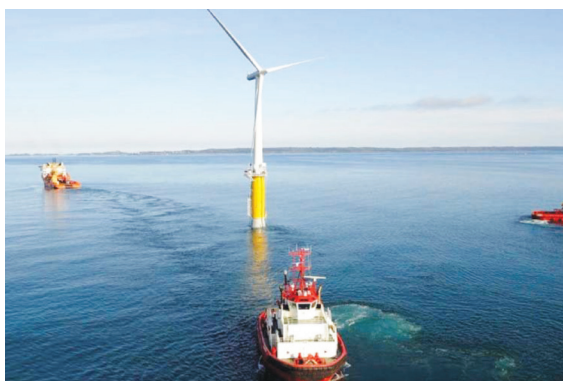


Фото: supplychaindigital.com

**Мощности морской ветроэнергетики к 2035 году могут увеличиться в пять раз, при этом число судов для установки ветряков в океане растет не так быстро, сообщает Bloomberg.**

Bloomberg утверждает, что количество судов, способных устанавливать турбины мощностью не менее 15 мегаватт, за пределами Китая всего 15-20, и в ближайшие годы потребуется еще больше.

Wood Mackenzie Ltd. утверждает, что в настоящее время за пределами Китая эксплуатируются не более 40 таких судов, но не все они используются только для оффшорной ветроэнергетики. По прогнозам компании, для удовлетворения будущего спроса необходимо инвестировать около 14,8 миллиарда долларов, но на данный момент удовлетворено всего около трети этой суммы.

*teknoblog.ru*

**Латвийское правительство поддержало проект строительства АЭС в стране**



**Латвия вместе с Эстонией должны построить свою атомную электростанцию, написал в Twitter министр обороны Латвии Артис Пабрикс.**

По мнению министра, в будущем энергетика Латвии должна опираться на три источника – ветер, солнце и атомную энергию. Какую-то часть можно оставить и на газ. Как считает Пабрикс, атомную электростанцию нужно строить вместе с эстонцами и привлечь специалистов и технологии из Швеции и Канады. Быстро это не получится, однако первый блок можно построить уже в 2028-2029 году.

Председатель правления эстонской энергокомпании Eesti Energia Хандо Сутерс в комментарии агентству LETA отметил, что Балтия не потребляет столько энергии, чтобы строить атомный реактор. По его словам, три балтийские страны в день потребляют в три раза меньше энергии, чем одна Финляндия.

*atomic-energy.ru*



Ежемесячный рецензируемый и реферируемый **ПОЛНОЦВЕТНЫЙ**  
международный научный журнал  
«Альтернативная энергетика и экология»  
(ISJAEЕ)

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

## 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 «ТАТА» 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 (ISJAEЕ) 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: IFSSENT-2022, IFSSENT-2020, IFSSENT-2000, IFSSENT-2003 (собранный 350 участников из 12 стран), IFSSENT-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-BBMM-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.**

#### **Редакционная коллегия**

<p>Главный редактор:</p> <p>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</p>	<p>Почетный главный редактор:</p> <p>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</p>
--	--

<p>Почетный главный редактор (Россия):</p> <p>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</p>	<p>Почетный главный редактор (Россия):</p> <p>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</p>
<p>Зам. главного редактора:</p> <p>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</p>	<p>Заместитель главного редактора (Россия):</p> <p>Академик РАН Алдошин Сергей Михайлович ИПХФ РАН Тел.: +7(495)9935707, +7(49652)21930 e-mail: sma@icp.ac.ru</p>
<p><u>Ответственный секретарь:</u> к.ф.м.н. В.В. Назаров</p>	
<p>В редколлегию журнала входит около 300 человек из 50 стран мира.</p> <p><u>Редакционная коллегия:</u></p> <p>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 (Голландия), 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. Спазафумо (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.</p>	
<p><u>Редакция:</u></p> <p>Зав. редакцией – президент Международной ассоциации альтернативной энергетики и экологии, гл. редактор АЭЭ/ISJAEЕ 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 Щекин; 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.</p>	

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](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](http://iprbookshop.ru))

Журнал зарегистрирован Международным центром ЮНЕСКО в 2000 г. (название: «Аl'ternativnaâ ènergetika i ècologiâ»), краткое название: «Аl'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?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=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](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](http://iprbookshop.ru)).

Тематика Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» одобрена Международной ассоциацией водородной энергетики, редколлекцией 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 энергетике.

В журнале большое внимание уделяется экологическим и экономическим аспектам энергетике.

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 энергетике и экологию» (на русском языке) ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=9987](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 энергетике (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.

## 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 энергетике 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 энергетике и экологии, имеющих приоритетный характер.

*Важнейшей задачей журнала* является освещение приоритетов государственной политики: формирование междотраслевой 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 редколлегий.

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 Редколлекцией, 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 редколлекцией 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

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 Международного научного журнала «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;



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 ISJAEЕ» (на русском и на английском языках); реферированию в реферативном журнале International Scientific 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 ВИНТИ; 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 ISJAEЕ. Приоритетная справка уведомляет авторский коллектив о регистрации ру-



копии. 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-формате 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.





**Фото обязательно**  
(лицо крупным планом)  
ФИО (полное на  
английском  
и русском)

**Сведения об авторе:** степень, долж-  
ность, место работы.  
**Образование:** вуз, год окончания.  
**Область научных интересов:** связь с те-  
матикой журнала.  
**Публикации:** количество

**Information about the author:**  
**Education:**  
**Research area:**  
**Publications:**

**7. Текст реферата** (одна страница) для опубликования в реферативных журналах (РЖ) ВИНТИ, «Письма в журнал «Альтернативная энергетика и экология» (на английском языке).

Параметры страницы:

- **формат** А4 (210x297 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 (210x297 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 (210x297 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 ( $\beta$ ,  $\sin$ ,  $\exp$ ,  $\lim$ ), химических элементов

(H<sub>2</sub>O) и единиц измерения (МВт/см<sup>2</sup>) – прямым (обычным) шрифтом. Символы (R, ρ, ⊗, ∈ 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
$\Delta H$	Потери напора
i	Расчётный час
Буквы греческого алфавита	
$\eta$	КПД гидроагрегата
$\varphi$	Потери энергии за счёт взаимовлияния ВЭУ друг на друга
Буквы русского алфавита	
Э	Выработка
$\Delta Э$	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

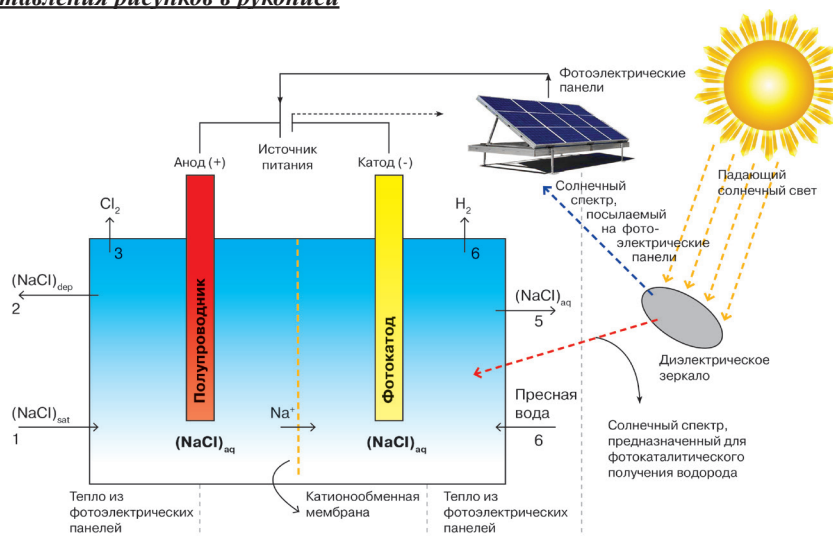


Рис. 1. Схематическое изображение комбинированного фотоэлектрохимического реактора непрерывного типа

Fig. 1. Schematic of the continuous hybrid photoelectrochemical reactor

Образец представления графиков в рукописи

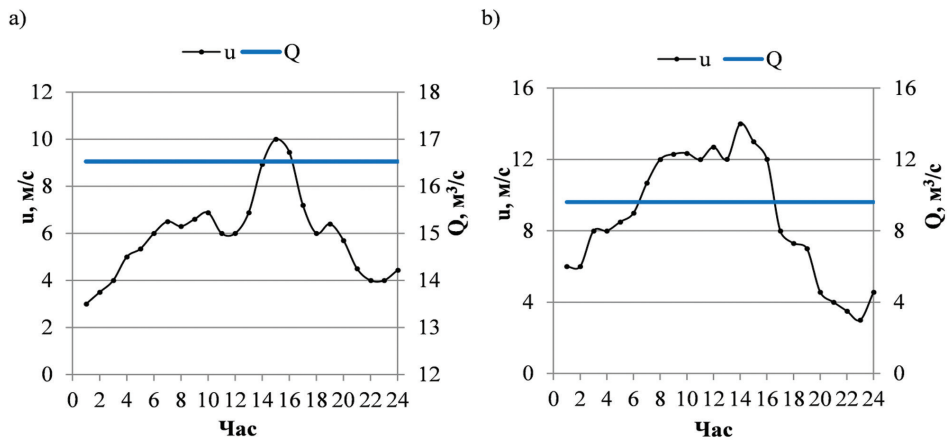


Рис. 1. Суточный ход скорости ветра и расходов реки: а – июнь, б – декабрь  
 Fig. 1. Wind speed and river flow daily variation: a – June; b – December

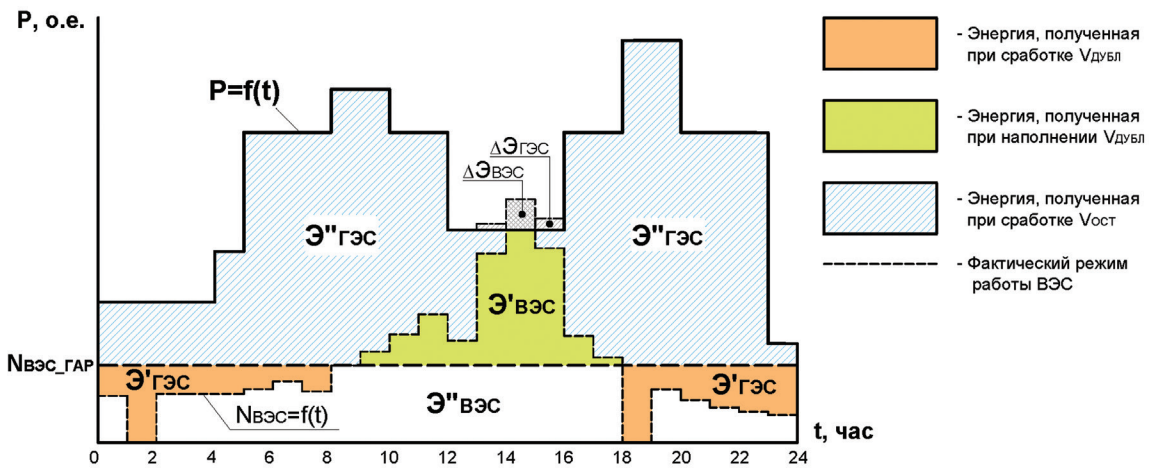


Рис. 1. Суточный график нагрузки и выработки энергии энергетическим комплексом ВЭС-ГЭС  
 Fig. 1. WPP/HPP power system daily-load and output curve

Образец представления формул в рукописи

$$\begin{cases} \mathcal{E}'_{ГЭС\_i} = \frac{\mathcal{E}_{ВЭС\_k}}{24} - \mathcal{E}_{ВЭС\_i}, & \text{при } \mathcal{E}_{ВЭС\_i} \leq \frac{\mathcal{E}_{ВЭС\_k}}{24}, \\ \mathcal{E}'_{ВЭС\_i} = \mathcal{E}_{ВЭС\_i} - \frac{\mathcal{E}_{ВЭС\_k}}{24}, & \text{при } \frac{\mathcal{E}_{ВЭС\_k}}{24} \leq \mathcal{E}_{ВЭС\_i}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{24} \mathcal{E}'_{ГЭС\_i} = \sum_{i=1}^{24} \mathcal{E}'_{ВЭС\_i}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_{ВЭС\_k}$  – суточная выработка энергии ВЭС за расчётные сутки  $k$ .

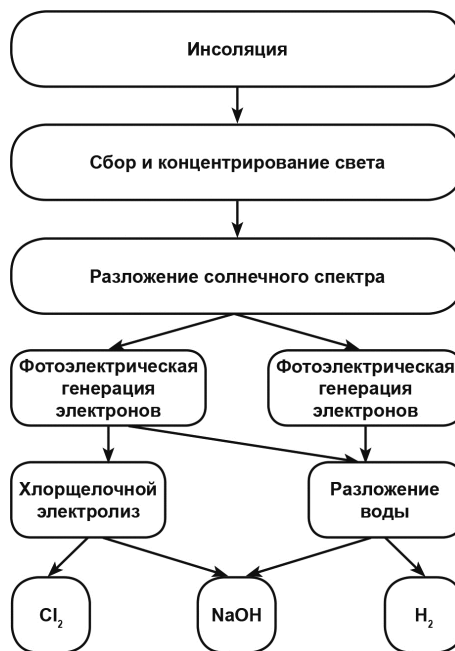
Образец представления схем в рукописи

Рис. 1. Схема работы комбинированного реактора  
 Fig. 1. Schematic description of the hybrid reactor operating mechanism

Образец представления таблиц в рукописи

Удельный массовый расход и концентрация растворов

Таблица 4

Definitions, mass flow rates and solute concentrations

Table 4

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	$\dot{m}_5 = \frac{0,68 (x_{s1} - x_{s2})}{x_{s5} (1 - x_{s2})} \dot{m}_1$	$x_{s5}$
6	Водород на выходе	$\dot{m}_6 = 0,02 \frac{(x_{s1} - x_{s2})}{(1 - x_{s2})} \dot{m}_1$	



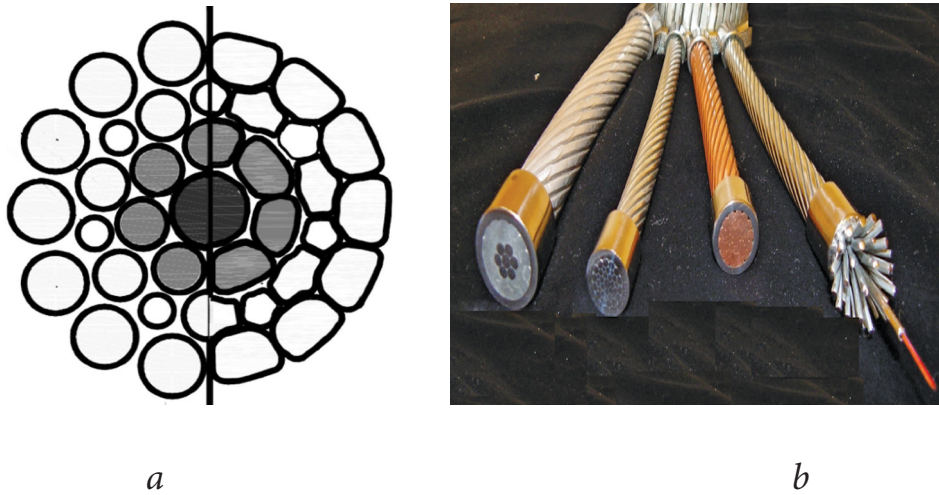
Образцы оформления фотографий и элементов графики в рукописи

Рис. 1. Внешний вид тросов. Разрез несущих тросов: а) круглой и б) 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. Гелетуша, Г.Г. Обзор технологий газификации биомассы [Текст] / Г.Г. Гелетуша, 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.

### 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. Польшман [и др.]; под ред. В.Г. Польшмана. – 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 сентября 2013 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 Н 04 В 1/38, Н 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



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](mailto: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.



**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 (MANUSKRIFT 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. Редакция 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.





**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 примечательных 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.

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

- Фабрикация и фальсификация 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,

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.





## 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. Везируглу 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» IFSSSENT-2000.
- Второй Международный симпозиум «Безопасность и экономика водородного транспорта» IFSSSENT-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» IFSSSENT-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.





**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.

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.



**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.



**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	<b>Квитанция об оплате или платежное поручение</b>	
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	Подписуточные подписи на русском языке	
12	Подписуточные 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





**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-ISJAEЕ -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, отчество 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:

- воспроизведение 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;
- распространение 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*



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 -ISJAEЕ и Form1-ISJAEЕ. 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-ISJAEЕ 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 Справки (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).*

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
«АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ»**

**ОФОРМЛЕНИЕ ПОДПИСКИ**

**Стоимость подписки на 2024 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 \$) (82 евро)  
6 месяцев – 12 000 рублей (180 \$) (165 евро)  
9 месяцев – 18 000 рублей (270 \$) (247 евро)  
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 - для 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](mailto:gusev@hydrogen.ru)

**Архивные выпуски (2017–2023 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](mailto: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 %).

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 (2017–2023 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 (2000–2016 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» (2000–2023 гг.) – более 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» (2000–2023 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» (2000–2023 гг.) – более 400 номеров журнала – электронная версия – на CD-диске 200 000 рублей (4000 \$) (4000 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).**





### 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





## I. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА



### 1. Солнечная энергетика

- А.Штейнфельд* (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. Фотозлектрические 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**  
**2-4-0-0 Парусная 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»)

- 7-1-0-0 Применение льда в энергетике. Ледяные электростанции
- 7-2-0-0 Использование холода вечной мерзлоты для термостабилизации 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, Колумбия, Университет Миссури) (МРК)
- 9-1-0-0 Атомно-водородная энергетика**
- Н.Н. Пономарев-Степной*, 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 ( $T = 1000$  °С) методами**
- 9-1-3-0 Быстрые реакторы с натриевым охлаждением (БН) для получения среднетемпературного тепла ( $T = 500$  °С), производства синтетического газа и водорода**

- 9-1-4-0 Быстрые реакторы со свинцовым охлаждением (БРЕСТ) как реакторы следующего поколения для получения высокотемпературного тепла ( $T > 500$  °С)**

*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**



- 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) (МНКСП)  
**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) (МНКСП)  
*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. Сривастава* (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 наноструктурах  
*О.Н. Ефимов* (Россия, Черноголовка, ИПХФ РАН) (МРК)  
*Б.К. Гунта* (Индия, Варанаси, Университет Банарас Хинди) (МРК)  
*А.В. Вахрушев* (Россия, Ижевск, Институт прикладной механики УрО РАН) (МРК)  
**12-4-2-0** В инкапсулированном газообразном состоянии: в ми-

- кросферах, 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 перспективных технологий) (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. Шеевков* (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») (МНКСП)  
*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 металлургических системах  
*М.Д. Хэмpton* (США, Орlando, Университет Центральной Флориды) (ЗГР)  
*Б.П. Тарасов* (Россия, Черноголовка, ИПХФ РАН) (МНКСП)  
*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») (МНКСП)  
*В. В. Лунин*, акад. РАН (Россия, Москва, МГУ) (РНС)  
**12-5-1-0** Радиолиз  
*М.А. Прелас* (США, Колумбия, Университет Миссури-Колумбия) (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





**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 метода для 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. Каченко* (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-Грегуюар* (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 термовакuumных 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. Гертинг* (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.Л. 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») (МРК)

**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») (МРК)

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 Аккумуляция электрической энергии  
15-2-0-0 Сверхпроводящие материалы. Сверхпроводимость. Сверхпроводимость в энергетике  
15-3-0-0 Новые циклы и схемы трансформаторов  
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) (PHC)  
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. Энергоназор (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 экокортурты  
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) (МНКСП)  
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. Ильяева* (Россия, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ) (МНКСП)  
*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) (МНКСП)  
*Ж.-П. Коцнен* (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 запасы  
24-3-0-0 Государственные научно-технические программы развития водородной энергетики

## 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 электроразряженных 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. Исмаилов (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**

- 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 Наноконпозиты 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. Саранулова (Россия, Иркутск, НИТУ)

- 37-1-0-0 Защита от образования метаногидратов при добыче газа



## XVII. ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И УСТРОЙСТВА



### 38. Оптические явления и устройства

РНС — Редакционный научный совет; МРК — Международный редакционный комитет;

МНКСП — Международный научно-консультативный совет редакции;

ЭС — Экспертный совет; МСР — Международный совет рецензентов



## 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) (МНКСП)  
 Е.М. Тарараева (Россия, Москва, Дор ЦНИИАтоминформ) (МНКСП)  
 Е.А. Гуолин (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




**I. RENEWABLE ENERGY**

**1. Solar energy**

- A. Steinfeld* (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, Turkmenian Polytechnic Institute) (IEB)  
*V.F. Gremenok* (Belorussia, Minsk, Jointed 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**

- 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

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**



## 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,**





## 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 encapsulated 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



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. Berezhenko* (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, VNIIEO)

##### 12-8-7-0 New structural materials for renewable energy structures

##### 12-9-0-0 Synthesis-gas production methods

*A.Yu. 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. Kyrshva* (Russia, Sarov, STC «TATA») (IEB)

#### 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») (IEB)

#### 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





**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 ground 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 aggressive 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 analysis in renewable energy  
*V.A. Khushnudinov* (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)**



## 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

*A.Л. Гусев* (Россия, Саров, НТЦ «ТАТА»)



## 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. Саранулова (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, CNIATOMINFORM) (IEAB)*

*E.M. Tararava (Russia, Moscow, CNIATOMINFORM) (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**

**41-14-0-0 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

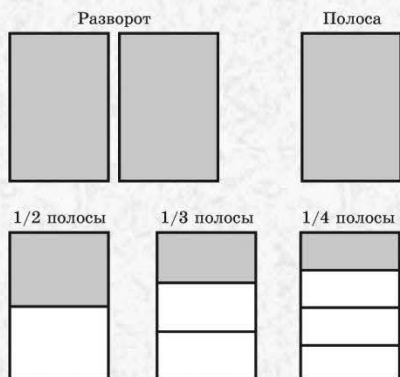
IRB — International Reviewers Board



## РЕКЛАМА В МЕЖДУНАРОДНОМ НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ»

Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» приглашает научные институты, 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 полупропорциональный. 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
<b>СИСТЕМА СКИДОК</b>		
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.

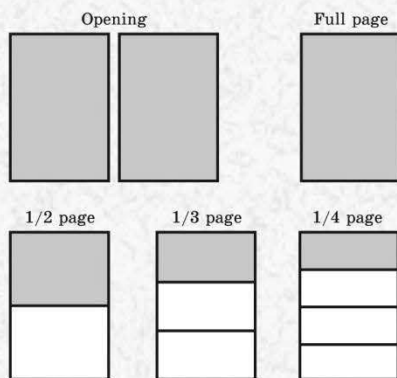




## ADVERTISEMENT IN INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL FOR ALTERNATIVE ENERGY AND ECOLOGY

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 200dpi, colour — of 250–400dpi.

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)
1 <sup>st</sup> page of the cover (full-coloured)	160x145 мм	10000
Full opening in two pages	257x336 мм	1000
2 <sup>nd</sup> or 3 <sup>d</sup> 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.



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](mailto:gusev@hydrogen.ru); [ceo@yaalgusev.ru](mailto:ceo@yaalgusev.ru); [alexandergusev777@gmail.com](mailto: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/Science_Montenegro); <https://t.me/HYDROGENinstitute>  
 Для справок: e-mail: [info@hydrogen.ru](mailto:info@hydrogen.ru)

452613, Russia, Bashkortostan Rep., Oktyabrsky, 35th mkrn., house 9a, Post Box Office 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](mailto:gusev@hydrogen.ru), <http://isjaee.com>

Information: [gusev@hydrogen.ru](mailto:gusev@hydrogen.ru); [ceo@yaalgusev.ru](mailto:ceo@yaalgusev.ru); [alexandergusev777@gmail.com](mailto: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/Science_Montenegro); <https://t.me/HYDROGENinstitute>  
 Reference: e-mail: [info@hydrogen.ru](mailto:info@hydrogen.ru)

*Международный научный журнал  
 «Альтернативная энергетика и экология»*

Подписано в печать 29.03.2024  
 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»).*