

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ



RENEWABLE

ЭНЕРГЕТИКА

ENERGY



ЭНЕРГОКОМПЛЕКСЫ НА ОСНОВЕ ВИЭ

RES BASED POWER COMPLEXES

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГЕТИКИ  
И АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

INNOVATIVE SOLUTIONS IN THE FIELD OF ENERGY  
AND ALTERNATIVE ENERGY

Статья поступила в редакцию 09.01.24 Ред. Пер. № 320-001-24

The article has entered in publishing office 09.01.24 Ed. Reg. No 320-001-24

УДК 681.5 (681.5.013)



# СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ В СОСТАВЕ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ



*Олег Андреевич Вавилов<sup>1</sup>, Валерий Дмитриевич Юркевич<sup>2</sup>,  
Дмитрий Владиславович Коробков<sup>3</sup>*

<sup>1,2,3</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия,

<sup>1</sup>vavilov.oleg.rp462@gmail.com

<sup>2</sup>yurkev

@mail.ru

<sup>3</sup>korobkov

@corp.nstu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.01.012-022

Заключение совета рецензентов: 18.01.24 Заключение совета экспертов: 20.01.24 Принято к публикации: 23.01.24

В данной работе рассматривается задача синтеза двухконтурной системы управления для трехфазного инвертора напряжения, предназначенного для использования в автономной системе электроснабжения. Подобный DC/AC преобразователь является неотъемлемым звеном в системах электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии в качестве первичных, и, соответственно, должен удовлетворять требованиям на качество генерируемой электроэнергии. Данные требования обеспечиваются за счет схемотехнических решений, а также с помощью построения высокоточных систем автоматического управления. В работе предложен метод расчета параметров ПИ-регуляторов с резонансными составляющими, основанный на использовании метода разделения движений и позволяющий осуществить независимую настройку компонент регуляторов. При этом введение резонансной составляющей обеспечивает высокую точность слежения для заданной основной гармоники сетевого напряжения и селективное подавление внешних гармонических воздействий. Предложенный подход позволяет синтезировать САР, значительно улучшающую качество выходных параметров инвертора напряжения.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии; гибридные системы электроснабжения; инвертор напряжения; система автоматического управления; метод разделения движений; ПИ-регулятор, резонансный регулятор.

*Олег Андреевич Вавилов, Валерий Дмитриевич Юркевич, Дмитрий Владиславович Коробков. Синтез системы автоматического регулирования для инвертора напряжения в составе автономной системы электроснабжения// Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 01 (418) 2024, с. 12-16.*

*Oleg A. Vavilov, Valery D. Yurkevich, Dmitry V. Korobkov. Synthesis of an automatic control system for a voltage inverter for autonomous power supply system// Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 01(418) 2024, pp. 12-16*

# SYNTHESIS OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR A VOLTAGE INVERTER FOR AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEM

*Oleg A. Vavilov<sup>1</sup>, Valery D. Yurkevich<sup>2</sup>, Dmitry V. Korobkov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation, vavilov.oleg.rp462@gmail.com

<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation, yurkev@mail.ru

<sup>3</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation, korobkov@corp.nstu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2024.01.012-022

Referred: 18.01.24

Received in revised form: 20.01.24

Accepted: 23.01.24

This paper examines the problem of synthesizing a two-loop control system for a three-phase voltage inverter designed for an autonomous power supply system. This type of DC/AC converters is an essential part of power supply systems with renewable energy sources as primary sources, and, accordingly, must correspond to the requirements for the electric power quality. These requirements are met through circuit design solutions, as well as through the construction of high-precision automatic control systems. The paper proposes a method for calculating the parameters of PI controllers with resonant components, based on the time-scale separation method and allowing independent adjustment of the controller components. The introduction of a resonant component ensures high tracking accuracy for a desired main voltage harmonic and selective suppression of external harmonic influences. The proposed approach allows to synthesize an automatic control system that significantly improves the quality of the voltage inverter output parameters.

**Keywords:** renewable energy sources; hybrid power supply systems; voltage inverter; automatic control system; time-scale separation method; PI controller, resonant controller.

## Сведения об авторе:

**Место работы:** аспирант кафедры «Автоматики» факультета «Автоматики и Вычислительной техники», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

**Образование:** Новосибирский государственный технический университет.

**Область научных интересов:** системы автоматического управления, силовые преобразователи, инверторы напряжения, широтно-импульсная модуляция, синтез регуляторов, автоматизация.

**Публикации:** 5 публикаций в изданиях, индексируемых РИНЦ.

## Information about the author:

**Place of work:** postgraduate student of the Department of Automation, Faculty of Automation and Computer Science, Novosibirsk State Technical University.

**Education:** Novosibirsk State Technical University.

**Research interests:** automatic control systems, power converters, voltage inverters, pulse-width modulation, controller synthesis.

**Publications:** 5 publications indexed by the Russian Science Citation Index.



Вавилов  
Олег Андреевич  
Oleg A. Vavilov



Юркевич  
Валерий Дмитриевич  
Valery D. Yurkevich

#### Сведения об авторе:

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

**Образование:** Новосибирский электротехнический институт.

**Научное звание:** профессор.

**Ученая степень:** доктор технических наук.

**Область научных интересов:** нелинейные системы управления, сингулярные возмущения в теории управления, цифровые системы управления, управление полетом, системы управления с распределенными параметрами, робототехника, импульсные преобразователи электроэнергии, возобновляемые источники энергии.

**Публикации:** более 250 научных статей и докладов на конференциях, 2 монографии, 3 учебных пособия, 6 изобретений.

#### Сведения об авторе:

**Место работы:** старший преподаватель кафедры «Электроники и Электротехники», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», ведущий конструктор проектов силовой электроники автономных систем электроснабжения.

**Образование:** Новосибирский государственный технический университет.

**Область научных интересов:** силовые преобразователи, автономные системы электроснабжения, БАС.

**Публикации:** более 60 публикаций, РИД 16.

#### Information about the author:

**Place of work:** Novosibirsk State Technical University, Professor of the Automation Department.

**Education:** Novosibirsk Electro-Technical Institute.

**Scientific title:** Professor.

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

**Research interests:** nonlinear control systems, singular perturbations in control theory, digital control systems, flight control, distributed parameter control systems, robotics, switching controllers for power converters, renewable energy sources.

**Publications:** more than 250 scientific articles and reports at conferences, 2 monographs, 3 teaching manuals, 6 inventions.

#### Information about the author:

**Place of work:** senior lecturer of the Department of Electronics and Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University, leading designer of power electronics projects for autonomous power supply systems.

**Education:** Novosibirsk State Technical University.

**Research interests:** power converters, autonomous power supply systems, RPAS.

**Publications:** more than 60 publications, 16 intellectual products.

## Введение

За последние десятилетия использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности, энергии ветра и солнца, существенно возросло, и в будущем ожидается дальнейшее увеличение, что, по прогнозам, приведет к сокращению выбросов парниковых газов [1-4]. Однако спорадический характер возобновляемых источников влияет как на качество электроэнергии, так и на экономическую конкурентоспособность систем энергоснабжения, оснащенных как возобновляемыми, так и традиционными источниками. Кроме того, в современных многоагентных системах электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии существенную роль играет наличие растущего количества электротранспорта с соответствующей зарядной инфраструктурой [5-8].

Поддержка технологий систем краткосрочного и долгосрочного хранения энергии (систем накопления

энергии – СНЭ) необходима для интеграции ВИЭ в основную сеть [9-14]. Однако из-за низкой плотности энергии и саморазряда аккумуляторные СНЭ могут использоваться только для кратковременного хранения [15]. Среди различных долгосрочных технологий аккумуляторных систем использование водородных СНЭ является одним из наиболее перспективных вариантов, поскольку оно является экологически чистым и обладает высокой плотностью энергии [9]. Водород производится электролизом, хранится в резервуарах для хранения и повторно электризуется топливными элементами для удовлетворения потребностей в электроэнергии и контрактных требований. С целью повышения надежности систем генерации электроэнергии, основанных на использовании возобновляемых источников энергии, данные системы чаще всего проектируются в качестве гибридных, с



одновременным использованием нескольких различных первичных источников энергии, таких как солнечные батареи, ветровые турбины или топливные элементы [16-17]. Так называемые микросети, создаваемые комбинацией ВИЭ и СНЭ, требуют внедрения стратегий управления, учитывающих ограничения оборудования, его износ и затраты [15, 18-26].

Стратегия управления энергообменными процессами в многоагентных системах преследует несколько целей. При минимизации эксплуатационных расходов стратегия управления строится на прогностических моделях деградации структурных элементов системы и стохастических моделях энергообменных процессов [6, 9, 27]. Основным фактором сокращения срока службы батарей являются частые циклы заряда/разряда. Для увеличения срока службы водородных накопителей ограничивают интенсивность их использования, удерживая энергообменные процессы внутри предельных значений допустимых мощностей. Стратегия управления учитывает такие процессы в

водородных накопителях, как холодный и теплый запуски, потребление в режиме ожидания, минимальное время включенного/выключенного состояния [5]. Немаловажным фактором, влияющим на стратегию управления, являются аварийные режимы работы системы [13, 28-29].

Для эффективной интеграции накопителей в многоагентную систему электроснабжения используются электронные устройства типа статических преобразователей (устройства силовой электроники), обеспечивающие энергетическую связь накопителей с нагрузкой. Поэтому в состав структуры гибридной системы генерации электроэнергии (Рис. 1) помимо первичных источников энергии должны входить преобразователи энергии, такие как, например однофазные или трехфазные инверторы напряжения (ИН), служащие для питания потребителей электроэнергии переменного тока или передачи энергии в общую сеть [17].

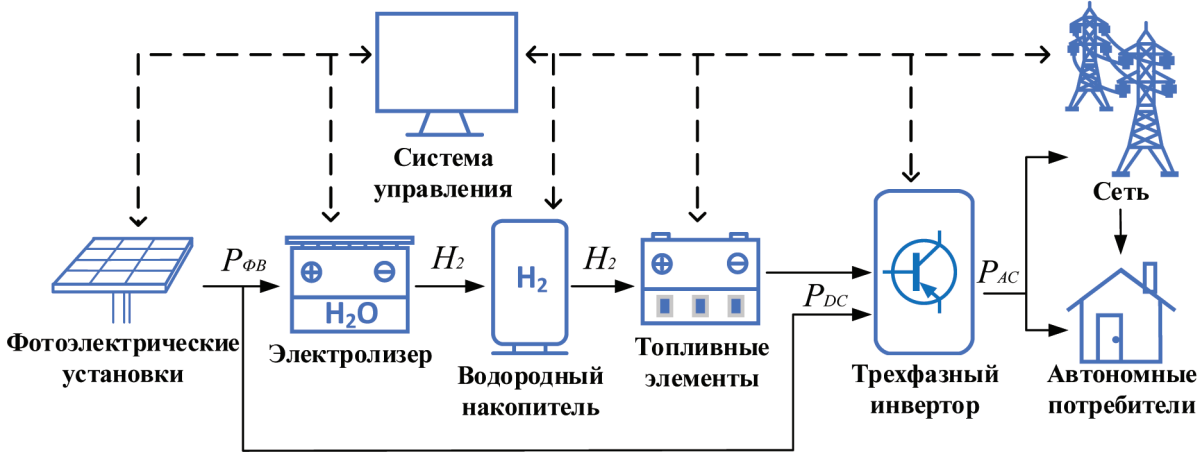


Рис. 1. Структурная схема автономной системы электроснабжения  
Fig 1. Block diagram of an autonomous power supply system

Проектирование энергоэффективных гибридных систем генерации электроэнергии является сложной комплексной проблемой, решение которой требует применения методов системного анализа при разработке и согласования технических характеристик и режимов работы отдельных узлов и агрегатов в их составе [30-32]. В центре внимания данной работы находится такой элемент гибридной системы генерации электроэнергии, как автономный инвертор напряжения, применяемый для питания выходной шины переменного тока и, в частности, рассмотрена задача проектирования системы управления для подобного преобразователя.

Одной из проблем, возникающей при эксплуатации автономных систем генерации трехфазного напряжения, является возможность возникновения существенной несимметрии нагрузок фаз. В этих условиях эффективное формирование трехфазного пере-

менного напряжения можно обеспечить, применяя трехфазные четырехпроводные инверторы с нулевой шиной [33]. При этом точность формирования заданных параметров генерируемого переменного напряжения в условиях несимметрии нагрузок фаз и значительных изменений величин этих нагрузок обеспечивается за счет проектирования эффективной системы управления ИН. В системах управления инверторами напряжения наибольшее распространение получило применение пропорционально-интегральных (ПИ) регуляторов. При этом один из способов повышения точности формирования заданных параметров генерируемого переменного напряжения состоит в применении резонансных регуляторов [34-38], основным достоинством которых является возможность независимой настройки резонансных составляющих для высокоточного отслеживания частоты основной несущей гармоники и селективной компенсации ча-



стот заданных высших гармоник. В частности, двухконтурная система управления с пропорциональным резонансным регулятором для трехфазного инвертора напряжения с четырьмя стойками была рассмотрена в работе [39], в которой применялся аппарат диаграмм Боде и метод корневого годографа. Структура и методика расчета пропорционального резонансного регулятора с компенсацией запаздывания в контуре регулирования, обусловленного цифровой реализацией алгоритма управления, была предложена в работе [40].

Особенность представленной здесь работы состоит в применении метода разделения движений [41-42] и принципа внутренней модели [43-45] при про-

ектировании двухкаскадной системы управления с ПИ резонансным регулятором в трехфазном четырехпроводном инверторе напряжения с нулевой шиной. В работе предложена методика расчета резонансного ПИ регулятора с независимым расчетом ПИ составляющих и резонансных компонент регулятора, за счет применения метода разделения движений. Показано, что применение предлагаемого метода расчета регулятора позволяет значительно повысить точность формирования заданного трехфазного напряжения в условиях несимметрии нагрузок фаз и значительных изменений величин этих нагрузок. В работе также приведены результаты численного моделирования предлагаемой системы управления.

**Таблица сокращений**

Сокращения	
НГТУ	Новосибирский государственный технический университет
ИН	Инвертор напряжения
АС	Переменный ток
DC	Постоянный ток
ВИЭ	Возобновляемый источник энергии
СНЭ	Система накопления энергии
ПИ-регулятор	Пропорционально-интегральный регулятор
ШИМ	Широтно-импульсная модуляция
ПМД	Подсистема медленных движений
ПБД	Подсистема быстрых движений
САР	Система автоматического регулирования
Г-образный	соединенный способом, похожим на букву «Г».
Буквы греческого алфавита	
$\mu_1$	Постоянная времени подсистемы быстрых движений во внутреннем контуре
$\mu_2$	Постоянная времени подсистемы быстрых движений во внешнем контуре
$\eta$	Степень разделения быстрых и медленных процессов
$\tau$	Постоянная времени
$\xi$	Коэффициент демпфирования
$\omega_1$	Частота основной гармоники выходного напряжения инвертора
Буквы латинского алфавита	
$U_{DC}$	Напряжение во входном звене постоянного тока
$C_{IN}$	Входные конденсаторы, напряжение на каждом из которых равно $U_{DC}/2$

$L_1$ и $C$	Индуктивность и емкость Г-образного LC-фильтра
$I_{L1}$	Среднее значение тока, протекающего через индуктивность LC-фильтра за один период ШИМ.
$I_{L2}$	Среднее значение тока, протекающего через индуктивность нагрузки за один период ШИМ.
$U_C$	Среднее значение напряжения на конденсаторе фильтра за один период ШИМ
$U_{LOAD}$	Напряжение нагрузки инвертора
$e_p, e_U$	Ошибки регулирования тока и напряжения
$u_M$	Модулирующий сигнал
$L_2$ и $R$	Индуктивность и сопротивление активно-индуктивной нагрузки
$E_{IN}$	Напряжение между средней точкой входного звена конденсаторов постоянного тока и одним из фазных выходов инвертора
$k_{RI}$	Коэффициент усиления регулятора
$k_{res}$	Резонансный коэффициент усиления
$T_1$	Постоянная времени подсистемы медленных движений во внутреннем контуре
$T_2$	Постоянная времени подсистемы медленных движений во внешнем контуре
$W_{PI2}(s)$	Передаточная функция внешнего ПИ-регулятора
$\cos(\varphi)$	Косинус угла $\varphi$
$f_{LOAD}$	Частота напряжения нагрузки инвертора
$s, p$	Оператор Лапласа
$t_p$	Время переходных процессов
Единицы измерения	
Гц	Герц



кГц	Килогерц
кВА	Киловольт-ампер
мкГн	микрогенри

мкФ	микрофарад
мкс	микросекунда
В	Вольт

### 1. Постановка задачи

В данной работе рассматривается синтез системы управления для силового преобразователя, представляющего собой трехфазный двухуровневый инвертор напряжения (ИН) с выходным Г-образным LC-фильтром и синусоидальной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Данный инвертор предназначен для работы в составе автономной системы электроснабжения для питания потребителя переменного тока с постоянной частотой 50 Гц, в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013 [46]. Преобразователь включает в себя шесть полупроводниковых ключей, образующих три фазных стойки с соединением средней точки конденсаторов входного звена постоянного тока и нейтрали нагрузки, за счет чего обеспечивается независимая работа фаз. Для генерирования импульсов управления полупроводниковыми ключами используется трехфазная скалярная ШИМ (PWM), в составе которой три двухполярных однофазных синусоидальных сигнала, называемых также модулирующими сигналами, сравниваются с пилообразным

опорным напряжением, и формирует прямоугольные управляющие импульсы в моменты таких сравнений. Частота модулирующих сигналов задается равной 50 Гц, т.е. требуемой частоте первой гармоники выходного напряжения, а частота опорного сигнала соответствует частоте коммутации полупроводниковых ключей. Импульсы управления для ключей в фазных стойках генерируются независимо друг от друга со сдвигом на 120°. Выходной Г-образный LC-фильтр предназначен для повышения качества генерируемого напряжения за счет подавления высших комбинационных гармонических составляющих токов и напряжений на выходе ИН. В данной работе для упрощения расчетов величины паразитных сопротивлений фильтра принимаются пренебрежимо малыми, и учитываются только реактивные компоненты – катушки индуктивности и конденсаторы. Соответствующая структурная схема, включающая силовую схему и двухконтурную систему автоматического регулирования (САР) представлена на Рис. 2.

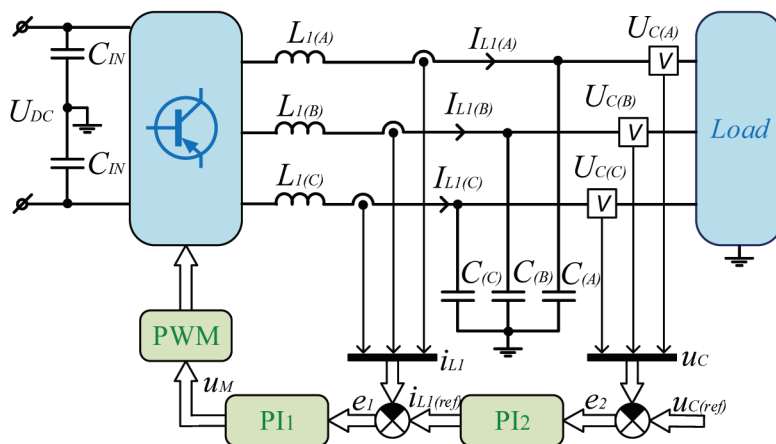


Рис. 2. Структурная схема рассматриваемой системы генерирования переменного тока  
 Fig 2. Block diagram of the considered AC generation system

Здесь  $U_{DC}$  – напряжение во входном звене постоянного тока, питающем преобразователь;  $C_{IN}$  – входные конденсаторы, напряжение на каждом из которых принимается равным  $U_{DC}/2$ ;  $L_1$  и  $C$  – индуктивность и емкость Г-образного LC фильтра;  $I_{L1}$  – ток, протекающий через индуктивность LC-фильтра;  $I_{L2}$  – ток, протекающий через индуктивность нагрузки;  $U_C$  – напряжение нагрузки инвертора, равное напряжению на фильтровом конденсаторе. Предполагается, что нагрузка имеет активно-индуктивный характер. Информация о токе и напряжении с датчиков в силовой схеме передается в три независимые пофазные двухконтурные системы регулирования, которые формируют

модулирующий сигнал  $u_M$  для ШИМ. Рассматриваемая САР включает в себя ПИ регулятор по выходному напряжению во внешнем контуре и ПИ-регулятор по току фильтра во внутреннем контуре. Сигналы  $e_I$  и  $e_U$  на Рис. 2 отражают ошибки регулирования по току и напряжению:

$$e_I(t) = I_{L1(ref)}(t) - I_{L1}(t), \tag{1}$$

$$e_U(t) = U_{C(ref)}(t) - U_C(t), \tag{2}$$

Для решения задачи синтеза регуляторов в системе управления необходимо рассмотреть математическую модель обсуждаемой силовой схемы. На основе схемы преобразователя (Рис. 2) была получена математическая модель для одной

International Publishing House of scientific periodicals «Space»

Международный издательский дом научной периодики «Спейс»

фазы ИН в виде системы дифференциальных уравнений для средних на периоде ШИМ значений токов и напряжений:

$$\begin{cases} \frac{dI_{L1}}{dt} = -\frac{1}{L_1}U_C + \frac{U_{DC}}{2L_1}u_M, \\ \frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{1}{L_2}U_C, \\ \frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C}I_{L1} - \frac{1}{C}I_{L2} - \frac{1}{RC}U_C. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $L_2$  и  $R$  – параметры активно-индуктивной нагрузки,  $I_{L2}$  – ток, протекающий через индуктивность нагрузки. В условиях высокой частоты коммутации ключей ИН и равенства напряжений на входных конденсаторах связь средней величины напряжения на выходе инвертора с величиной модулирующего сигнала  $u_M$  на входе скалярной синусоидальной ШИМ можно выразить следующим соотношением:

$$E_{IN} = \frac{U_{DC}}{2} \cdot u_M,$$

где  $E_{IN}$  – напряжение между средней точкой входного звена конденсаторов постоянного тока и одним из фазных выходов инвертора [47].

Полученная математическая модель (3) для описания токов и напряжений в ИН с фильтром представлена в виде:

$$\begin{cases} \frac{dI_{L1}}{dt} = -k_1U_C + k_2u_M, \\ \frac{dI_{L2}}{dt} = k_5U_C, \\ \frac{dU_C}{dt} = k_3I_{L1} - k_3I_{L2} - k_4U_C, \end{cases} \quad (4)$$

где введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} k_1 &= 1 / L_1, \\ k_2 &= U_{DC} / 2L_1, \\ k_3 &= 1 / C, \\ k_4 &= 1 / RC, \\ k_5 &= 1 / L_2. \end{aligned}$$

На основе данной математической модели в дальнейшем рассматривается предлагаемая в работе методика синтеза двухконтурной САР.

## 2. Синтез двухконтурной системы управления на основе метода разделения движений

На первом этапе проводится расчет параметров регулятора тока для внутреннего контура регулирования, где в качестве входа (управляющего воздействия) рассматривается модулирующий сигнал  $u_M$  для ШИМ, а выходом является ток  $I_{L1}$ , протекающий через индуктивность LC-фильтра. Тогда, из системы уравнений (4), используя преобразование Лапласа, можно получить следующую передаточную функцию:

$$W_1(s) = \frac{I_{L1}(s)}{u_M(s)} = \frac{k_2(s^2 + k_4s + k_3k_5)}{s^3 + k_4s^2 + (k_1k_3 + k_3k_5)s}, \quad (5)$$

где необходимо отметить, что полином числителя полученной передаточной функции (5) является устойчивым.

В качестве регулятора для внутреннего контура регулирования рассматривается ПИ регулятор (Рис.2), передаточная функция которого представлена в следующем виде:

$$W_{PI}(s) = k_{R1} \frac{s + T_1^{-1}}{\mu_1 s}, \quad (6)$$

где  $k_{R1}$  – коэффициент усиления регулятора;  $\mu_1$  – малый положительный параметр;  $T_1$  – положительная постоянная времени. В данном разделе представлена методика выбора данных параметров алгоритма управления (6) в соответствии с требованиями к процессам в системе управления.

Из выражений (5) и (6) следует передаточная функция для замкнутого контура регулирования по току  $I_{L1}$ :

$$\begin{aligned} W_I(s) &= \frac{W_1(s) \cdot W_{PI}(s)}{1 + W_1(s) \cdot W_{PI}(s)} = \\ &= \frac{k_2 k_{R1} (s^2 + k_4s + k_3k_5)(s + T_1^{-1})}{A_I(\mu_1, s)}, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} A_I(\mu_1, s) &= \mu_1 s^4 + (k_4\mu_1 + k_2k_{R1})s^3 + \\ &+ (k_1k_3\mu_1 + k_3k_5\mu_1 + k_2k_{R1}T_1^{-1} + k_2k_4k_{R1})s^2 + \\ &+ (k_2k_{R1}k_3k_5 + k_2k_4k_{R1}T_1^{-1})s + k_2k_{R1}k_3k_5T_1^{-1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Коэффициенты характеристического полинома (8) для передаточной функции (7) зависят от малого параметра  $\mu_1$ , что приводит к возникновению разнотемповых процессов в замкнутой системе контура регулирования током  $I_{L1}$ . Анализ условий устойчивости и расчетные соотношения для параметров ПИ-регулятора (6) в контуре тока можно получить на основе анализа корней полинома (8) с помощью метода разделения движений [41-42]. В соответствии с данным методом, из характеристического полинома (8) был получен характеристический полином подсистемы медленных движений (ПМД):

$$\begin{aligned} A_{I(ПМД)}(s) &= \lim_{\mu_1 \rightarrow 0} A_I(\mu_1, s) = \\ &= k_2 k_{R1} (s^2 + k_4s + k_3k_5)(s + T_1^{-1}). \end{aligned} \quad (9)$$

Принимая во внимание устойчивость полинома в числителе передаточной функции (5), устойчивость процессов в подсистеме медленных движений внутреннего контура обеспечивается выбором  $T_1 > 0$ . Постоянную времени  $T_1$  можно рассчитать на основе требования к желаемой длительности  $t_p$  переходных процессов по току  $I_{L1}$  с помощью следующего соотношения:

$$t_p \approx 4T_1.$$

С целью выделения полинома подсистемы быстрых движений внутреннего контура необходимо выполнить в (8) замену  $s=p/\mu_1$  и умножить полученное выражение на  $\mu_1^3$ . Затем, выполняя предельный переход  $\mu_1 \rightarrow 0$ , было получено выражение:

$$\lim_{\mu_1 \rightarrow 0} \left( A_I \left( \mu_1, \frac{p}{\mu_1} \right) \cdot \mu_1^3 \right) = p^3 (p + k_2 k_{R1}) . \quad (10)$$

После умножения (10) на  $p^{-3}$  и выполнения замены  $p=\mu_1 s$ , получен полином ПБД в следующем виде:

$$A_{I(\text{ПБД})}(s) = \mu_1 s + k_2 k_{R1} . \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что при  $\mu_1 > 0$  устойчивость быстрых процессов в замкнутой системе для контура регулирования током  $I_{L1}$  обеспечивается условием  $k_2 k_{R1} > 0$ . В данном случае рекомендуется принять коэффициент усиления регулятора  $k_{R1}$  равным  $1/k_2$ . Тогда постоянная времени подсистемы быстрых движений  $\mu_1$  выбирается с учетом требований на степень разделения темпов быстрых и медленных процессов во внутреннем контуре на основе следующего соотношения:

$$\mu_1 = \frac{\min\{\tau, T_1\}}{\eta} , \quad (12)$$

где степень разделения темпов быстрых и медленных процессов задается параметром  $\eta$ , например,  $\eta \geq 10$ . Здесь темп протекания медленных процессов, согласно выражению (9), определяется постоянными времени  $T_1$  и  $\tau$ , где

$$\tau = 1 / \sqrt{k_3 k_5} .$$

Разделение темпов быстрых и медленных процессов для устойчивых характеристических полиномов ПМД (9) и ПБД (11) позволяет обеспечить устойчивость процессов в замкнутом контуре регулирования током  $I_{L1}$ , в котором для установившегося режима из выражения (7) следует  $I_{L1} = I_{L1(\text{ref})}$ .

На втором этапе выполняется расчет параметров регулятора для внешнего контура регулирования фазным напряжением  $U_C$  на выходе LC-фильтра при условии, что имеет место установившийся режим во внутреннем контуре регулирования током, при котором  $I_{L1} = I_{L1(\text{ref})}$ . При данном дополнительном условии из системы уравнений (4) получена следующая передаточная функция:

$$W_2(s) = \frac{u_C(s)}{i_{L1}(s)} = \frac{k_3 s}{s^2 + k_4 s + k_3 k_5} . \quad (13)$$

Структурная схема для расчета регулятора во внешнем контуре управления фазным напряжением  $U_C$  принимает вид, представленный на Рис.3.

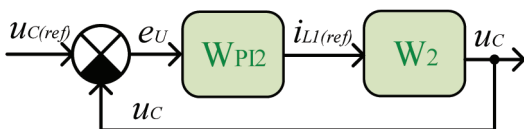


Рис. 3. Структурная схема для синтеза внешнего контура САУ

Fig. 3. Schematic block diagram for the automatic control system outer loop design

Особенность данной работы состоит в использовании в контуре регулирования выходного напряжения  $U_C$  (Рис.3) резонансного ПИ-регулятора с передаточной функцией  $W_{PI2}(s)$  следующего вида:

$$W_{PI2}(s) = k_{R2} \frac{s + T_2^{-1}}{\mu_2 s} \left( 1 + \frac{k_{res} s}{s^2 + \omega_1^2} \right) , \quad (14)$$

где  $\mu_2$  есть малый положительный параметр алгоритма управления (14).

Здесь, в отличие от регулятора тока с передаточной функцией (5) для внутреннего контура, регулятор напряжения с передаточной функцией (14) для внешнего контура содержит дополнительный множитель с параметрами  $k_{res}$  и  $\omega_1$ , где  $\omega_1$  – частота основной гармоники выходного напряжения инвертора.

В соответствии со структурной схемой на Рис.3 и выражениями (13) и (14), получена передаточная функция замкнутой системы для внешнего контура регулирования по напряжению  $U_C$ :

$$W_U(s) = \frac{W_2(s) \cdot W_{PI2}(s)}{1 + W_2(s) \cdot W_{PI2}(s)} = \frac{k_{R2} k_3 (s + T_2^{-1})(s^2 + k_{res} s + \omega_1^2)}{A_U(\mu_2, s)} , \quad (15)$$

где

$$A_U(\mu_2, s) = \mu_2 s^4 + (k_{R2} k_3 + k_4 \mu_2) s^3 + (k_{R2} k_3 k_{res} + k_{R2} k_3 T_2^{-1} + k_3 k_5 \mu_2 + \mu_2 \omega_1^2) s^2 + (\omega_1^2 \mu_2 k_4 + k_3 k_{R2} \omega_1^2 + k_3 k_{R2} k_{res} T_2^{-1}) s + k_3 k_{R2} \omega_1^2 T_2^{-1} + \mu_2 k_3 k_5 \omega_1^2 . \quad (16)$$

Аналогично анализу свойств характеристического полинома контура регулирования током, метод разделения движений [41, 42] использован для анализа свойств корней характеристического полинома контура регулирования напряжением. Из полинома (16) получен характеристический полином ПМД внешнего контура:

$$A_{U(\text{ПМД})}(s) = \lim_{\mu_2 \rightarrow 0} A_U(\mu_2, s) = k_3 k_{R2} (s + T_2^{-1})(s^2 + k_{res} s + \omega_1^2) . \quad (17)$$

Устойчивость процессов в ПМД для внешнего контура обеспечивается выбором  $T_2$  и  $k_{res}$  исходя из условий:

$$T_2 > 0 \text{ и } k_{res} = 2\xi\omega_1 ,$$

где коэффициент  $\xi$  выбирается исходя из требования к демпфированию процессов, порождаемых резонансной компонентой в регуляторе (14), например,  $\xi=1$ . Постоянная времени  $T_2$  определяет длительность переходных процессов по выходному



напряжению  $U_C$  при изменении мощности нагрузки инвертора.

Характеристический полином ПБД внешнего контура получен с помощью замены  $s=p/\mu_2$  в выражении (16) и умножении полученного выражения на  $\mu_2^3$ . Затем, выполняя предельный переход  $\mu_2 \rightarrow 0$ , получено выражение:

$$\lim_{\mu_2 \rightarrow 0} \left( A_U \left( \mu_2, \frac{p}{\mu_2} \right) \cdot \mu_2^3 \right) = p^3 (p + k_3 k_{R2}). \quad (18)$$

Умножая (18) на  $p^{-3}$  и выполняя замену  $p=\mu_2 s$ , получен характеристический полином ПБД внешнего контура в следующем виде:

$$A_{U(\text{ПБД})}(s) = \mu_2 s + k_3 k_{R2}. \quad (19)$$

Так как  $\mu_2 > 0$ , устойчивость быстрых процессов во внешнем контуре по напряжению  $U_C$  обеспечивается условием  $k_3 k_{R2} > 0$ , то рекомендуется выбирать коэффициент усиления регулятора напряжения  $k_{R2} = 1/k_3$ .

Из выражения (17) следует, что темп переходных процессов в ПМД для внешнего контура определяется постоянными времени  $T_2$  и  $\tau_\omega = 1/\omega_1$ . Соответственно, требование на разделение темпов быстрых и медленных процессов во внешнем контуре обеспечивается выбором  $\mu_2$  в соответствии со следующим выражением:

$$\mu_2 = \frac{\min\{\tau_\omega, T_2\}}{\eta}. \quad (20)$$

Таким образом, предлагаемая методика расчета параметров двухконтурной системы управления инвертором состоит из следующих этапов. В начале выбираются коэффициенты усиления регуляторов в соответствии с условиями  $k_{R1} = 1/k_2$  и  $k_{R2} = 1/k_3$ . Затем, по заданным значениям постоянных времени  $T_2$  и  $\tau_\omega = 1/\omega_1$ , вычисляется величина параметра  $\mu_2$ . Выбором  $T_1 = \mu_2$  обеспечивается быстрое действие внутреннего контура регулирования по отношению к

внешнему контуру, а для выбора параметра  $\mu_1$  используется соотношение (12).

### 3. Имитационное моделирование

С целью демонстрации предложенного подхода было проведено имитационное моделирование для статического и динамического режимов работы преобразователя с активно-индуктивной нагрузкой. Имитационное моделирование преобразователя с синтезированной САР (Рис.2) осуществлено для мощности нагрузки 1 кВА,  $\cos(\varphi) = 0.8$  при работе преобразователя с выходными характеристиками, соответствующими работе на общую электрическую сеть низкого напряжения [46]. Требуемое действующее значение первой гармоники выходного напряжения составляет  $U_H = U_C = 220$  В на частоте  $f_{LOAD} = 50$  Гц при частоте коммутации транзисторов 40 кГц и одностороннем пилообразном опорном напряжении ШИМ.

Имитационное моделирование проводится для преобразователя при индуктивности и емкости выходного LC фильтра равных  $L_1 = 400$  мкГн,  $C = 10$  мкФ и напряжении входного звена постоянного тока  $U_{DC} = 800$  В. В соответствии с полученными выше соотношениями при моделировании были заданы следующие величины параметров регуляторов  $k_{R1} = 1 \cdot 10^{-6}$ ;  $\mu_1 = 1 \cdot 10^{-5}$ ;  $T_1 = 1 \cdot 10^{-4}$ ;  $\eta = 10$ ;  $k_{R2} = 1 \cdot 10^{-5}$ ;  $\mu_2 = 1 \cdot 10^{-4}$ ;  $T_2 = 1 \cdot 10^{-3}$ ;  $k_{res} = 628$ .

Результаты имитационного моделирования с указанными параметрами силовой схемы и рассчитанными в разделах 2 и 3 параметрами регуляторов приведены на Рис.4-5. На Рис.4 представлены осциллограммы напряжения нагрузки и ошибки слежения одной фазы, рассчитанной по формуле (2) для системы без добавления резонансного регулятора ( $U_{out2}$ ,  $e_{u2}$ ) и для системы с резонансной составляющей ( $U_{out1}$ ,  $e_{u1}$ ) при работе инвертора в статическом режиме.

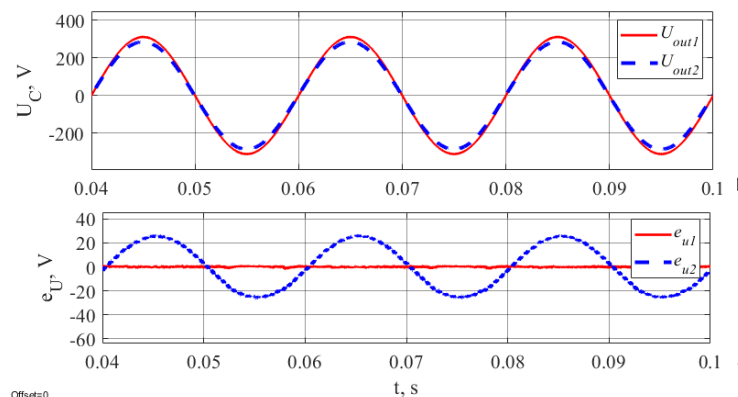
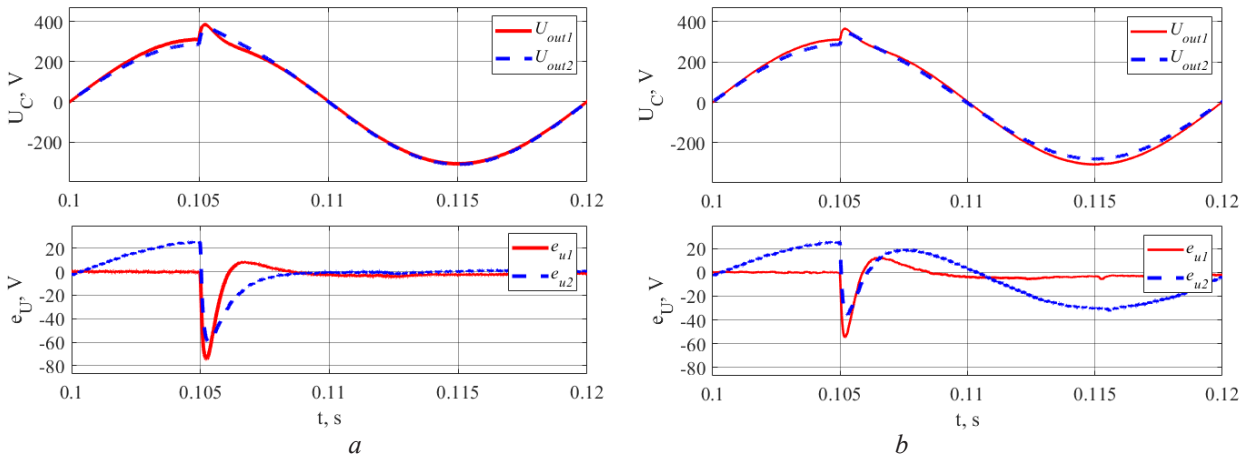


Рис. 4. Выходное напряжение  $U_C = U_{out}$  и ошибка слежения  $e_U(t)$   
 Fig. 4. Output voltage  $U_C = U_{out}$  and tracking error  $e_U(t)$





**Рис. 5.** Переходные процессы по выходному напряжению при изменении мощности нагрузки  
**Fig. 5.** Transient processes in output voltage during changes of output power

На Рис. 5(а) представлен переходной процесс по напряжению при сбросе мощности нагрузки до 10 % от номинала, на Рис. 5(б) – динамический процесс при увеличении нагрузки до 120 % от номинала для одной фазы.

Согласно результатам проведенного моделирования, для системы с резонансным регулятором в статическом режиме амплитуда первой гармоники выходного напряжения равна 311,2 В, соответственно относительная ошибка по напряжению составляет менее 0,1 %, суммарный коэффициент гармоник равен 0,3 %, а амплитуды высших гармоник значительно меньше указанных в [46] требований. Для системы со стандартным ПИ-регулятором величина первой гармоники выходного напряжения составляет 285,4 В, соответственно относительная ошибка по напряжению составляет около 8 %, суммарный коэффициент гармоник равен 0,32 %. Как видно из Рис. 5 САР с резонансным регулятором позволяет сохранить относи-

тельную ошибку менее 1 % при времени переходного процесса менее 10 мкс. При этом в двух оставшихся фазах, работающих на номинальную мощность нагрузки, выходные напряжения находятся на заданном уровне с ошибкой менее 1 %.

Соответственно, по результатам моделирования можно сделать вывод о том, что добавление резонансной составляющей, параметры которой рассчитаны по предложенной методике независимо от параметров ПИ-составляющих, позволило для рассматриваемого преобразователя более чем на порядок уменьшить величину ошибки слежения и коэффициент гармоник переменного напряжения. Независимое управление фаз в трехфазной системе обеспечивает эффективную работу преобразователя в составе гибридной системы в условиях несимметрии нагрузки, высокое качество выходного переменного напряжения и стабильность работы системы в широком диапазоне мощности нагрузки.

### Заключение

В данной работе представлена процедура синтеза двухконтурной САР с пропорционально-интегральным резонансным регулятором для трехфазного инвертора напряжения, предназначенного для работы в качестве составной части гибридной системы автономного электроснабжения, и приведены результаты численного моделирования. Показано, что независимый расчет пропорционально-интегральных и резонансных составляющих регулятора может быть проведен при следовании сравнительно простой процедуре расчета. При этом уменьшение ошибки слежения обеспечивается только за счет добавления резонансного регулятора, без пересчета параметров основных ПИ-составляющих регулятора. Представ-

ленная методика может быть использована при проектировании систем управления для широкого класса силовых преобразователей в составе гибридных систем энергоснабжения с возобновляемыми источниками энергии с высокими показателями качества энергии переменного тока в условиях несимметрии и высокой динамики изменения нагрузки.

### Благодарности

Исследование выполнено в рамках программы «Приоритет-2030» НГТУ по стратегическому направлению «Силовая электроника и интеллектуальная энергетика».

## Список литературы

- [1] E. L. Gonz'alez, F. I. Llerena, M. S. P'erez, F. R. Iglesias, and J. G. Macho. «Energy evaluation of a solar hydrogen storage facility: Comparison with other electrical energy storage technologies». *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 15, pp. 5518-5525, 2015.
- [2] B. Hamad, A. Al-Durra, T. H. M. EL-Fouly, and H. H. Zeineldin. «Economically optimal and stability preserving hybrid droop control for autonomous microgrids». *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, no. 1, pp. 934-947, 2023.
- [3] Fang, K.; Heijungs, R.; De Snoo, G.R. (2014). «Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: Overview of a footprint family». *Ecological Indicators*. 36: 508-518, doi:10.1016/j.ecolind.2013.08.017.
- [4] M. Pourakbari-Kasmaei, M. Lehtonen, J. Contreras and J. R. S. Mantovani. «Carbon Footprint Management: A Pathway Toward Smart Emission Abatement» in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – Vol. 16, no. 2, pp. 935-948, Feb. 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2922394. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8735936>
- [5] Muhammad Bakr Abdelghany, Ahmed Al-Durra, «A coordinated optimal operation of a grid-connected wind-solar microgrid incorporating hybrid energy storage management systems». *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, January 2023. – Vol. 99, pp. 1-13. DOI:10.1109/TSTE.2023.3263540.
- [6] Ahmed S. Alahmed and Lang Tong, «Co-optimizing Behind-The-Meter Resources under Net Metering». *IEEE Texas Power and Energy Conference, TPEC 2023*. – Memorial Student Center at Texas A&M University, College Station, Texas, USA, Feb 13 – Feb 14, 2023. – P. 42-48. DOI: 10.1109/TPEC56611.2023.10078677.
- [7] T. S. Biya; M. R. Sindhu, «Design and Power Management of Solar Powered Electric Vehicle Charging Station with Energy Storage System». 3rd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, ICECA 2019. – Coimbatore, India, 12-14 June 2019. – P. 815-820. DOI: 10.1109/ICECA.2019.8821896.
- [8] Hoang Tien Nguyen; Dae-Hyun Choi, «Distributionally Robust Model Predictive Control for Smart Electric Vehicle Charging Station with V2G/V2V Capability». *IEEE Transactions on Smart Grid*, 31 March 2023. – P. 1-13. DOI: 10.1109/TSG.2023.3263470.
- [9] L. Valverde, F. Rosa, C. Bordons, and J. Guerra, «Energy management strategies in hydrogen smart-grids: A laboratory experience». *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 31, pp. 13715-13725, 2016.
- [10] M. F. Shehzad, M. B. Abdelghany, D. Liuzza, and L. Glielmo. «Modeling of a hydrogen storage wind plant for model predictive control management strategies». in 2019 18th European Control Conference (ECC), June 2019, pp. 1896-1901.
- [11] M. Mureddu, G. Caldarelli, A. Chessa, A. Scala, A. Damiano, «Green Power Grids: How Energy from Renewable Sources Affects Networks and Markets» in *PLoS ONE* 10(9): e0135312, Sept. 3, 2015, 15 p. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135312>
- [12] Vyacheslav Zyryanov, Natalya Kiryanova, Igor Korotkov, Gleb Nesterenko, Gleb Prankevich, Iliia Rudiuk. «Analysis of Energy Storage Systems Application in the Russian and World Electric Power Industry». *PROCEEDINGS OF THE 2020 URAL SMART ENERGY CONFERENCE, USEC 2020*. – Ekaterinburg, November 13-15, 2020. – P. 106-109. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281175.
- [13] Nhat Le, Alexis Plasencia Leos, Juan Henriquez, Anh Phuong Ngo, Hieu T. Nguyen, «Analyze the Effects of COVID-19 on Energy Storage Systems: A Techno-Economic Approach». *IEEE Texas Power and Energy Conference, TPEC 2023*. – Memorial Student Center at Texas A&M University, College Station, Texas, USA, Feb 13 – Feb 14, 2023. – P. 322-328. DOI:10.1109/TPEC56611.2023.10078507.
- [14] Shi Xuwei, Shi Xuefang, Dong Wenqi, Zang Peng, Jia Hongyan, Wu Jinfang, Wang Yang, «Research on Energy Storage Configuration Method Based on Wind and Solar Volatility». 10th International Conference on Power and Energy Systems, ICPES 2020, Chengdu, China, 25-27 December 2020. – P. 464-468. DOI: 10.1109/ICPES51309.2020.9349645.
- [15] M. Yang, L. Zhang, Z. Zhao, and L. Wang, «Comprehensive benefits analysis of electric vehicle charging station integrated photovoltaic and energy storage». *J. Clean. Prod.*, vol. 302, no. 126967, pp. 1-12, Jun. 2021.
- [16] D. Zhai, L. Yao, S. Liao, J. Xu, B. Mao and B. Xie. «A Coordinated Control Strategy of Wind Power / Hydrogen Integrated System». 2022 7th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), Shanghai, China, 2022, pp. 838-843, doi: 10.1109/ICPRE55555.2022.9960576. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9960576>
- [17] Hamza Bouzeria; Issam Abadlia; Mohamed Adjabi «Echo state network based power control and energy management in grid-connected a hybrid wind-hydrogen power generation system». 2018 International Conference on Wind Energy and Applications in Algeria (ICWEAA), 6-7 November 2018, doi: 10.1109/ICWEAA.2018.8605092
- [18] C. Liu, K. Chau, D. Wu, and S. Gao, «Opportunities and challenges of vehicle-to-home, vehicle-to-vehicle, and vehicle-to-grid technologies». *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 11, pp. 2409-2427, Nov. 2013.
- [19] Q. Yan, B. Zhang, and M. Kezunovic, «Optimized operational cost reduction for an EV charging station integrated with battery energy storage and PV generation». *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 2,

pp. 2096-2106, Mar. 2018.

[20] M. Bazrafshan and N. Gatsis. «Decentralized stochastic optimal power flow in radial networks with distributed generation». *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 2, pp. 787-801, Mar. 2016.

[21] Zhaodi Shi, Weisheng Wang, Yuehui Huang, Pai Li; Ling Dong, «Simultaneous optimization of renewable energy and energy storage capacity with the hierarchical control». *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, Volume: 8, Issue: 1, January 2022. – P. 95-104. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2019.01470.

[22] C. Bordons, F. Garcia-Torres, and M. A. Ridaó, *Model Predictive Control of Microgrids*. Springer, 2020.

[23] C. Mu, W. Liu, and W. Xu. «Hierarchically adaptive frequency control for an EV-integrated smart grid with renewable energy». *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 14, no. 9, pp. 4254-4263, Sep. 2018.

[24] J. Li, M. E. Khodayar, J. Wang, and B. Zhou, «Data-driven distributionally robust co-optimization of P2P energy trading and network operation for interconnected microgrids». *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 12, no. 6, pp. 5172-5184, Nov. 2021.

[25] K. Garifi, K. Baker, D. Christensen, and B. Touri. «Convex relaxation of grid-connected energy storage system models with complementarity constraints in DC OPF». *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 11, no. 5, pp. 4070-4079, Sep. 2020.

[26] J. Zhai, Y. Jiang, Y. Shi, C. N. Jones, and X. - P. Zhang. «Distributionally robust joint chance-constrained dispatch for integrated transmission distribution systems via distributed optimization». *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 13, no. 3, pp. 2132-2147, May 2022.

[27] H. Farzin, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Moeini-Aghaie, «A practical scheme to involve degradation cost of lithium-ion batteries in vehicle-to-grid applications». *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 1730-1738, Oct. 2016.

[28] Oluwatimilehin Adeosun, Valentina Cecchi, «Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays using Numerical Iterative Method». *IEEE Texas Power and Energy Conference, TPEC 2023*. – Memorial Student Center at Texas A&M University, College Station, Texas, USA, Feb 13 – Feb 14, 2023. – P. 13-18. DOI: 10.1109/TPEC56611.2023.10078545.

[29] H. T. Nguyen and D.-H. Choi. «Decentralized distributionally robust coordination between distribution system and charging station operators in unbalanced distribution systems». *IEEE Trans. Smart Grid*, pp. 2164-2177, to be published, doi: 10.1109/TSG.2022.3210232, 2022.

[30]. M. Mehrasa, H. Salehfar, D. F. Selvaraj and S. I. Ahmed. «Smart bidirectional charging for frequency support of a low-inertia vehicle-to-grid system in presence of energy storage systems». *2023 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, College Station, TX, USA, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/TPEC56611.2023.10078605. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10078605>

[31]. Wang T., O'Neill D., Kamath H. *Dynamic Control and Optimization of Distributed Energy Resources in a Microgrid* // *IEEE Trans. on Smart Grid*. – 2015. 6, – No 6. – P. 2884-2894. DOI: 10.1109/TSG.2015.2430286.

[32]. Коробков Д. В. Методика и результаты анализа качества выходной энергии автономных систем электроснабжения переменного напряжения с модульными статическими преобразователями в установившемся режиме // *Methodology and results of analysis of output energy quality of autonomous AC power supply systems with modular static converters in steady-state mode* / Д. В. Коробков. – DOI 10.17588/2072-2672.2023.1.011-024. – Текст: непосредственный // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. – 2023. – № 1. – С. 11-24.

[33]. Dai M., Marwali M. N., Jung J. -W., Keyhani A. A Three-Phase Four-Wire Inverter Control Technique for a Single Distributed Generation Unit in Island Mode // *IEEE Trans. on Power Electronics*. – 2008. 23. – No 1. – P. 322-331. DOI: 10.1109/TPEL.2007.911816

[34]. M. Parvez, M. F. M. Elias, N. A. Rahim, F. Blaabjerg, D. Abbott and S. F. Al-Sarawi. «Comparative Study of Discrete PI and PR Controls for Single-Phase UPS Inverter» in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 45584-45595, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2964603.

[35]. M. R. Miveh, M. F. Rahmat, M. W. Mustafa, A. A. Ghadimi, and A. Rezvani. «An Improved Control Strategy for a Four-Leg Grid-Forming Power Converter under Unbalanced Load Conditions». *Adv. Power Electron.*, vol. 2016, pp. 1-14, 2016.

[36] Nos O. V., Shtein D. A., Leus G. S. et al. The simplified control technique for PMSM torque ripple reduction // *Proc. of the 21st Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. Chemal, Russia, 29 June-03 July 2020. pp. 475-481.

[37] Sevostyanov N. A., Gorbunov R. L. Resonant controllers design for frequency-selective impedance controlled DC microgrids // *IEEE 22 International conference of young professionals in electron devices and materials (EDM) : proc.*, Altai Region, 30 June – 4 July 2021. – Novosibirsk: IEEE, 2021. – P. 348-353. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507639.

[38] Pereira L. F. A., Bazanella A. S. Tuning rules for proportional resonant controllers // *IEEE Trans. Control Systems Technol.* – 2015. 23, N 5. – P. 2010-2017.

[39]. A. G. Garganeev, R. Aboelsaud and A. Ibrahim. «Voltage Control of Autonomous Three-Phase Four-Leg VSI Based on Scalar PR Controllers». *2019 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2019, pp. 558-564, doi: 10.1109/EDM.2019.8823098.

[40]. Nos O. V., Makys P., Kharitonov S. A. Modified resonant controllers with time delay compensation // *18 International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED2021): proc.*, Ekaterinburg, 2427 May 2021. – 2021. –

pp. 1-5. DOI: 10.1109/ACED50605.2021.9462290.

[41]. Meerov M. V. (1967) Structural Synthesis of High-Accuracy Automatic Control Systems. *2nd ed., add. and reworked, Nauka, Moscow*, 423 p. (in Russian)

[42]. Yurkevich V. D. Calculation and tuning of controllers for nonlinear systems with different-rate processes // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. September 2012, Volume 48, Issue 5, pp 447-453. DOI: 10.3103/s8756699012050032 (<http://link.springer.com/article/10.3103%2FS8756699012050032>)

[43] Francis B. A., Wonham W. M. The internal model principle of control theory // *Automation*. 1979, Vol. 12, no. 5, pp. 457- 465

[44] Costa-Castello R., Olm J. M., Vargas H., Ramos G. A. An Educational Approach to the Internal Model Principle for Periodic Signals // *International Journal of*

*Innovative Computing, Information and Control*. – 2012. – V. 8. – № 8.

[45] Mandel Y., Weiss G. Adaptive Internal Model Based Suppression of Torque Ripple in Brushless DC Motor Drives // *Systems Science & Control Engineering*. – 2015. – V. 3, no. 1, pp. 162-176.

[46]. ГОСТ 32132.3-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Низковольтные источники питания постоянного тока. Требования и методы испытаний. – Введ. 2014-01-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 40 с.

[47]. Vavilov O. A., Korobkov D. V., Yurkevich V. D. Two-Level Voltage Inverter: Parametric Synthesis of Filter and Controllers // *2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, Altai, Russian Federation, pp. 372-377, June 2022.

## References

[1]] E. L. Gonz'alez, F. I. Llerena, M. S. P'erez, F. R. Iglesias, and J. G. Macho, «Energy evaluation of a solar hydrogen storage facility: Comparison with other electrical energy storage technologies,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 15, pp. 5518-5525, 2015.

[2] B. Hamad, A. Al-Durra, T. H. M. EL-Fouly, and H. H. Zeineldin, «Economically optimal and stability preserving hybrid droop control for autonomous microgrids,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, no. 1, pp. 934-947, 2023.

[3]. Fang, K.; Heijungs, R.; De Snoo, G.R. (2014). «Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: Overview of a footprint family». *Ecological Indicators*. 36: pp. 508-518, doi:10.1016/j.ecolind.2013.08.017.

[4]. M. Pourakbari-Kasmaei, M. Lehtonen, J. Contreras and J. R. S. Mantovani, «Carbon Footprint Management: A Pathway Toward Smart Emission Abatement,» in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 2, pp. 935-948, Feb. 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2922394. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8735936>

[5] Muhammad Bakr Abdelghany, Ahmed Al-Durra, «A coordinated optimal operation of a grid-connected wind-solar microgrid incorporating hybrid energy storage management systems», *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, January 2023. – vol. 99, pp. 1-13. DOI:10.1109/TSTE.2023.3263540.

[6] Ahmed S. Alahmed and Lang Tong, «Co-optimizing Behind-The-Meter Resources under Net Metering», *IEEE Texas Power and Energy Conference, TPEC 2023*. – Memorial Student Center at Texas A&M University, College Station, Texas, USA, Feb 13 – Feb 14, 2023. – P. 42–48. DOI: 10.1109/TPEC56611.2023.10078677.

[7] T. S. Biya; M. R. Sindhu, «Design and Power Management of Solar Powered Electric Vehicle Charging Station with Energy Storage System», *3rd International*

*conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, ICECA 2019*. – Coimbatore, India, 12-14 June 2019. – P. 815-820. DOI: 10.1109/ICECA.2019.8821896.

[8] Hoang Tien Nguyen; Dae-Hyun Choi, «Distributionally Robust Model Predictive Control for Smart Electric Vehicle Charging Station with V2G/V2V Capability», *IEEE Transactions on Smart Grid*, 31 March 2023. – P. 1-13. DOI: 10.1109/TSG.2023.3263470.

[9] L. Valverde, F. Rosa, C. Bordons, and J. Guerra, «Energy management strategies in hydrogen smart-grids: A laboratory experience,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 31, pp. 13715-13725, 2016.

[10] M. F. Shehzad, M. B. Abdelghany, D. Liuzza, and L. Glielmo, «Modeling of a hydrogen storage wind plant for model predictive control management strategies,» in *2019 18th European Control Conference (ECC)*, June 2019, pp. 1896-1901.

[11] M. Mureddu, G. Caldarelli, A. Chessa, A. Scala, A. Damiano, «Green Power Grids: How Energy from Renewable Sources Affects Networks and Markets», in *PLoS ONE* 10(9): e0135312, Sept. 3, 2015, 15 p. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135312>

[12] Vyacheslav Zyryanov, Natalya Kiryanova, Igor Korotkov, Gleb Nesterenko, Gleb Prankevich, Iliia Rudiuk, «Analysis of Energy Storage Systems Application in the Russian and World Electric Power Industry», *Proceedings of the 2020 Ural Smart Energy Conference, USEC 2020*. – Ekaterinburg, November 13 – 15, 2020. – P. 106-109. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281175.

[13] Nhat Le, Alexis Plasencia Leos, Juan Henriquez, Anh Phuong Ngo, Hieu T. Nguyen, «Analyze the Effects of COVID-19 on Energy Storage Systems: A Techno-Economic Approach», *IEEE Texas Power and Energy Conference, TPEC 2023*. – Memorial Student Center at Texas A&M University, College Station, Texas, USA, Feb 13 – Feb 14, 2023. – P. 322-328. DOI:10.1109/



TPEC56611.2023.10078507.

[14] Shi Xuewei, Shi Xuefang, Dong Wenqi, Zang Peng, Jia Hongyan, Wu Jinfang, Wang Yang, «Research on Energy Storage Configuration Method Based on Wind and Solar Volatility», 10th International Conference on Power and Energy Systems, ICPES 2020, Chengdu, China, 25-27 December 2020. – P. 464-468. DOI: 10.1109/ICPES51309.2020.9349645.

[15] M. Yang, L. Zhang, Z. Zhao, and L. Wang, «Comprehensive benefits analysis of electric vehicle charging station integrated photovoltaic and energy storage,» J. Clean. Prod., vol. 302, no. 126967, pp. 1-12, Jun. 2021.

[16]. D. Zhai, L. Yao, S. Liao, J. Xu, B. Mao and B. Xie, «A Coordinated Control Strategy of Wind Power / Hydrogen Integrated System,» 2022 7th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), Shanghai, China, 2022, pp. 838-843, doi: 10.1109/ICPRE55555.2022.9960576. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9960576>

[17]. Hamza Bouzeria; Issam Abadlia; Mohamed Adjabi «Echo state network based power control and energy management in grid-connected a hybrid wind-hydrogen power generation system». 2018 International Conference on Wind Energy and Applications in Algeria (ICWEAA), 6-7 November 2018, doi: 10.1109/ICWEAA.2018.8605092

[18] C. Liu, K. Chau, D. Wu, and S. Gao. «Opportunities and challenges of vehicle-to-home, vehicle-to-vehicle, and vehicle-to-grid technologies,» Proc. IEEE, vol. 101, no. 11, pp. 2409-2427, Nov. 2013.

[19] Q. Yan, B. Zhang, and M. Kezunovic, «Optimized operational cost reduction for an EV charging station integrated with battery energy storage and PV generation,» IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 2, pp. 2096-2106, Mar. 2018.

[20] M. Bazrafshan and N. Gatsis, «Decentralized stochastic optimal power flow in radial networks with distributed generation,» IEEE Trans. Smart Grid, vol. 8, no. 2, pp. 787-801, Mar. 2016.

[21] Zhaodi Shi, Weisheng Wang, Yuehui Huang, Pai Li; Ling Dong, «Simultaneous optimization of renewable energy and energy storage capacity with the hierarchical control», CSEE Journal of Power and Energy Systems, Volume: 8, Issue: 1, January 2022. – P. 95-104. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2019.01470.

[22] C. Bordons, F. Garcia-Torres, and M. A. Ridaou, Model Predictive Control of Microgrids. Springer, 2020.

[23] C. Mu, W. Liu, and W. Xu, «Hierarchically adaptive frequency control for an EV-integrated smart grid with renewable energy,» IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 14, no. 9, pp. 4254-4263, Sep. 2018.

[24] J. Li, M. E. Khodayar, J. Wang, and B. Zhou, «Data-driven distributionally robust co-optimization of P2P energy trading and network operation for interconnected microgrids,» IEEE Trans. Smart Grid, vol. 12, no. 6, pp. 5172–5184, Nov. 2021.

[25] K. Garifi, K. Baker, D. Christensen, and B. Touri, «Convex relaxation of grid-connected energy storage system models with complementarity constraints in DC OPF,» IEEE Trans. Smart Grid, vol. 11, no. 5, pp. 4070-4079, Sep. 2020.

[26] J. Zhai, Y. Jiang, Y. Shi, C. N. Jones, and X.-P. Zhang, «Distributionally robust joint chance-constrained dispatch for integrated transmission distribution systems via distributed optimization,» IEEE Trans. Smart Grid, vol. 13, no. 3, pp. 2132-2147, May 2022.

[27] H. Farzin, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Moeini-Aghtaie, «A practical scheme to involve degradation cost of lithium-ion batteries in vehicle-to-grid applications,» IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 7, no. 4, pp. 1730-1738, Oct. 2016.

[28] Oluwatimilehin Adeosun, Valentina Cecchi, «Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays using Numerical Iterative Method», IEEE Texas Power and Energy Conference, TPEC 2023. – Memorial Student Center at Texas A&M University, College Station, Texas, USA, Feb 13 – Feb 14, 2023. – P. 13-18. DOI: 10.1109/TPEC56611.2023.10078545.

[29] H. T. Nguyen and D.-H. Choi, «Decentralized distributionally robust coordination between distribution system and charging station operators in unbalanced distribution systems,» IEEE Trans. Smart Grid, pp. 2164-2177, to be published, doi: 10.1109/TSG.2022.3210232, 2022.

[30]. M. Mehrasa, H. Salehfar, D. F. Selvaraj and S. I. Ahmed, «Smart bidirectional charging for frequency support of a low-inertia vehicle-to-grid system in presence of energy storage systems,» 2023 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), College Station, TX, USA, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/TPEC56611.2023.10078605. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10078605>

[31]. Wang T., O'Neill D., Kamath H. Dynamic Control and Optimization of Distributed Energy Resources in a Microgrid // IEEE Trans. on Smart Grid. 2015. 6, No 6, pp. 2884-2894. DOI: 10.1109/TSG.2015.2430286.

[32]. Korobkov D. V. Methodology and results of analysis of output energy quality of autonomous AC power supply systems with modular static converters in steady-state mode / Д. В. Коробков. – DOI 10.17588/2072-2672.2023.1.011-024. – 2023. – № 1. – P. 11-24.

[33]. Dai M., Marwali M. N., Jung J. -W., Keyhani A. A Three-Phase Four-Wire Inverter Control Technique for a Single Distributed Generation Unit in Island Mode // IEEE Trans. on Power Electronics. 2008. 23, No 1, pp. 322-331. DOI: 10.1109/TPEL.2007.911816

[34]. M. Parvez, M. F. M. Elias, N. A. Rahim, F. Blaabjerg, D. Abbott and S. F. Al-Sarawi, «Comparative Study of Discrete PI and PR Controls for Single-Phase UPS Inverter,» in IEEE Access, vol. 8, pp. 45584-45595, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2964603.

[35]. M. R. Miveh, M. F. Rahmat, M. W. Mustafa, A. A. Ghadimi, and A. Rezvani, «An Improved Control Strategy for a Four-Leg Grid-Forming Power Converter

under Unbalanced Load Conditions,» *Adv. Power Electron.*, vol. 2016, pp. 1-14, 2016.

[36] Nos O.V., Shtein D.A., Leus G.S. et al. The simplified control technique for PMSM torque ripple reduction // *Proc. of the 21st Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. Chemal, Russia, 29 June-03 July 2020, pp. 475-481.

[37] Sevostyanov N.A., Gorbunov R.L. Resonant controllers design for frequency-selective impedance controlled DC microgrids // *IEEE 22 International conference of young professionals in electron devices and materials (EDM) : proc., Altai Region, 30 June – 4 July 2021. – Novosibirsk: IEEE, 2021. – pp. 348–353. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507639.*

[38] Pereira L.F. A., Bazanella A.S. Tuning rules for proportional resonant controllers // *IEEE Trans. Control Systems Technol.* 2015. 23, N 5. pp. 2010-2017.

[39]. A. G. Garganeev, R. Aboelsaud and A. Ibrahim, «Voltage Control of Autonomous Three-Phase Four-Leg VSI Based on Scalar PR Controllers,» 2019 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2019, pp. 558-564, doi: 10.1109/EDM.2019.8823098.

[40]. Nos O. V., Makys P., Kharitonov S. A. Modified resonant controllers with time delay compensation // 18 International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED2021) : *proc., Ekaterinburg, 2427 May 2021. – 2021. – P. 1-5. DOI: 10.1109/ACED50605.2021.9462290.*

[41]. Meerov M.V. (1967) *Structural Synthesis of High-Accuracy Automatic Control Systems*. 2nd ed., add.

and reworked, Nauka, Moscow, 423 p. (in Russian)

[42]. Yurkevich V. D. Calculation and tuning of controllers for nonlinear systems with different-rate processes // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. September 2012, Volume 48, Issue 5, pp. 447-453. DOI: 10.3103/s8756699012050032 (<http://link.springer.com/article/10.3103%2FS8756699012050032>)

[43] Francis B. A., Wonham W. M. The internal model principle of control theory // *Automation*. 1979, Vol. 12, no. 5, pp. 457-465.

[44] Costa-Castello R., Olm J. M., Vargas H., Ramos G.A. An Educational Approach to the Internal Model Principle for Periodic Signals // *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. 2012. V. 8. № 8.

[45] Mandel Y., Weiss G. Adaptive Internal Model Based Suppression of Torque Ripple in Brushless DC Motor Drives // *Systems Science & Control Engineering*. 2015. V. 3, no. 1, pp. 162–176.

[46]. GOST 32132.3-2013. «Electromagnetic compatibility of technical equipment. Low voltage DC power supplies. Requirements and test methods». – Enter. 2014-01-01. – М.: Standartinform, 2014. – 40 p.

[47]. Vavilov O. A., Korobkov D. V., Yurkevich V. D. Two-Level Voltage Inverter: Parametric Synthesis of Filter and Controllers // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai, Russian Federation, pp. 372-377, June 2022.

