

УДК 620

МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЭ И ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ*

Р.Н. Шульга¹, И.В. Путилова²

¹Филиал ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ»

д. 12, ул. Красноказарменная, Москва, 111250, Россия
тел.: +7(903) 248-20-56; e-mail: rnshulga@vei.ru

²НИО «Научно-образовательный центр «Экология энергетики» НИУ МЭИ

д. 14, ул. Красноказарменная, Москва, 111250, Россия
тел./факс: +7(495)362-79-12; e-mail: putilovaiv@ecopower.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.04-06.065-082

Заключение совета рецензентов: 15.01.19 Заключение совета экспертов: 24.01.19 Принято к публикации: 30.01.19

Отмечены недостатки электроэнергетических систем переменного тока по сравнению с системами постоянного тока в части устойчивости, управляемости, надежности и резервирования. Выявлена необходимость перехода от цифровизации в виде автоматических систем управления технологическим процессом к умным сетям, а в последующем к мультиагентным сетям постоянного тока (МСПТ) с повышенной степенью резервируемости. Указанные сети позволяют при повреждении одного из элементов сохранять энергоснабжение потребителей и автоматически восстанавливать работу поврежденного элемента за счет отработанных алгоритмов диагностики и восстановления исходного режима.

Рассмотрена распределенная генерация в составе традиционных источников и возобновляемых источников электроэнергии, а также накопители и статические преобразователи в составе МСПТ. Приведены характеристики данных элементов для моделирования режимов МСПТ с целью выбора структуры и алгоритмов управления, обеспечивающих повышенную степень надежности и неуязвимости энергоснабжения. Для математического моделирования режимов предложены и описаны схемы замещения и аналитические выражения возобновляемых источников и накопителей электроэнергии. Рассмотрены наиболее перспективные твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ). Коммерциализация в области малой и распределенной энергетики пока сдерживается высокой удельной стоимостью ТОТЭ, однако они обладают серьезными преимуществами – высоким КПД и экологичностью. Перспективы применения ТОТЭ в большой энергетике неочевидны, однако за рубежом в микро- и малой энергетике их коммерциализация идет нарастающими темпами, несмотря на ограничения. Так, с 2007 г. по 2016 г. объем реализации ТОТЭ на мировом рынке вырос в 13 раз с объемом продаж до 480 МВт. В России имеется огромный внутренний рынок для внедрения ТОТЭ, который к 2035 г. составит 114 ГВт с потребностями до 44 млн микромощностей, сотнями тысяч малой мощности (до 200 кВт эл.) и десятками тысяч большей мощности (свыше 2 МВт эл.). Указанный объем внутреннего рынка позволяет перевести отечественные разработки в область промышленного освоения и коммерциализации в ближайшей перспективе.

Ключевые слова: электроэнергетическая сеть; мультиагентная сеть постоянного тока; распределенная генерация; ВИЭ; резервируемость; водород; топливный элемент.

MULTI-AGENT DIRECT CURRENT SYSTEMS USING RENEWABLE ENERGY SOURCES AND HYDROGEN FUEL CELLS

R.N. Shulga¹, I.V. Putilova²

¹VEI – the Branch of the Federal State Unitary Enterprise RFNC-VNIITF

12 Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russia
tel.: +7(903) 248-20-56, e-mail: rnshulga@vei.ru

*Шульга Р.Н., Путилова И.В. Мультиагентные системы постоянного тока с использованием ВИЭ и водородных топливных элементов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;04-06:65-82.



²Centre for Science and Education “Ecology of Power Engineering”,
National Research University “Moscow Power Engineering Institute”
14 Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russia
tel./fax: +7(495)362 79 12, e-mail: putilovaiv@ecopower.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.04-06.065-082

Referred 15 January 2019 Received in revised form 24 January 2019 Accepted 30 January 2019

Shortcomings of electric power networks compared with DC networks in terms of stability, controllability, reliability and redundancy are noted. The article reveals the necessity of transition from digitalization in the form of automated process control systems to smart grids, and subsequently to multi-agent DC networks with a high degree of redundancy. In case of damage of one of the elements, these networks allow us to save the power supply to consumers and automatically restore the operation of the damaged element due to proven algorithms for diagnosing and restoring the original mode.

Moreover, the article deals with application of distributed generation consisting of traditional and renewable energy sources, as well as accumulators and static converters. Characteristics of the above mentioned elements are given for simulating the modes in order to select the structure and control algorithms that provide an increased degree of reliability and invulnerability of power supply. Substitution schemes and analytical expressions of renewable energy sources and energy storage devices are proposed and described for mathematical modeling of regimes. The most promising solid oxide fuel cells (SOFC) are considered. The commercialization of small and distributed energy has been constrained by the high unit cost of SOFC so far; however, their advantages are high efficiency and minimum environmental emission of flue gases. Prospects of introducing SOFC in the energy production is not obvious, however, in micro- and small-scale power generation, their commercialization abroad is a growing pace, in spite of the above limitations. So for 10 years from 2007 to 2016, their sales around the world increased 13 times with sales up to 480 MW. Russia has a huge domestic market for the introduction of SOFC which is estimated of 114 GW by 2035 with needs up to 44 million of micro capacities, hundreds of thousands of low power (up to 200 kW) and tens of thousands of more power units (over 2 MW). This volume of the domestic market allows transferring domestic developments in the field of industrial development and commercialization in the near future.

Keywords: electric power network; multi-agent DC network; distributed generation; renewable energy sources; redundancy; hydrogen; fuel cell.



Ирина Вячеславовна
Путилова
Irina Putilova

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент, заведующая научно-образовательным Центром «Экология энергетики» (НОЦ «Экология энергетики» МЭИ), член редакционной коллегии от России электронного журнала “Coal Combustion and Gasification Products” (www.coalcgp-journal.org).

Награды и премии: победитель конкурса «Мой первый грант» Российского фонда фундаментальных исследований, 2012 г.

Образование: Московский энергетический институт (2001 г.).

Область научных исследований: природоохранные законодательство и технологии в энергетике, проблема обращения с золошлаками энергетики; информационное обеспечение природоохранной деятельности энергопредприятий ТЭК, ЖКХ и других отраслей экономики; повышение квалификации и профессиональная переподготовка специалистов энергопредприятий по направлениям «Теплоэнергетика и теплотехника» и «Электроэнергетика и электротехника».

Публикации: более 90.

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Head of the Centre for Science and Education “Ecology of Power Engineering” of MPEI, Member of the Editorial board from Russia of the Electronic Journal “Coal Combustion and Gasification Products” (www.coalcgp-journal.org).

Awards: winner of the tender “My First Grant”, Russian Foundation for Basic Research, 2012.

Education: Moscow Power Engineering Institute, 2001.

Research interests: environmental protection legislation and technologies in power engineering, coal ash handling; information support of nature protection activity of power utilities of the fuel and energy complex, housing and communal services and other branches of economy; professional development and retraining of specialists of power utilities on Thermal Power Engineering and Electric Power Engineering.

Publications: more than 90.



Роберт Николаевич Шульга
Robert Shulga

Сведения об авторе: канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, ВЭИ – филиал ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ».

Образование: МВТУ им. Н.Э. Баумана (1963 г.).

Область научных интересов: ТВН; преобразовательная техника; комплексы электрооборудования.

Публикации: 150, включая 20 патентов. SPIN РИНЦ: 5136-4188 по РИНЦ 41 публикация, 100 цитирований; индекс х10 РИНЦ: 5, ResearcherID: A-9321-2014; Scopus AuthorID: 6506511448.

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Leading Researcher, VEI – the Branch of the Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF.

Education: Bauman Moscow State Technical University, 1963.

Research interests: high voltage equipment; converter equipment; electrical equipment complexes.

Publications: 150, including 20 patents.

1. Введение

Электроэнергетические системы и сети переменного тока (ЭЭС) разных классов напряжения имеют иерархическую централизованную структуру управления и обладают существенными недостатками: плохая управляемость и устойчивость; недостаточная надежность и резервируемость; необходимость синхронизации, синфазирования и наличия «горячего» резерва и дополнительного расхода топлива на его поддержание; недостаточная автоматизация; мониторинг и диагностика; низкая экологичность из-за использования масла, элегаза; невозможность аккумуляции электроэнергии и др. [1]

За последние десятилетия в мире для устранения этих недостатков в ЭЭС, созданных воздушными и кабельными линиями (ВЛ и КЛ соответственно), были введены многочисленные устройства продольной и поперечной компенсации на основе силовой электроники, которые образовали совокупность устройств гибких электропередач (ГЭП, в зарубежной терминологии FACTS).

Передаваемая мощность по линиям ЭЭС P_1 определяется выражением:

$$P_1 = \frac{U_1 U_2 \sin \delta}{1,2X}, \quad (1)$$

где U_1, U_2 – напряжение в начале и конце линии соответственно; δ – угол сдвига фаз указанных напряжений; 1, 2 – коэффициент запаса по статической устойчивости; X – реактивное сопротивление линии.

Как следует из (1), повышение устойчивости, управляемости и пропускной способности может быть достигнуто либо стабилизацией напряжений U_1, U_2 с помощью статического тиристорного компенсатора (СТК) или управляемого шунтирующего реактора (УШР), либо снижением сопротивления линии X с помощью ТУПК, либо снижением угла δ с использованием фазоповоротного трансформатора (ФПТ). Более дорогостоящим, но более эффективным способом является применение продольных или поперечных преобразователей напряжения в виде статического компенсатора (СТАТКОМ) или мо-

дульного многоуровневого конвертора (ММС) на полностью управляемых вентилях IGBT или IGCT.

Другой разновидностью устройств ГЭП являются управляемые токоограничители (ТО) на основе либо индуктивных, либо полупроводниковых, либо сверхпроводящих устройств, которые снижают токи короткого замыкания (КЗ) до приемлемого для их отключения уровня с помощью установленных выключателей. Проблема ограничения сверхтоков особенно актуальна для мегаполисов, например, Московского региона, мощностью 17–19 ГВт, где в кольцевых схемах 110 кВ, 220 кВ, 500 кВ токи КЗ приблизились к предельной способности выключателей, равной 63 кА, и, кроме того, не решена проблема распределения рабочих токов до номинального уровня.

Использование этих устройств, однако, недостаточно для полной ликвидации недостатков ЭЭС, что подтверждается многочисленными цепными авариями (США, 2003 г.; Москва, 2005 г., 2006 г. и др.), приводящими к многомиллиардному ущербу и снижению энергобезопасности страны [2–4].

Альтернативой является перевод ЭЭС или магистральных связей на постоянный ток в виде передач и вставок (ППТ и ВПТ), которые абсолютно устойчивы, управляемы, резервируемы, не требуют синхронизации и синфазирования при вводе источников, характеризуются более низкими потерями, имеют возможность аккумуляции электроэнергии, снижения расхода топлива для поддержания «горячего» резерва за счет применения НЭЭ, полной автоматизации и мониторинга, присущим «умным сетям», и демонстрируют высокую экологичность и сочетаемость с ВИЭ и водородом как резервным энергоносителем [5]. Большое количество фундаментальных работ по использованию водородных топливных элементов выполнено основателем и президентом Международной ассоциации водородной энергетики Т.Н. Везироглу (например, [6, 7]).

Мощность, передаваемая по ППТ P_1 , определяется следующим выражением:

$$P_1 = \frac{U_1^2}{r_0 l}, \quad (2)$$



где U_1 – напряжение в начале ППТ; r_0 – удельное сопротивление линии; l – длина линии.

При сравнении выражений (1) и (2) видно, что для обеспечения полной управляемости и устойчивости ЭЭС необходимо измерять и согласовывать 8 параметров установившегося режима (частота, фаза, активные и реактивные составляющие тока, напряжения, мощности; то, что используется в системе векторных измерений (СВИ) [8, 9]). За последние годы в мире резко вырос интерес к сетям постоянного тока (СПТ), что подтверждается двумя последними сессиями СИГРЭ 46, 47 по указанной проблеме [10, 11]. СПТ на основе биполярной ППТ обладают более высокой надежностью энергоснабжения по сравнению с ЭЭС, так как отключение одного из полюсов компенсируется кратковременной перегрузкой другого полюса, в то время как отключение одной из фаз ЭЭС при однофазном КЗ приводит к полному прекращению энергоснабжения. Первоначально реализованная в нашей стране ППТ 1 500 кВ «Экибастуз-Центр» послужила прототипом аналогичных передач напряжением до 1 600 кВ в Китае и Индии с последующим образованием СПТ. В США к 2030 г. предполагается

создание кольцевой СПТ по периметру страны на основе сверхпроводящих КЛ [12].

Впервые выполнен анализ поколений автоматического управления сетями постоянного тока: первое поколение – на базе автоматических систем управления технологическим процессом; второе – на базе умных систем; третье – на базе мультиагентных систем. Мультиагентные системы, в отличие от предшествующих, позволяют сохранить энергоснабжение потребителей при повреждении одного из элементов с последующим восстановлением элемента по выбранному алгоритму диагностики аварии и восстановлением управления в предшествующем режиме.

В статье оценивалась возможность создания мультиагентных систем постоянного тока (МСПТ) с использованием распределенной генерации (РГ) в виде традиционных источников, ВИЭ, накопителей электроэнергии (НЭЭ) и статических преобразователей напряжения ПН. В качестве НЭЭ все чаще используется водородный энергетический модуль (ВЭМ), содержащий электролизер (ЭЛ), гидридный накопитель (ГН), топливный элемент (ТЭ), систему безопасности на основе водородных сенсоров.



Список обозначений	
<u>Буквы греческого алфавита</u>	
α	Угол управления
δ	Угол сдвига фаз
ξ	Триангуляционная функция
Δ	Разница уставок токов
<u>Буквы латинского алфавита</u>	
C	Емкость, мФ
E	ЭДС, В
I, i	Сила тока, А
L	Индуктивность, мГн
l	Длина линии, м
P	Мощность, Вт
R	Сопротивление, Ом
r_0	Удельное сопротивление линии, Ом/м
S	Площадь пластин, см ²
S	Оператор Лапласа
U, u	Напряжение, В
W	Относительный уровень заряда
X	Реактивное сопротивление линии, Ом
<u>Индексы нижние</u>	
d	Постоянное значение
pv	Фотоэлектрическая панель
sg	Выходное значение МРРТ
w	Заданное значение
ном	Номинальное значение
раб	Рабочее
т	Текущее значение
тепл	Тепловое
у	Уставка
хх	Холостой ход
<u>Аббревиатуры</u>	
АБ	Аккумуляторная батарея
АБП	Автономное бесперебойное питание
АГ	Асинхронный генератор
АСУ ТП	Автоматическая система управления технологическим процессом

Продолжение списка обозначений

ВЛ	Воздушная линия
ВПТ	Вставка постоянного тока
ВТ	Выключатель тока (постоянного)
ВЭИ	Всероссийский электротехнический институт
ВЭМ	Водородный энергомодуль
ВЭС	Ветроэлектростанция
ВЭУ	Ветроэлектроустановка
ГТУ	Газотурбинная установка
ГПУ	Газопоршневая установка
ГЭП (FACTS)	Гибкая электропередача
ГН	Гидридный накопитель
ДЭС	Дизельная электростанция
ЕЭС	Единая энергетическая система
ИТ	Источник тока
КЗ	Короткое замыкание
КЛ	Кабельная линия
КИУМ	Коэффициент использования установленной мощности
КНЭ	Кинетический накопитель электроэнергии
КУРБ	Комплекс управления и регулирования блока
КУРМ	Комплекс управления и регулирования мощности
МГЭС	Микрогазотурбинная электростанция
ММС	Модульный многоуровневый конвертор
МППТ	Многоподстанционная передача постоянного тока
МСПТ	Мультиагентная сеть постоянного тока
МЭБ	Мембранно-электродный блок
МЭК	Мультиагентный энергетический комплекс
НИИПТ	Научно-исследовательский институт постоянного тока
НЭЭ	Накопитель электроэнергии
ПГУ	Парогазовая установка
ПСУ	Паросиловая установка
ПН	Преобразователь напряжения
ППТ	Передача постоянного тока
ПЭМТЭ	Топливный элемент с протонно-обменной мембраной
РГ	Распределенная генерация
РН	Регулятор напряжения
РСПТ	Распределительная сеть постоянного тока
РТ	Регулятор тока
СВИ	Система векторных измерений
СГ	Синхронный генератор
СИГРЭ	Международный Совет по большим электрическим системам высокого напряжения
СК	Синхронный компенсатор
СПТ	Сеть постоянного тока
СПИНЭ	Сверхпроводящий индуктивный накопитель электроэнергии
ССИ	Система скалярных измерений
СТАТКОМ	Статический компенсатор на приборах IGBT
СТК	Статический тиристорный компенсатор
СУ	Система управления
СУРЗА	Система управления, регулирования, защиты, автоматики
ТК	Телеканал
ТОТЭ	Твердооксидный топливный элемент
ТСПТ	Транспортная сеть постоянного тока
ТУПК	Тиристорная управляемая продольная компенсация
ТЭ	Водородный топливный элемент
УШР	Управляемый шунтирующий реактор
ФПТ	Фазоповоротный трансформатор
ФЭУ	Фотоэлектрическая установка
ФЭ	Фотоэлемент
ЭЛ	Электролизер
ЭМП	Электрохимический преобразователь
ЭЭС	Электроэнергетическая система (переменного тока)



2. Структура и управление сетями постоянного тока

Начиная с 70-х гг. прошлого века и до настоящего времени в России и во всём мире интенсивно разрабатываются вопросы построения транспортных сетей постоянного тока (СПТ) в терминологии многоподстанционных передач постоянного тока (МППТ) [1, 2]. Прорабатываемая в Научно-исследовательском институте постоянного тока (НИИПТ) и Всероссийском электротехническом институте (ВЭИ) в 90-х гг. XX в. МППТ «Сибирь-Центр» длиной 3 600 км, мощностью 6 ГВт и напряжением 1 500 кВ должна была стать основой единой энергетической системы (ЕЭС) страны. Созданная в Китае СПТ 1 600 кВ, а также проектируемая в США к 2030 г. кольцевая сверхпроводящая СПТ порождают уверенность в необходимости создания системообразующих транспортных сетей постоянного тока (ТСПТ) взамен сетей переменного тока. С другой стороны, развитие

малой энергетики, ВИЭ, устройств силовой электроники, преобразователей напряжения (ПН) и накопителей требует проработки вопросов построения распределительных сетей постоянного тока (РСПТ) мощностью $1 \div 10$ МВт и напряжением $1 \div 10$ кВ. Целью настоящей работы является анализ особенностей построения ТСПТ и РСПТ в части структуры, режимов, требований к оборудованию, алгоритмов работы цифровых систем управления, регулирования, защиты, автоматики (СУРЗА) с учётом диагностики и мониторинга.

Экономические предпосылки к созданию ТСПТ обусловлены разнесением во времени пиков нагрузки в широтном направлении, разницей тарифов по зонам, ликвидацией транспортных перевозок топлива. РСПТ становится экономически выгодным вариантом для удалённых регионов, также она удовлетворяет требованиям экологии для мегаполисов и предоставляет возможности для создания умных сетей с повышенной надёжностью и энергоэффективностью.

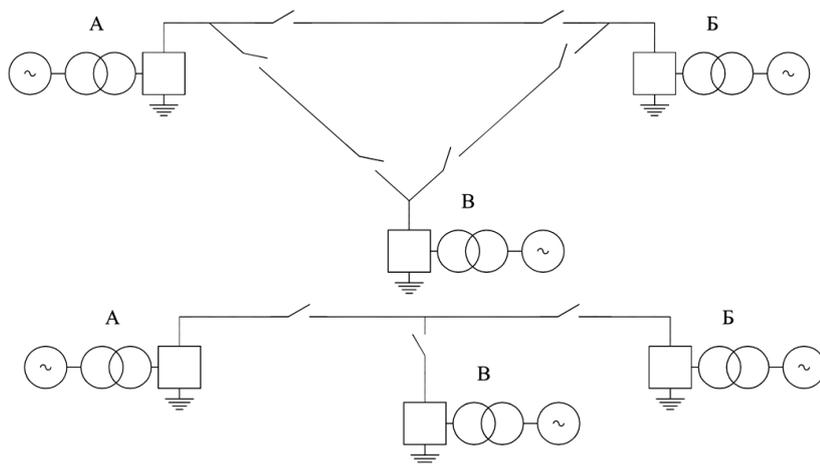


Рис. 1 – Структура СПТ кольцевого и радиального типа:

А, Б, В – преобразовательные подстанции

Fig. 1 – The structure of SPT ring and radial type:

А, Б, В – converter substations

СПТ обоих типов бывают и кольцевыми, и радиальными (рис. 1), причём последние более характерны для России и Китая и более благоприятны в части конечных устройств, так как опираются на достигнутый опыт двухподстанционных ППТ. В менее проработанных кольцевых схемах возникают проблемы с большими перегрузками выключателей постоянного тока и ограничителей перенапряжения.

Биполярные ТСПТ для реверса больших мощностей и ультравысоких напряжений преимущественно реализуются с использованием двухстороннего соединения тиристоров (фототиристоров), воздушных линий, отделителей участков и полюсов. РСПТ на меньшие мощности и средние напряжения осуществляют реверс с помощью преобразователей напряжения на основе приборов IGBT, которые освоены промышленностью для электротранспорта, спецстановок и др. Если РСПТ напряжением до 1кВ создаются в основном униполярными, то РСПТ напряжением до 10 кВ целесообразно производить бипо-

лярными с возвратом тока через третий провод либо переводом трёхфазной сети на трёхполюсный кабель с сохранением передаваемой мощности при КЗ одного из полюсов.

Возможные схемы осуществления реверса мощности подстанции представлены на рис. 2. Самым простым способом является переключение полюсов преобразователя, который реверсируется. Реверс может быть выполнен либо переключением верхнего и нижнего преобразователя, который остаётся при этом подключённым к тому же полюсу воздушной линии (рис. 2а), как это реализовано на передаче Корсика – Сардиния – Италия, либо переключением верхнего полюса преобразователя с одного на другой полюс воздушной линии (рис 2б). Первый способ требует выполнения обоих полюсов преобразователя на полное рабочее напряжение, и поэтому является неконкурентоспособным. Второй способ лишён этого недостатка, а также требует вдвое меньшего числа коммутационных аппаратов.

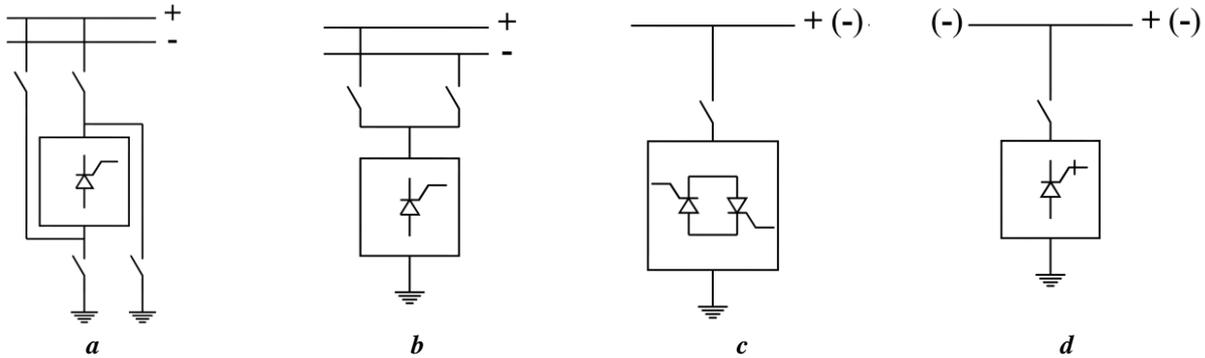


Рис. 2 – Возможные схемы осуществления реверса мощности подстанции
Fig. 2 – Possible schemes of reverse power substation

Недостатком такого способа осуществления реверса является то, что он сопровождается изменением полярности рабочего напряжения. Это может привести к утяжелению условий работы оборудования с маслобарьерной изоляцией, особенно при высоком напряжении электропередачи (600 кВ и выше). К такому оборудованию относятся преобразовательные трансформаторы, сглаживающие реакторы и высоковольтные вводы. Вторым недостатком этого способа является то, что при выводе в ремонт одного из полюсов ВЛ реверс становится невозможным.

Принципиально другим путём осуществления реверса является использование на преобразователях СПТ вентилях с двусторонней проводимостью на основе приборов IGBT (рис. 2d) либо удвоенный комплект тиристоров (рис. 2c). При этом реверс

мощности выполняется за счёт изменения направления выпрямленного тока преобразователя при сохранении неизменной полярности выпрямленного рабочего напряжения.

Четвёртый способ – использование преобразователей напряжения, при котором изменяется направление выпрямленного напряжения.

Внешние характеристики четырёх подстанций приведены на рис. 3. При этом подстанции П1 и П2 работают в режиме выпрямителя, а П3 и П4 – в режиме инвертора. Все подстанции, кроме П4, работают на вертикальных участках регуляторов тока (РТ), а П4 – на участке регулятора напряжения (РН), который задаёт уровень напряжения U на ВЛ. Разность ΔI_d между уставок токов выпрямителей и инверторов определяет запас по току.

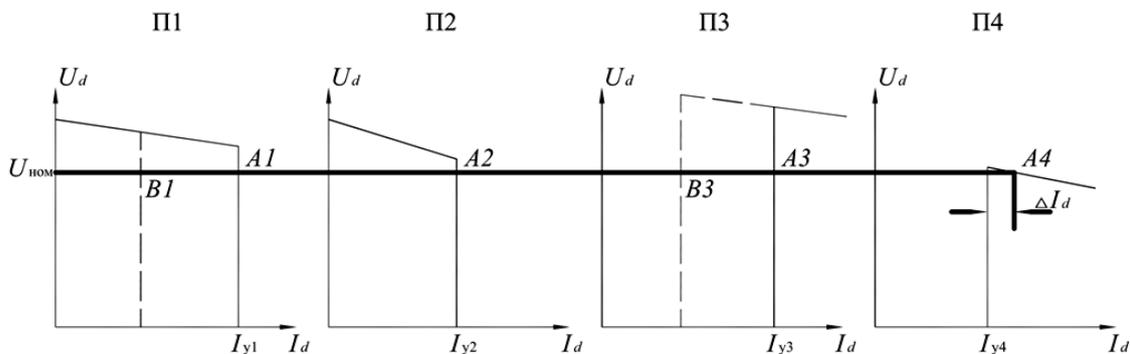


Рис. 3 – Внешние характеристики преобразователей СПТ, где П1–П4; U_d , I_d – соответственно напряжение и ток на стороне постоянного тока; I_{y1} – I_{y4} – уставки токов подстанций; А1–А4 – рабочие точки подстанций; В1, В3 – подстанции, работающие в выпрямительном режиме; $U_{ном}$ – номинальное напряжение сети; ΔI_d – разница уставок выпрямителей и инверторов

Fig. 3 – External characteristics of converters SPT where P1–P4; U_d , I_d – respectively, voltage and current on the DC side; I_{y1} – I_{y4} – current setpoints of substations; А1–А4 – operating points of substations; В1, В3 – substations operating in rectifier mode; $U_{ном}$ – rated voltage; ΔI_d – the difference between the setpoints of rectifiers and inverters

Изменение нагрузки любой подстанции легко выполняется путем изменения уставки этой подстанции при увеличении уставок других подстанций. Основой системы управления СПТ являются два основных комплекса управления и регулирования мощности (КУРМ) и блока (подстанции) (КУРБ), реализованных и успешно эксплуатируе-

мых на Выборгской вставке постоянного тока. Если КУРМ, дополненный центральным регулятором отпаек трансформаторов, раздаёт уставки мощностей каждой подстанции, то КУРБ регулирует ток и напряжение за счёт угла отключения, а также осуществляет защиту, автоматику и мониторинг оборудования.

3. Структура сетей постоянного тока с ВИЭ и накопителями электроэнергии

ЭЭС и СПТ, благодаря прогрессу технологий энергоинформационных систем, проходят три стадии автоматизации: цифровизация в виде автоматических систем управления технологическим процессом (АСУ ТП); умные (активно-адаптивные) сети в виде цифровых подстанций, СВИ и др. технологий; мультиагентные (нейронные) сети на основе самообучения взамен программирования [13, 14].

На первой стадии автоматизации АСУ ТП не справились с проблемой размерности из-за необходимости обслуживать многочисленные датчики и проблем интеллектуализации. Умная сеть смогла решить проблему размерности путем организации локальных сетей на шине «процесса», пакетной передачи информации между элементами сети, а задачи интеллектуализации и диспетчирования через шину «подстанции» реализовать в иерархической структуре ЭЭС. Недостаточная проработка вопросов резервирования и степени надежности энергоснабжения на переменном токе в условиях распределенной генерации и резкопеременного потребления ограничивает применение умных сетей. Мультиагентные сети на постоянном токе позволяют реализовать любую степень надежности и резервирования, выполнить оценку и управление рисками в условиях распределенной генерации и резкопеременного потребления в условиях возрастания доли ВИЭ.

Сети будущего должны обладать набором свойств: сетевая архитектура, интеллектуализация, мультиагентное управление, активная адаптация (самоорганизация), отраслевая интеграция, масштабируемость, связанность с глобальным информационным пространством, удобство для конечного потребителя. Для этих сетей характерны следующие особенности: переход от централизованной к РГ с возрастанием доли ВИЭ и улучшением экологии. Энергоэффективность будет повышаться с приближением источников к потребителям за счет микро- и малой генерации на газе, ВИЭ с использованием накопителя электроэнергии (НЭЭ). Существующие ЭЭС не рассчитаны на применение РГ, так как отключение источника или реверс мощности в одном из узлов приводит к потере устойчивости системы, не говоря о проблемах учета потребления и оплаты электроэнергии. Наличие водородного энерго модуля (ВЭМ) позволяет повысить энергоэффективность РГ благодаря снижению мощности установленной генерации и снижению расхода топлива.

В результате надо изменять алгоритмы управления распределительных систем, повышать их пропускную способность, изменять системы измерения,

управления, защиты и конечном итоге применять СПТ. В этих условиях резко возрастает необходимость разработки и применения моделей, работающих в реальном масштабе времени и с учетом распределенности и децентрализации РГ.

Проблемы распределенной генерации с использованием ВИЭ были рассмотрены в [15], но без учета водородных топливных элементов, их применения в электроэнергетике и недостаточного анализа мультиагентных сетей постоянного тока (МСПТ). Здесь более подробно анализируются структура и управление МСПТ с учетом водородных ТЭ.

На рис. 4 показана структура биполярной ППТ, имеющей двойное резервирование, так как при аварии в одной ветви одного полюса эта ветвь отключается выключателем постоянного тока (ВТ) в каждом из элементов схемы, другая ветвь форсируется, а остальные узлы СПТ остаются в работе, не меняя исходного режима.

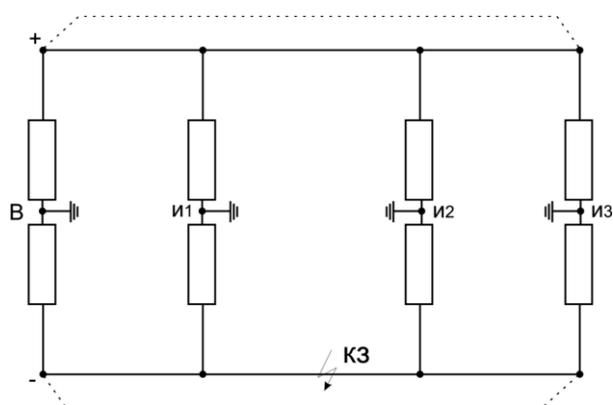


Рис. 4 – Упрощенная электрическая схема двухполюсной ППТ и ее преобразование в сеть постоянного тока СПТ: В – выпрямитель; И – инвертор; КЗ – короткое замыкание
Fig. 4 – Simplified electrical circuit of bipolar DCT and its transformation into the DCN: В – rectifier; И – inverter; КЗ – short circuit

Каждый из элементов рис. 4 содержит мультиагентный энергетический комплекс (МЭК), показанный на рис. 5 и содержащий ВЭУ, ФЭУ, АБ, ТЭ и нагрузки постоянного тока и переменного тока, при этом последние присоединены через ПН. Источники переменного тока (ВЭУ, ДЭС и МГТС) также присоединяются через ПН, причем номинальная мощность каждого из узлов МЭК варьируется в диапазоне 0,05 ÷ 1 МВт [15].

Имея в виду усредненный коэффициент использования мощности (КИУМ) для ВЭУ, равный 30 %, получим усредненную за год мощность каждого узла (рис. 5), равную 50 кВт. Для ФЭУ можно применить КИУМ 50 %, и выдаваемая мощность составит 10 кВт. Более реалистичные оценки обычно делаются с учётом карт ветровых нагрузок и инсоляции для определённых режимов.

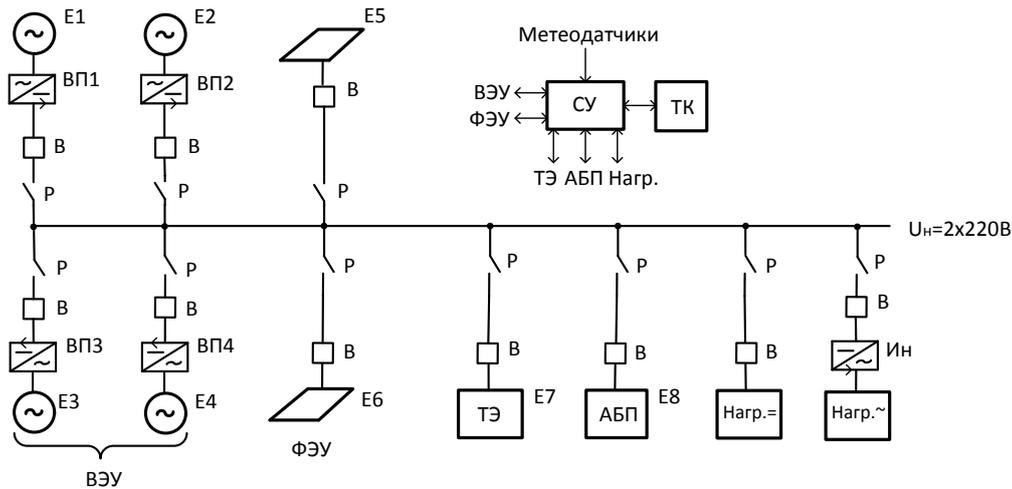


Рис. 5 – Схема МЭК на постоянном токе:

ВП – выпрямитель; В – выключатель; Р – разъединитель; ВЭУ – ветроэнергетика; ФЭ – фотоэлемент; СУ – система управления; ТК – телекоммуникация; ТЭ – топливный элемент; АБП – бесперебойное электропитание

Fig. 5 – MADCN scheme:

ВП – rectifier; В – circuit breaker; Р – disconnector; ВЭУ – wind power; ФЭ – photocell; СУ – control system; ТК – telecommunication; ТЭ – fuel cell; АБП – uninterrupter power supply



В качестве ВЭУ наиболее перспективны установки роторного типа, которые относительно дешевы, бесшумны, экологичны, менее заметны и являются модульными. Эти установки запускаются при минимальном ветре любого направления при скорости от 1 ÷ 3 м/с (лопастные ВЭУ дорогие, шумят и запускаются при скорости от 5 м/с). Такие ВЭУ апробированы в северных широтах и южных регионах, могут быть модифицированы под условия Арктики [16, 17].

В качестве ФЭУ наиболее распространены и имеют низкую стоимость установки планарного типа, обладающие низким КПД (примерно 10 ÷ 12 %). ФЭУ с использованием гетеропереходов стоят дороже, но обладают повышенным КПД (до 20 ÷ 30 %). ФЭУ снижают КПД при нагреве, поэтому перспективны и для северных широт, с учетом того, что там норма солнечной радиации составляет 3,5 ÷ 4 кВтч/м² (сопоставимо с Якутией и Сочи). В условиях полярной ночи ФЭУ не работают, поэтому они наряду с

ВЭУ должны зарядить ТЭ энергией с длительным сроком хранения (примерно три месяца).

ВЭУ и ФЭУ выдают электроэнергию стохастически, в связи с этим их применение возможно лишь при аккумулировании электроэнергии. ВЭМ содержит электролизер, гидридный накопитель ГН, накопитель электрической энергии в виде АБ и СК и водородный топливный элемент. ВЭМ выполняет функцию преобразования запасенной химической энергии в электрическую в необходимые периоды, ГН выполняет функцию долговременного хранения в течение месяца за счет использования, наряду с баллонной, металлгидридной системы накопления водорода, а аккумуляторы в виде гелиевых или кислотных АБ и суперконденсаторов СК обеспечивают кратковременное хранение и применяются для покрытия пиков нагрузки.

Структура водородного энергетического модуля ВЭМ приведена на рис. 6 по данным фирмы Toshiba (Япония).



Рис. 6 – Структура ВЭМ по данным фирмы Toshiba (Япония)

Fig. 6 – HPM structure according to Toshiba (Japan)



Ядром автономной системы энергоснабжения является система управления, регулирования, защиты, автоматики, мониторинга (СУ), которая через спутник или телеканал (ТК) связана с удаленным диспетчерским и сервисным пунктом.

Данная система энергоснабжения работает следующим образом. При получении команды от диспетчера СУ подключает через соответствующие выключатели накопители электроэнергии ТЭ и АБП, затем подключается один или несколько источников Е1–Е6 для обеспечения заряда накопителей. После достижения на шинах нагрузки напряжения на уровне, близком к номинальному значению, СУ подключает через соответствующий выключатель нагрузку, уставку мощности которой задается диспетчером или автономно на пульте СУ.

Получая данные от метеодатчиков, с учетом поправки на мощность собственных нужд (для управления, защиты, сигнализации, вентиляции, нагрева и др.), СУ корректирует уставку мощности и дополнительно подключает необходимое число источников генерации, обеспечивая номинальный уровень напряжения на шинах нагрузки. При изменении метеословий или получении в СУ сигналов аварий уставки мощности источников корректируются. При аварийных ситуациях СУ определяет место повреждения и отключает соответствующий источник или нагрузку [18].

4. Выбор источников энергии и типов накопителей электроэнергии

В качестве базисного источника энергии МЭК принимается синхронный генератор (СГ), вращаемый дизелем. Альтернативным ему является асинхронный генератор (АГ), входящий в состав ВЭУ

или МГЭС. Дополнительным источником могут являться фотоэлектрические панели (ФЭ), которые используются для покрытия собственных нужд МЭК или для зарядки НЭЭ.

В качестве НЭЭ рассматриваются водородные ТЭ, АБ и СК. Выпускаемые промышленностью СГ и/или АГ в зависимости от мощности нагрузки и НЭЭ выбираются от 1 МВт до 6 МВт на напряжение $0,4 \div 6$ кВ.

Результаты исследований в области ТЭ приведены в работах Т.Н. Везироглу [например, 19, 20]. Динамика развития НЭЭ определяется конкуренцией между ТЭ и АБ [21] и их широким внедрением в электроэнергетику больших систем. Трансформаторное оборудование также выбирается стандартным в виде трансформатора 6/0,4 кВ мощностью 1 МВА. Специальное оборудование в виде реакторов, фильтров, вентилялей и других элементов преобразователей разрабатывается по отдельным техническим заданиям. В качестве источников энергии рассматриваются: ФЭ или ФЭУ, водородные ТЭ, традиционные источники в виде синхронных генераторов (ДЭС, МГЭС) и ВЭУ, которые присоединяются к шинам МЭК через ПН [22]. Применение вышеуказанных источников и накопителей рассмотрено для анализа режимов автономной и распределенной генерации в [23–26]

4.1 Моделирование ФЭ

На рис. 7 показана схема замещения ФЭ с регулятором максимальной мощности (МРРТ) [18], который соответствует мощности панели ФЭ выходной емкостью $C = 4,4$ мФ, фильтрующей индуктивностью $L = 1$ мГ, номинальным напряжением на выходе $U = 230$ В.

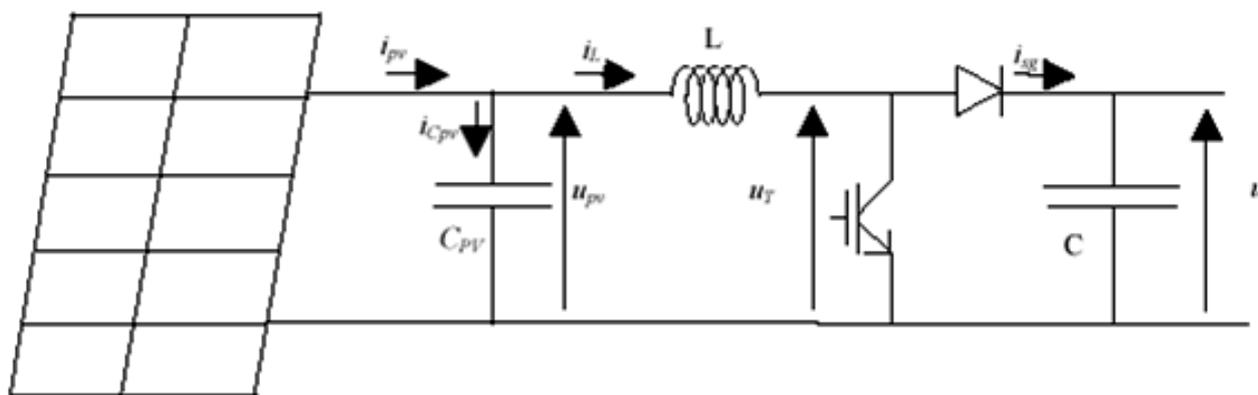


Рис. 7 – Схема замещения ФЭ с регулятором максимальной мощности
Fig. 7 – Substitution diagram of the PC with the maximum power regulator

Пример ВАХ панели ФЭ в функции интенсивности солнечного излучения $[Вт/м^2]$ приведен на рис. 8. Контроль напряжения панели ФЭ U_{pv} осуществляет-

ся с помощью импульсного преобразователя напряжения (чоппера), который извлекает наибольшую мощность ФЭ.

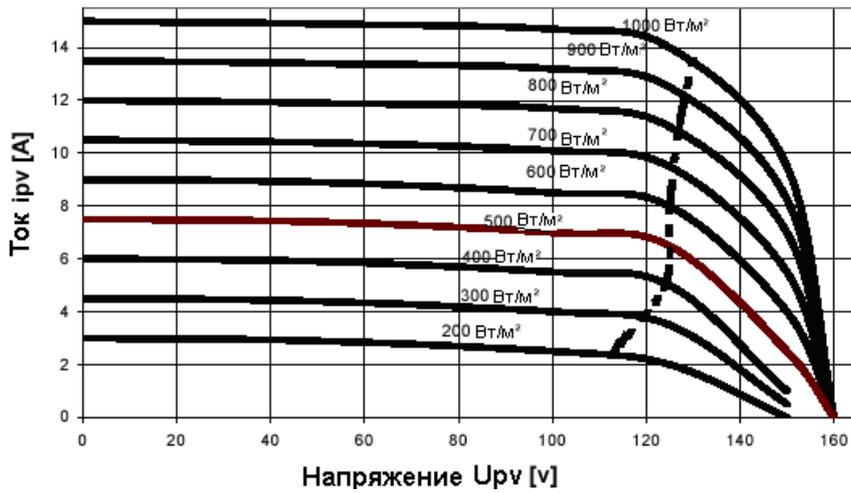


Рис. 8 – ВАХ панели ФЭ в функции интенсивности солнечного излучения (Вт/м²)
 Fig. 8 – VAC of the PC panel as a function of the intensity of solar radiation (W/m²)

Модель чоппера в соответствии с рис. 7 описывается уравнениями:

$$dU_{pv} / dt = (1 / C_{pv})(i_{pv} - iL) ;$$

$$diL / dt = (1 / L)(U_{pv} - UT) .$$

Вентиль IGBT сравнивает уставку заданного напряжения в диапазоне от 0 до 1 с модулирующей триангуляционной функцией ξ (рис. 9).

Рабочая компонента напряжения U_T в зависимости от угла α определяется соотношением:

$$U_T = (1 - \alpha)U .$$

Ток i_{sg} на выходе МРРТ может быть легко рассчитан, если пренебречь потерями в чоппере. В этом случае сохраняется баланс энергий на входе и выходе преобразователя:

$$iLU_T = Ui_{sg} .$$

При подстановке двух вышеприведенных формул получим

$$i_{sg} = iL(1 - \alpha) .$$

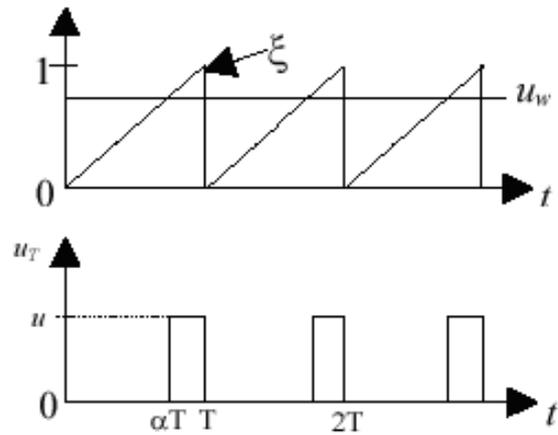


Рис. 9 – Сравнение уставки заданного напряжения U_w с триангуляционной функцией ξ
 Fig. 9 – Comparison of the setpoint of the set voltage U_w with the triangulation function ξ

На рис. 10 показана блок-схема модели ФЭ с МРРТ в виде передаточных функций, где S – оператор Лапласа.

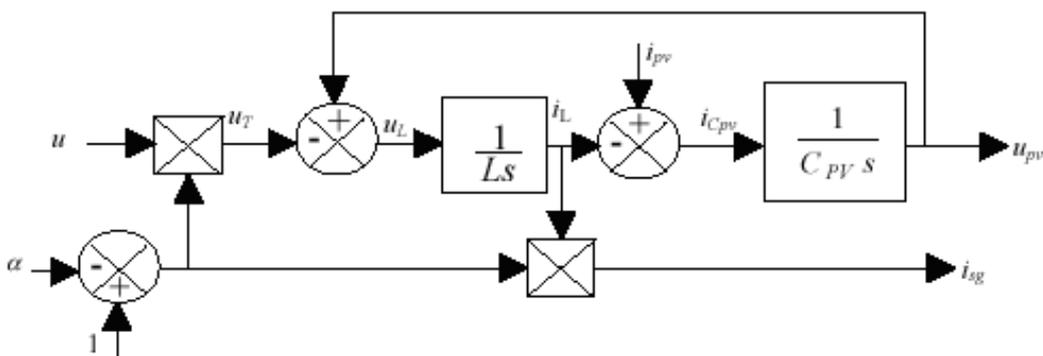


Рис. 10 – Блок-схема модели ФЭ с МРРТ: u – напряжение; α – угол управления; 1 – уставка
 Fig. 10 – Block diagram of PC model with MPR: u – voltage; α – control angle; 1 – setpoint



В результате модель ФЭ с МРРТ воспроизводится двумя параметрами: напряжением U_{pv} и током i_{sg} .

4.2 Моделирование ТЭ

В настоящее время наиболее перспективным НЭЭ является основанный на применении ТЭ. Существует

целый ряд разновидностей ТЭ, в основу классификации которых положен тип электролита (жидкий, газообразный, твердый) с характеристиками, приведенными в таблице [23].

Таблица

Характеристики ТЭ

Table 1

Fuel cell characteristics

Тип ТЭ (электролит)	Рабочая температура, °С	Мощность на выходе, кВт	КПД, %	Особенности	Область применения
Алкалин (AFC)	90 ÷ 100	10 ÷ 100	60 ÷ 70 электрический		Военная, космос
Полимерная или протонно-обменная мембрана (PEM)	50 ÷ 100	<250	50 ÷ 60 электрический	Быстрый старт	Портативные устройства, транспорт, распределенная генерация
Фосфорная кислота (PAFC)	150 ÷ 200	50 ÷ 1000 (250-модуль)	80 ÷ 85 комбинированный 36 ÷ 42 электрический	Пластины большого размера, чистый водород	Распределенная генерация
Литой углерод (MCFC)	600 ÷ 700	<1 000 (250-модуль)	85 комбинированный 60 электрический	Гибкость, разные катализаторы	Электроэнергетика, большая распределенная генерация
Твердые окислы (SOFC)	650 ÷ 1 000	5 ÷ 3 000	85 комбинированный 60 электрический	Гибкость, разные катализаторы, низкая коррозия	Вспомогательное питание, электроэнергетика, большая распределенная генерация

Вид электролита определяет тип химической реакции, рабочую температуру, мощность и КПД ТЭ. Наиболее распространенными ТЭ являются PEM. PEM реализован на основе протонно-обменной мембраны толщиной примерно 0,2 мм, заключенной между двумя электродами (анодом и катодом), с которых снимаются соответственно электроны и ионы, поступающие во внешнюю цепь (в нагрузку).

По закону Фарадея электрохимический потенциал водорода в PEM составляет 1,48 В. В ТЭ при температуре 25 °С происходит синтез водорода и кислорода, которые превращаются в воду H₂O, создавая потенциал $U = 1,23$ В. Разница потенциалов между электродами PEM равна 0,95 ÷ 1 В (из-за потерь на поляризацию). Конструктивное напряжение на ТЭ составляет 0,75 В (в пределах 0,6 ÷ 0,8 В). Таким образом, средняя эффективность ТЭ – 0,75В/1,48 В = 50 %. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) ТЭ на основе PEM приведена на рис. 11, на котором видно, что напряжение холостого хода $U_{xx} = 1,16$ В при температуре 80 °С и давлении 1 атм. Рабочее напряжение $U_{раб} = 0,7$ В (при электрическом КПД 60 %). Рабочее напряжение при комбинированном использовании ТЭ $U_{раб}$ составляет 0,9 В (КПД 77 %), причем КПД по теплу примерно 23 %.

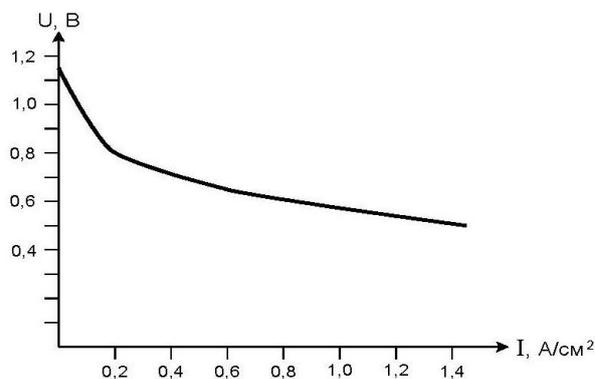


Рис. 11 – ВАХ ТЭ
Fig. 11 – VAC of HFC

Например, U_{xx} ТЭ с площадью пластин $S = 100$ см² при давлении $P = 1$ атм и температуре 80 °С составляет 1,16 В. Из ВАХ на рис. 8 при номинальном напряжении $U_n = 0,7$ В полный ток ТЭ = 0,6 · 100 = 60 А. По выделению тепла $P_{тепл} = (1,16 ÷ 0,7) В · 60 А = 0,46 В × 60 кул/с · 60 сек/мин = 1 650$ Дж/мин. Таким образом, ТЭ вырабатывает 1,7 кДж/мин тепла и 2,5 кДж/мин электричества.

На сегодня известен НЭЭ на ТЭ мощностью 250 кВт, выдающий энергию в течение 8 час., причем указанный ТЭ использует два бака с жидким электролитом емкостью 140 т. Площадь НЭЭ составляет 200 м², рабочая температура 5 ÷ 40 °С, быстродействие менее 5 мс. НЭЭ используется для стабилизации напряжения в энергосистеме 25 кВ при напряжении на выходе ТЭ 480 В, длительности провала напряжения 30 мин.

5. Топливные элементы

Эволюция ТЭ за последние годы привела к промышленному освоению и коммерциализации энергоустановок на их основе – ТЭУ с КПД до 60 % в простом и когенерационном циклах, с использованием газотурбинных, парогазовых, паросиловых или газопоршневых установок (соответственно ГТУ, ПГУ, ПСУ, ГПУ) в гибридном цикле до 75 %, что существенно превышает показатели указанных электромеханических преобразователей (ЭМП) с КПД ниже 60 % и существенно превышает экологические показатели последних. Из многочисленных вариантов ТЭ наиболее динамично развивающимися и применяемыми в энергетике является топливные элементы на основе протонно-обменной мембраны (ПЭМТЭ) и ТОТЭ [10, 17].

5.1. Принцип действия ТОТЭ и ПЭМТЭ

Принцип действия ТОТЭ и ПЭМТЭ показан на рис. 12, где водород используется в качестве топлива, кислород – в качестве окислителя, а вода – продукт реакции.

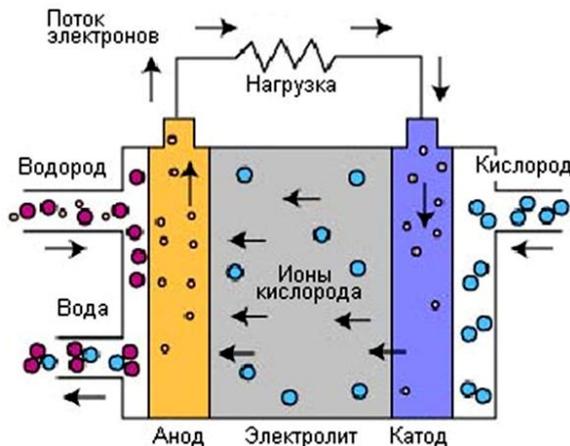
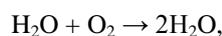


Рис. 12 – Принцип действия ТОТЭ
Fig. 12 – The principle of SOFC operation

Общая реакция окисления имеет вид:



и соответствует реакции горения водорода, однако в среде электролита с высокой ионной проводимостью на электродах (анод, катод) можно получать элект-

рический ток с выделением тепла, причем на аноде происходит окисление топлива, а на катоде – восстановление окислителя.

Электролит может быть в твердом или жидком состоянии, но должен обладать высокой ионной и малой электронной проводимостями. Тип электролита является основой для классификации ТЭ. В отличие от ТОТЭ в ПЭМТЭ в качестве электролита используется протонно-проводящая полимерная мембрана, через которую ионы водорода диффундируют к катоду, где вступают в реакцию с кислородом с образованием воды. Мембранно-электродные блоки (МЭБ) соединяются последовательно в батареи при помощи биполярных пластин. Для обеспечения необходимой скорости реакции при температуре до 100 °С в блоках применяются биметаллические катализаторы с наличием платины, которые из-за отравления монооксидом углерода имеют ограниченный ресурс и высокую стоимость. ПЭМТЭ несмотря на указанные недостатки являются на сегодня самыми распространенными и многоцелевыми источниками, в частности для транспорта.

Для применения установок в области энергетики должны быть низкие требования к чистоте водорода, повышенный ресурс, использование тепла для когенерации, кроме того, в них не должно быть платины – все это присуще ТОТЭ. ТОТЭ состоит из пористого анода, твердого электролита и пористого катода. Рабочая температура ТОТЭ к настоящему времени снижена с 900 ÷ 1 000 °С до 500 ÷ 800 °С, что позволяет в свою очередь снизить стоимость материалов и повысить надежность. ТОТЭ обладают универсальностью по отношению к топливам, устойчивостью к веществам, которые являются ядами для остальных ТЭ (кроме серы).

5.2. Области применения и конструкции ТЭ

В микроэнергетике (до 10 кВт) для домашних хозяйств у ТОТЭ нет конкурентов. В малой и распределенной генерации (до 1 МВт) целесообразно использование ТЭУ совместно с ГТУ и ГПУ, то есть применять гибридные ТЭУ с повышением КПД до 75 % за счет когенерации. ТЭУ больших мощностей (10 ÷ 100 МВт) также с применением ТЭУ могут быть использованы в централизованной и распределительной генерации, причем мощность ТЭУ должна в 2 ÷ 5 раз превышать мощность ГТУ или других ЭМП из-за низкого КПД последних при малых мощностях.

На рис. 13 приведена блок-схема одного модуля ТЭУ на основе ТОТЭ, в котором газ (метан) и воздух сжигаются в горелке (внизу), нагревают батареи ТОТЭ и используются для предстартовой подготовки. В верхней части установлен теплообменник для получения горячей воды, которая нужна для парового реформинга. При воздушном реформинге (для автономных установок) вода не используется.

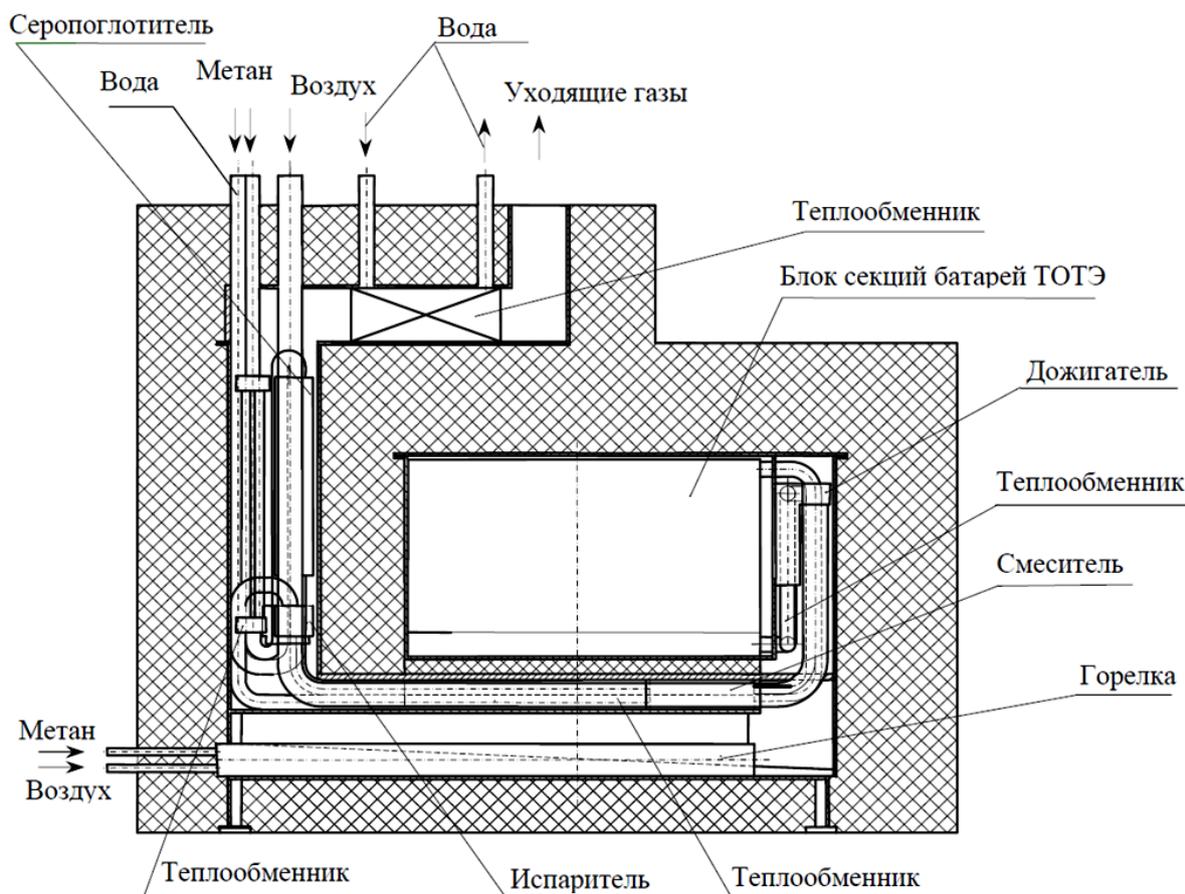


Рис. 13 – Модуль ТЭУ на основе ТОТЭ
Fig. 13 – SOFC-based FCPP module

Топливо и воздух, нагретые в теплообменнике, поступают в электрохимическую зону с блоком секций батарей ТОТЭ. ТЭУ мощностью 100 кВт с 16 модулями выполнен в жаропрочном стальном корпусе и имеет следующие показатели: расход метана 27,7 м³/ч, воздуха 820 м³/ч, воды 52 л/ч; напряжение на выходе 260 В; ток 500 А; время запуска 12 ч; общий КПД 68,8 %; эл. КПД 42,2 %.

Следует отметить возможность создания обратного цикла, позволяющего переключаться в режим электролизера водяного пара и диоксида углерода, создавая накопитель электроэнергии для ВИЭ.

5.3. Возможности коммерциализации ТЭ

ПМТЭ за счёт использования на транспорте продемонстрировали рост в 2,3 раза за 5 лет и составляют 46,9 тыс. шт. (72 % реализованных в 2016 г. ТЭУ) суммарной мощностью 311,2 МВт (65 %). Однако темпы роста ТОТЭ за 5 лет выросли в 26,7 раз, ТЭУ составили 16 тыс. шт. (24,5 %) суммарной мощностью 53,7 МВт (11,2 %). Преимущественное развитие ТОТЭ обусловлено высоким электрическим КПД до 75 % с учетом когенерации и в гибридном цикле;

КПД использования химической энергии топлива до 90 %; отказом от использования драгметаллов в качестве катализаторов; устойчивости к каталитическим ядам; прямого использования углеводородов в составе любого вида топлива.

Наибольшую коммерциализацию получили ТЭУ фирмы Bloom Energy (США) на планарных ТОТЭ, которые называют серверами трех типов: ES-5700, ES-5710, UPM-570, соответственно с номинальными мощностями переменного тока: 200 кВт, 250 кВт и 160 кВт. Энергетический КПД серверов достигает 60 %, а масса – 19,4 т (для UPM – 2,3 т). Габариты серверов следующие: высота 2,05 м, ширина 2,6 м, длина 8,06 м (для UPM – 1,27 м), объём от 42,6 м³ до 6,8 м³ (UPM). Температурный диапазон составляет от –20 °С до +45 °С, влажность – до 100 %, вода для эксплуатации не требуется [13–18].

На рис. 14 приведены: сверху общий вид ТЭУ фирмы Bloom Energy мощностью от 1 МВт до 6 МВт, в середине – технологическая схема ячейки ТОТЭ, внизу – технология сборки ячейки 25 кВт, сборки 1 кВт, модуля 25 кВт, системы 100 кВт, набора на мощности до 6 МВт [10].



Рис. 14 – ТЭУ фирмы Bloom Energy [17]
Fig. 14 – Bloom Energy FCPP

Подробные технологические схемы серверов и составы компонентов не публикуются. Первоначально поставленные в Google в 2008 г. и управляемые по интернету серверы мощностью 100 кВт имели габариты 5,7×2,1 м; 8 ÷ 9 центов/кВт×ч; срок окупаемости 3–5 лет. К 2017 г. суммарная мощность ТЭУ составила 130 МВт (примерно 650 серверов в 500 компаниях). Промышленное производство серверов открыто в 2016 г. в штате Юта (США).

5.4. Перспективы ТЭУ

Если в условиях крупной электрогенерации (выше 100 МВт) технико-экономические характеристики ТЭУ в настоящее время уступают газовой генерации (ПГУ), то для распределенной генерации с мощностями 1 ÷ 10 МВт показатели ТЭУ выглядят многообещающими. По энергоэффективности ТЭУ обладают самыми лучшими показателями, особенно в гибридных установках ГЭУ, благодаря отсутствию выбросов их можно устанавливать прямо у потребителя с использованием топлива с КПД до 95 %, а КПД до 75 % в режимах когенерации и тригенерации. Сокращение энерго- и теплового хозяйства позволяет снизить затраты потребителя. Снижение выбросов и повышение надежности позволяют установить ТЭУ в жилой зоне. Стоимость ТЭУ зависит от

разрабатываемых новых технологий и масштабов промышленного производства.

При производстве ТЭ в количестве 500 тыс./год (на примере автомобильного транспорта) по данным Министерства энергетики США удельная стоимость ТЭУ с ПМТЭ мощностью 100 кВт ниже 50 долл./кВт, а к 2030 г. снизится до 30 долл./кВт. Новые технологии и инвестиции в разработку ТЭУ в размере 2,5 млрд долл. позволили снизить стоимость ТЭ в 6 раз за 10 лет (2004–2013 гг.) благодаря новейшим технологиям. Увеличение годовых выпусков ТЭУ с тысяч до сотен тысяч штук позволит снизить стоимость ТЭ в 4 раза; увеличение мощности ТЭУ с 0,5 кВт до 5 кВт – удельную стоимость в 2 раза. Если в настоящее время электрический КПД ТЭУ до 3 МВт составляет 42 ÷ 47 %, то к 2020 г. ожидается более 50 %, а КИТ должен превысить 90 %. Удельная стоимость оборудования должна снизиться от 3 ÷ 4 тыс. долл./кВт в настоящее время до 1 000 долл./кВт, то есть в 3 раза. Срок службы 40 000 ч должен увеличиться в 2 раза, а вероятность безотказной работы должна возрасти с 95 % до 99 % [18–23].

6. Заключение

В настоящее время тенденция централизованного электроснабжения в России привела к недопустимому



росту тарифов, и распределенное и автономное энергоснабжение становится экономически более выгодным для промышленных потребителей. Экономический эффект от внедрения распределенной генерации составляет около 30 % [8].

Недостатки ЭЭС сравнительно с СПТ касаются устойчивости, управляемости, надежности и резервирования. Необходимо переходить от цифровизации в виде АСУ ТП к умным сетям, а в последующем к мультиагентным сетям постоянного тока МСТП с повышенной степенью резервируемости.

Применение традиционных источников и ВИЭ, а также накопителей и статических преобразователей в МСПТ дает повышение энергоэффективности, управляемости и надежности системы.

Характеристики источников и накопителей для моделирования режимов МСПТ позволяют выбрать структуру и алгоритмы управления, обеспечивающие повышенную степень надежности и неуязвимости энергоснабжения.

Коммерциализация в области малой и распределенной энергетики пока сдерживается высокой удельной стоимостью ТОТЭ до 8 000 долл./кВт и ограниченным ресурсом до 40 тыс. ч, несмотря на их высокий КПД до 60 % и 75 % для гибридных установок, коэффициент использования топлива до 90 % и высокий уровень экологичности.

Для большой энергетики в настоящее время по данным Министерства энергетики США удельная стоимость составляет 5 350 долл./кВт (по отечественным АЭС до 3 500 долл./кВт), ВЭС до 2 200 долл./кВт, ФЭС до 4 000 долл./кВт, в то время как для ТЭС до 1 700 долл./кВт (даже при аккумулировании выделения O_2). Ресурс промышленных установок должен составлять не менее 30 лет, электрический КПД АЭС не менее 30 %, ВЭС до 40 %, ФЭС до 15 ÷ 20 %. Коэффициент использования мощности КИУМ для АЭС не менее 70 %, ВСЭ и ФЭС на уровне 30 %.

Перспективы применения ТОТЭ в большой энергетике неочевидны, однако в микро- и малой энергетике их коммерциализация за рубежом идет нарастающими темпами, несмотря на ограничения. Так, за 10 лет с 2007 г. по 2016 г. объем реализации ТЭУ на мировом рынке вырос в 13 раз с объемом продаж до 480 МВт (доля Азии 51,4 %), причем объем ПМТЭ достиг 65 %. Объем реализации ТОТЭ за все время вырос в 160 раз (16 тыс. шт. в 2016 г.).

В России имеется огромный внутренний рынок для внедрения ТЭУ (114 ГВт к 2035 г.) с потребностями до 44 млн микромощностей, сотнями тысяч малой мощности (до 200 кВт эл.) и десятками тысяч большей мощности (свыше 2 МВт эл.). Указанный объем внутреннего рынка позволяет перевести отечественные разработки в область промышленного освоения в ближайшей перспективе.

Список литературы

[1] Роголев, Н.Д. Проблемы развития электроэнергетики России и пути их решения / Н.Д. Роголев, В.В. Молодюк // XXVIII Международная научно-техническая конференция ТРАВЕК «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования», 7–8 ноября 2018 г., Москва.

[2] Makarov, Yu.V. Blackout prevention in the United States, Europe and Russia / Yu.V. Makarov, etc. // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93. – No. 11. – P. 1942–1955.

[3] Besanger, Y. Major grid blackouts: Analysis Classification, and prevention / Y. Besanger, M. Eremia, N. Voropai // Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control. New Jersey: Wiley – IEEE Press, 2013, p. 789–863.

[4] Отчет Комиссии РАО «ЕЭС России» по расследованию аварии в ЕЭС России, произошедшей 25 мая 2005 года, М: 2005. – Режим доступа: <http://www.yug-so-ups.ru/Page.aspx?IdP=657>. – (Дата обращения: 18.02.2019).

[5] Ивакин, В.И. Электропередачи и вставки постоянного тока и статические тиристорные компенсаторы / В.И. Ивакин, Н.Г. Сысоева, В.В. Худяков. – М.: Энергоатомиздат, 1993; 336 с.

[6] Везироглу, Т.Н. Энергетическая система на основе термоядерного синтеза водорода / Т.Н. Везироглу // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAE). – 2017. – № 16–18. – С. 16–29; <https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.16-18.016-029>.

[7] Бокрис, Дж.О'М. Солнечно-водородная энергия. Сила, способная спасти мир. Дж.О'М. Бокрис, Т.Н. Везироглу, Д. Смит. Пер. с англ. Дуников Д. О. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 164 с.

[8] Измайлов, С.В. Новые подходы к созданию энергоинформационных распределительных систем / С.В. Измайлов, А.Р. Шульга, Р.Н. Шульга // Электротехника. – 2014. – № 2. – С. 39–43.

[9] Измайлов, С.В. Реализация облачной информационной технологии для контроля, мониторинга и управления распределительными энергосистемами / С.В. Измайлов, А.Р. Шульга, Р.Н. Шульга // Электротехника. – 2013. – № 12. – С. 52–57.

[10] Гетманова, Н.Ю. Облик цифровой системы управления, регулирования и защиты перспективной вставки постоянного тока / Н.Ю. Гетманова, В.А. Местергазин, Р.Н. Шульга // Научно-практическая конференция «Опыт и перспективы применения СПП и ППТ». – 2016.

[11] «Сеть 2030». Национальный взгляд (видение) на второе столетие электроэнергетики. Вашингтон, 2–3 апреля 2003. – 31 с.

[12] Шульга, Р.Н. К вопросу о возможности создания гибридной энергораспределительной сети ГЭРС с накоплением электроэнергии / Р.Н. Шульга //



Новое в российской электроэнергетике. – 2015. – № 12. – С. 29–44.

[13] Шульга, Р.Н. Анализ средств управления режимами работы кабельных и воздушных линий переменного тока / Р.Н. Шульга, М.Ю. Дружинин // Новое в Российской электроэнергетике. – 2017. – № 5. – С. 37–55.

[14] Каменев, А.С. Нейромоделирование как инструмент интеллектуализации энергоинформационных систем / А.С. Каменев, С.Ю. Королев, В.Н. Соколушенко. – М.: ИЦ Энергия, 2012. – 124 с.

[15] Шульга, Р.Н. Автономное энергоснабжение с использованием разнородной генерации / Р.Н. Шульга // Электро. – 2015. – № 3. – С. 7–11.

[16] Соломин, Е.В. Использование ветро-водородного комплекса бесперебойного энергоснабжения в различных климатических условиях / Е.В. Соломин [др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2018. – № 13–15. – С. 30–54; <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.13-15.030-054>

[17] Solomin, E. Wind-hydrogen standalone uninterrupted power supply plant for all-climate application / E. Solomin et al // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – Vol. 44. – Issue 7. – P. 3433–3449; <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.001>.

[18] Суд, В.К. HVDC and FACTS Controllers: Применение статических преобразователей в энергетических системах / В.К. Суд. – пер. с англ. НП «НИИА», 2009. – 344 с.

[19] Челик, С. Микроуровневый двумерный термический анализ и анализ напряжений на границе раздела анод – электролит твердоокисного топливного элемента. / С. Челик и др. // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 22–24. – С. 110–120; <https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.22-24.110-120>.

[20] Везироглу, А. Преимущества ускоренного введения в эксплуатацию транспортных средств на водородном топливе: Анализ оценочных показателей. / А. Везироглу, Р. Макарио // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2014. – № 2. – С. 29–76.

[21] Бредихин, С.И. Стационарные энергетические установки с топливными элементами: материалы, технологии, рынки / С.И. Бредихин [др.]. – М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорации «ЕЭЭК», 2017. – 392 с.

[22] Лисицын, Л.Г. Комплексное решение проблем автоматизации перспективных вставок постоянного тока / Л.Г. Лисицын, В.А. Местергазин, Р.Н. Шульга // Электро. – 2017. – № 2. – С. 21–25.

[23] Шульга, Р.Н. Характеристики накопителей и статических преобразователей / Р.Н. Шульга // Энергосбережение и водоподготовка. – 2016. – №1 (99). – С. 68–76.

[24] Шульга, Р.Н. Распределенная генерация с использованием ВИЭ в составе мультиагентных систем постоянного тока / Р.Н. Шульга // Энергосбере-

жение и водоподготовка. – 2017. – № 5 (109). – С. 58–68.

[25] Путилов, В.Я. Некоторые технические и экологические аспекты применения накопителей электроэнергии в энергетике / В.Я. Путилов, Р.Н. Шульга // Электро. – 2016. – № 1. – С. 6–12.

[26] Шульга, Р.Н. Облик накопителя электроэнергии на основе литий-ионных аккумуляторов мегаваттного класса мощности / Р.Н. Шульга [др.] // Электро. – 2017. – № 6. – С. 38–44.

References

[1] Rogalev N.D., Molodyuk V.V. Problems of developing the Russian electric power industry and ways to address them (Problemy razvitiya elektroenergetiki Rossii i puti ikh resheniya). XXVIII International Scientific and Technical Conference TRAVEK “Prospects for the development of electric power industry and high-voltage electrical equipment”, November 7–8, 2018, Moscow (in Russ.).

[2] Makarov Yu.V. et al. Blackout prevention in the United States, Europe and Russia. *Proceedings of the IEEE*, 2005;93(11):1942–1955.

[3] Besanger Y., Eremia M., Voropai N. Major grid blackouts: Analysis Classification, and Prevention. Handbook of Electrical Dynamics System: Modeling, Stability, and Control. New Jersey: Wiley – IEEE Press, 2013, p. 789–863.

[4] Report of the Commission of RAO “UES of Russia” on the investigation of the accident in the UES of Russia occurred on May 25, 2005 (Otchet Komissii RAO “EES Rossii” po rassledovaniyu avarii v EES Rossii, proizoshedshei 25 maya 2005 goda). Moscow: 2005. Available on: <http://www.yug.soups.ru/Page.aspx?IdP=657> (02.18.2019) (in Russ.).

[5] Ivakin V.I., Sysoyeva N.G., Khudyakov V.V. Transmissions and DC-inserts and static thyristor compensators (Elektroperedachi i vstavki postoyannogo toka i staticheskie tiristornye kompensatory). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1993, 336 p. (in Russ.).

[6] Veziroglu T.N. Energy system based on thermonuclear synthesis of hydrogen (Energeticheskaya sistema na osnove termoyadernogo sinteza vodoroda). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2017;(16–18):16–29 (in Russ.).

[7] Bockris J.O'M., Veziroglu T.N., Smith D. Solar hydrogen energy: the power to save the earth. London: Macdonald Optima, 1991, 147 p.

[8] Izmailov S.V., Shulga A.R., Shulga R.N. New approaches to the creation of energy-information distribution systems (Novyye podkhody k sozdaniyu energoinformatsionnykh raspredelitel'nykh sistem). *Electrical Engineering*, 2014;(2):39–43 (in Russ.).

[9] Izmailov S.V., Shulga A.R., Shulga R.N. Implementation of cloud information technology for monitoring and control of distribution grids (Realizatsiya oblachnoy informatsionnoy tekhnologii dlya kontrolya,



monitoringa i upravleniya raspredelitel'nyimi energosistemami). *Electrical Engineering*, 2013;(12):52–57 (in Russ.).

[10] Getmanova N.Yu., Mestergazin V.A., Shulga R.N. The appearance of a digital control system, regulation and protection of a perspective DC insert (Oblik tsifrovoy sistemy upravleniya, regulirovaniya i zashchity perspektivnoy vstavki postoyannogo toka). *Scientific-practical conference "Experience and prospects for the use of SPP and PPT"*, 2016 (in Russ.).

[11] "Network 2030", National View (Vision) for the Second Century of the Electric Power Industry, Washington, April 2–3, 2003; 31 p.

[12] Shulga R.N. On the issue of the possibility of creating a hybrid energy distribution network with the accumulation of electricity (K voprosu o vozmozhnosti sozdaniya gibridnoy energoraspredelitel'noy seti GERS s nakopleniyem elektroenergii). *New in the Russian electric power industry*, 2015;(12):29–44 (in Russ.).

[13] Shulga R.N., Druzhinin M.Yu. Analysis of controls for operating modes of cable and overhead lines of alternating current (Analiz sredstv upravleniya rezhimami raboty kabel'nykh i vozdushnykh liniy peremennogo toka). *New in the Russian electric power industry*, 2017;(5):37–55 (in Russ.).

[14] Kamenev A.S., Korolev S.Yu., Sokotushchenko V.N. Neuro modeling as a tool for the intellectualization of energy information systems (Neyromodelirovaniye kak instrument intellektualizatsii energoinformatsionnykh sistem. Moscow: EC Energy Publ., 2012; 124 p. (in Russ.).

[15] Shulga R.N. Autonomous power supply using heterogeneous generation (Avtonomnoye energosnabzheniye s ispol'zovaniyem raznorodnoy generatsii). *Electro*, 2015;(3):7–11 (in Russ.).

[16] Solomin E.V. et al. Use of the wind-hydrogen complex of uninterrupted power supply in various climatic conditions (Ispol'zovaniye vetro-vodorodnogo kompleksa bespereboynogo energosnabzheniya v razlichnykh klimaticheskikh usloviyakh). *International Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2018;(13–15):30–54 (in Russ.).

[17] Solomin E. et al. Wind-hydrogen standalone uninterrupted power supply for all-climate application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019;44(7):3433–3449.

[18] Court V.K. HVDC and FACTS Controllers: The use of static converters in energy systems / NP "NIIA", 2009; 344 p.

[19] Celik S., Ibrahimoglu B., Mat M.D., Kaplan Yu., Veziroglu T.N. Microlevel two-dimensional thermal analysis and stress analysis at the anode – electrolyte interface of a solid oxide fuel cell (Mikrourovnevnyy dvumernyy termicheskiy analiz i analiz napryazheniy na granitse razdela anod – elektrolit tverdookisnogo toplivnogo elementa). *International Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2017;(22–24):110–120 (in Russ.).

[20] Veziroglu A., Macario R. Countries to benefit most from early transition to hydrogen fueled transportation: merit factor analysis (Preimushchestva uskorennoy vvedeniya v ekspluatatsiyu transportnykh sredstv na vodorodnom toplive: Analiz otsenochnykh pokazateley). *International Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2014;(2):29–76 (in Russ.).

[21] Bredikhin S.I. et al. Stationary power plants with fuel cells: materials, technologies, markets (Statsionarnyye energeticheskiye ustanovki s toplivnymi elementami: materialy, tekhnologii, rynki). Moscow: NTF "Energoprogress" of EEK Corporation, 2017; 392 p. (in Russ.).

[22] Lisitsyn L.G., Mestergazin V.A., Shulga R.N. A comprehensive solution of automating perspective DC insert problem (Kompleksnoye resheniye problem avtomatizatsii perspektivnykh vstavok postoyannogo toka). *Electro*, 2017;(2):21–25 (in Russ.).

[23] Shulga R.N. Characteristics of drives and static converters (Kharakteristiki nakopiteley i staticheskikh preobrazovateley). *Energy Saving and Water Treatment*, 2016;1(99):68–76 (in Russ.).

[24] Shulga R.N. Distributed generation using renewable energy as part of multi-agent DC systems (Raspredelennaya generatsiya s ispol'zovaniyem VIE v sostave mul'tiagentnykh sistem postoyannogo toka). *Energy Saving and Water Treatment*, 2017;5(109):58–68 (in Russ.).

[25] Putilov V.Ya. Shulga R.N. Some technical and environmental aspects of the use of electricity storage devices in the power industry (Nekotoryye tekhnicheskiye i ekologicheskkiye aspekty primeneniya nakopiteley elektroenergii v energetike). *Electro*, 2016;(1):6–12 (in Russ.).

[26] Shulga R.N. The appearance of an electricity storage device based on lithium-ion batteries of megawatt power class (Oblik nakopiteleya elektroenergii na osnove lityy-ionnykh akkumulyatorov megavattnogo klassa moshchnosti). *Electro*, 2017;(6):37–44 (in Russ.).

Транслитерация по BSI

