



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕТРО-ВОДОРОДНОГО КОМПЛЕКСА БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ*

*Е.В. Соломин¹, И.М. Кирпичникова¹, Р.А. Амерханов²,
Д.В. Коробатов¹, М. Лутовац³, А.С. Мартьянов¹*

¹Южно-Уральский государственный университет
д. 76, пр. Ленина, Челябинск, 454080, Россия

тел./факс: +7(912)317-18-05; e-mail: martyanov_andrey@mail.ru

²Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина
д. 13, ул. Калинина, Краснодар, 350044, Россия

тел.: +7(861)221-58-54; e-mail: energyksau@mail.ru

³Факультет Белградского союзного университета
Сербская академия наук и искусств, Белград, Сербия
e-mail: gsmmitar@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.030-054

Заключение совета рецензентов: 30.01.18 Заключение совета экспертов: 06.02.18 Принято к публикации: 14.02.18

Представлен проект по созданию автономного энергокомплекса на основе ветроэнергетической установки и водородного модуля мощностью 3 кВт с дальнейшим тиражированием до 50 кВт. Показаны возможности эксплуатации данного комплекса в самых разных климатических условиях России: Сибири, Дальнего Востока, Северного Кавказа, Краснодарского края, – а также для универсального использования в климатических зонах Арктики и Антарктики, пустынях Африки и изолированных островов с характерными разрушительными морскими соляными туманами.

Проведены изучение, комплексный анализ и сравнение известных типов и классов ветроэнергоустановок, в результате которых представлена разработанная авторами инновационная многоярусная масштабируемая вертикально-осевая ветроэнергетическая установка. Эта установка использовалась в качестве основного источника питания, бесперебойная часть которого базируется на циклически работающем водородном модуле, содержит электролизер, систему топливных элементов и накопитель водорода с системой коммуникаций и управления. Компоненты разработанной авторским коллективом силовой установки функционируют на едином напряжении постоянного тока и могут подключаться к общей шине с увеличением мощности энергокомплекса. Гибкие алгоритмы управления позволили оптимизировать работу энергокомплекса для снижения частоты пусков-остановов, тем самым увеличив и срок эксплуатации, и временные промежутки между ремонтным обслуживанием. Дистанционное управление обеспечило контроль и управление процессами выработки электроэнергии и хранения водорода с помощью Интернет-технологий в длительных режимах.

Исследования показали, что данное оборудование является долговечным, надежным и экологически безопасным, система – модульной и гибкой, так как легко масштабируется под конкретного потребителя, включая персональное энергопотребление и малый бизнес. Кроме того, разработанный энергокомплекс является доступным по стоимости приобретения, монтажа и эксплуатации для удаленных потребителей энергии, поскольку оценочная стоимость оборудования коррелирует со стоимостью установки линии электропередачи, а эксплуатация оборудования не требует значительных инженерных и технических навыков.

*Соломин Е.В., Кирпичникова И.М., Амерханов Р.А., Коробатов Д.В., Лутовац М., Мартьянов А.С. Использование ветро-водородного комплекса бесперебойного энергоснабжения в различных климатических условиях // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(13-15):30-54.

Ключевые слова: ветроэнергетика; источник бесперебойного питания; водородный носитель; возобновляемая энергия; производство электроэнергии; вертикально-осевая ветроэнергетическая установка; оптимальный многоярусный ротор; масштабируемая; гибкая; модульная.

THE USE OF WIND-HYDROGEN UNINTERRUPTED POWER SUPPLY PLANT IN DIFFERENT CLIMATIC CONDITIONS

*E.V. Solomin¹, I.M. Kirpichnikova¹, R.A. Amerkhanov², D.V. Korobov¹,
M. Lutovats³, A.S. Martyanov¹*

¹South-Urals State University
76 Lenin St., Chelyabinsk, 454080, Russia
tel./fax: +7 912 317 18 05, e-mail: martyanov_andrey@mail.ru

²Kuban State Agrarian University
13 Kalinina St., Krasnodar, 350044, Russia
tel.: +7 988 242 63 30, e-mail: energyksau@mail.ru

³Faculty of Business and Industrial Management
Belgrade, Serbia
e-mail: gsmmitar@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.030-054

Referred 30 January 2018 Received in revised form 6 February 2018 Accepted 14 February 2018

The paper presents the project of the autonomous power complex on the basis of wind-power plant and hydrogen module with a capacity in 3 kW with further replication to 50 kW and shows the possibilities of operation of the present plant in different climatic conditions of Russia: Siberia, the Far East, the Northern Caucasus, Krasnodar territory, and also for universal use in climatic zones of the Arctic and Antarctic, deserts of Africa and the isolated islands with typical destructive sea salt fogs.

This paper carries out the study, comprehensive analysis and comparison of known types and classes of wind plants, as a result of which the authors have developed an innovative multi-tier scalable vertically-axial wind power plant. This unit is used as the main power source, the uninterrupted part of which is based on a cyclically operating hydrogen module, contains an electrolytic cell, a fuel cell system and a hydrogen storage device with a communication and control system. The components of the power plant developed by the authors' team operate at a single DC voltage and can be connected to a common bus bar with an increase of power in this complex. Flexible control algorithms allow optimizing the operation of the power complex to reduce the start-stop frequency, thereby increasing both the service life and time intervals between maintenance. Remote control provides monitoring and management of electricity output processes and hydrogen storage with the help of Internet technologies in long-term modes.

The study has shown that this equipment is long-lived, reliable and environmentally friendly, and the system is modular and flexible because it is easily scaled under consumer's control including the personal power consumption and small business. Moreover, the developed power plant is accessible in purchase, mounting and operation for remote energy consumers as far as the assessed value of equipment is correlating with the cost of power line installation and the operation of equipment does not require large engineering and technological skills.

Keywords: wind energy; hydrogen based uninterruptible power supply; renewable energy; power generation; vertical axis wind turbine; optimal multi-tier development; scalable flexible modular.



Евгений Викторович
Соломин
Evgeniy Solomin

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы» Южно-Уральского гос. университета.

Образование: Будапештский технический университет (1990 г.).

Область научных интересов: ветроэнергетика; солнечная энергетика; распределенная энергетика; возобновляемые источники энергии; гибридные энергокомплексы.

Публикации: более 200.

h-index (РИНЦ): 12

h-index (Скопус): 4

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Professor at Electric Stations, Grids and Systems Dept. of South Ural State University.

Education: Budapest Technical University, 1990.

Research interests: wind power; solar power; distributed power; renewable energy; combine energy complexes.

Publications: more than 200.

SPIN-код: 7191-4503

ResearcherID: A-2409-2014

Scopus ID: 56497029400



*Ирина Михайловна
Кирпичникова
Irina Kirpichnikova*

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы» Южно-Уральского гос. университета.

Образование: Челябинский институт механизации и электрификации сельского хозяйства (1979 г.).

Область научных интересов: ветроэнергетика; солнечная энергетика; распределенная энергетика; возобновляемые источники энергии; гибридные энергокомплексы.

Публикации: более 150.
h-index (РИНЦ):6
h-index (Скопус): 2
SPIN-код: 4553-2206

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Professor at the Department of Electric Stations, Grids and Systems, South Ural State University.

Education: Chelyabinsk Institute of Mechanical and Electric Engineering in Agriculture, 1979.

Research interests: wind power; solar power; distributed power; renewable energy; combine energy complexes.

Publications: more than 150.
Researcher ID: A-3968-2014
Scopus ID: 55979971200



*Роберт
Александрович
Амерханов
Robert Amerkhanov*

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры «Электротехника, теплотехника и возобновляемые источники энергии» Кубанского государственного аграрного университета имени И.Т. Трубилина.

Образование: Краснодарский институт пищевой промышленности (1960 г.).

Область научных интересов: энергосбережение естественных ресурсов при использовании нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в агропромышленном комплексе.

Публикации: около 500.
h-index (РИНЦ): 15
h-index (Скопус): 3

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor at the Department of Electric Technology, Heat Technology and Renewable Sources of Energy, Kuban State Agrarian University.

Education: Krasnodar Institute of Food Industry, 1960.

Research interests: energy saving of natural resources under usage of non-traditional and renewable sources of energy in agro-industrial complex.

Publications: more than 500.
SPIN-код: 4139-7234
Scopus ID: 55480629300



*Денис Владимирович
Коробатов
Denis Korobatov*

Сведения об авторе: канд. тех. наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Южно-Уральского гос. университета.

Образование: Челябинский государственный технический университет (1997 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; ветроэнергетика; системы управления; контроллеры; электроприводы; накопители энергии; электрические машины.

Публикации: более 50.
h-index (РИНЦ):4
h-index (Скопус): 3
SPIN-код: 1307-5453

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Associate Professor of Electric Stations, Grids and Electric Supply Systems Dept. of South Ural State University.

Education: Chelyabinsk State Technical University, 1997.

Research interests: renewable energy sources; wind power engineering; control system; controllers; electric drives; energy storage; electric machine.

Publications: more than 50.
ResearcherID: G-8755-2014
Scopus ID: 55229369300



*Митар Лутовац
Mitar Lutovac*

Сведения об авторе: академик, профессор, доцент Факультета бизнеса и промышленного менеджмента Белградского союзного университета.

Образование: магистратура технического факультета (2008 г.).

Область научных интересов: информационные технологии; ВИЭ.

Публикации: более 35.

Information about the author: Acad., Professor, Docent, Faculty of Business and Industrial Management, University Union Belgrade.

Education: magistracy of Faculty, 2008.

Research interests: information technology; RES.

Publications: more than 35.





Андрей Сергеевич
Мартьянов
Andrey Martyanov

Сведения об авторе: канд. тех. наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Южно-Уральского гос. университета.

Образование: Челябинский государственный технический университет (1997 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; ветроэнергетика; системы управления; контроллеры; электроприводы; накопители энергии; электрические машины.

Публикации: более 50.

h-index (РИНЦ): 8

h-index (Скопус): 3

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Associate Professor of Electric Stations, Grids and Systems Dept. of South Ural State University.

Education: Chelyabinsk State Technical University, 1997.

Research interests: renewable energy sources; wind power engineering; control system; controllers; electric drives; energy storage; electric machine.

Publications: more than 50.

SPIN-код: 7745-3958

ResearcherID: A- 3902-2014

Scopus ID: 57170580600

1. Введение

В условиях непредсказуемых изменений климата до сих пор не найдены ответы на вопросы: насколько виновно человечество в этих глобальных изменениях; надолго ли хватит запасов ископаемого топлива; так ли судьбоносны выбросы CO/CO₂ и другие. Дискуссии по этим темам являются противоречивыми, часто лоббируются крупными корпорациями, однако ученые, инженеры и, наконец, человечество в целом должны принять наиболее универсальные меры для решения этих проблем [1].

Мировое сообщество давно пришло к решению о том, что переход от традиционных к возобновляемым источникам энергии, определяющими свойствами которых являются неисчерпаемость и экологичность, становится необходимым выходом из сложившейся ситуации. Следует отметить, что правительства многих стран уже договорились о значительном увеличении доли возобновляемой энергетики [2]. Кроме получения экологически чистой энергии, применение ВИЭ позволит снабдить электроэнергией объекты агропромышленного комплекса, большое количество локальных потребителей, включая разведку и освоение Северного и Южного полюсов Земли, наблюдение за океанами, электроснабжение метеостанций, вышек сотовой связи и т.д. Проблемы, с которыми исследователи сталкивались в холодных регионах России, при разведке Арктики и Антарктики (холодный пуск двигателя, выход из строя оборудования, растрескивание сварных швов и др.) [3] хорошо известны. Но данные проблемы не могут быть успешно решены без новых методов, в частности, инфраструктура территорий с холодными

климатическими условиями все еще недостаточно развита, так как промышленное строительство и транспортная логистика ограничены [4].

В русле этого тренда авторами разработан проект энергокомплекса на основе ВИЭ, который может работать в любых климатических условиях. В качестве основных были поставлены следующие задачи: достижение максимальной надёжности электроснабжения и высокого КПД установки при низкой стоимости изделия; минимизация экологического ущерба в период производства и эксплуатации (минимальный объем выбросов CO₂); создание оборудования с минимальным аэродинамическим и механическим шумом, низкой вибрацией и отсутствием инфразвука, рассчитанного на длительный срок службы.

На начальных этапах проекта было необходимо выбрать:

- вид ВИЭ;
- вид энергогенерации;
- тип энергоустановки;
- способ аккумулирования энергии;

а также сделать экономические расчёты.

Результатом проделанной работы стала надежная ветроэнергетическая установка (ВЭУ) в сочетании с водородным накопителем энергии, предназначенным для обеспечения бесперебойного энергоснабжения по аналогии с [1] и [5], в которых были показаны возможности создания ветро-водородных установок. Но в отличие от теоретических исследований в настоящей работе, исходя из опыта эксплуатации оборудования в холодных климатических условиях, была предпринята попытка реальной адаптации генерирующего оборудования со специфическими компонентами для низкотемпературных условий местности.

Список обозначений	
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
<i>Ср</i>	Коэффициент мощности (коэффициент использования энергии ветра)
<i>Аббревиатуры</i>	
DC	Постоянный ток
VAC	Вольт переменного тока
VDC	Вольт постоянного тока
БПС	Базовая передающая станция
БЭЯ	Батарея (стек) электролизных ячеек

Продолжение списка обозначений

ВАВ	Всемирная ассоциация ветроэнергетики
ВБ	Водяной бак
ВВЭК	Ветро-водородный энергокомплекс
ВдрН	Водородный насос
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
ВН	Водяной насос
ВОВЭУ	Вертикально-осевая ветроэнергетическая установка
гСО ₂ eq	Эквивалент одного грамма СО ₂
ГОВЭУ	Горизонтально-осевая ветроэнергетическая установка
ДГ	Дизельный генератор
ИСО	Международная организация по стандартизации
КПД	Коэффициент полезного действия
МВТ	Малая ветротурбина
МК	Модуль компрессии
МТЯ	Модуль топливных ячеек
МЭ	Модуль электролизера
МЭК	Международная электротехническая комиссия
НВ	Накопитель водорода
НК	Накопитель кислорода
н.м ³	Нормальный кубометр
ПЛК	Программируемый логический контроллер
СМУ	Система мониторинга и управления
СТЭ	Система топливных элементов
СЭЯ	Стек электролизных ячеек
ТЭ	Топливные элементы

2. Методика исследований

Типовой автономный потребитель энергии в отдаленных регионах, таких как северный районы России, Сибирь, Арктика, Антарктика, Аляска, Африка, требует относительно небольшой мощности – до 10 кВт. Такой же уровень бытового энергопотребления можно наблюдать по всему миру, если электроэнергия используется достаточно эффективно.

Сегодня рекреационные районы и отдаленные поселения для удовлетворения своих потребностей в энергообеспечении используют в основном дизельные генераторы. Но такой подход является чрезвычайно сложным, так как требует регулярных поставок топлива в труднодоступные места, что, в свою очередь, приводит к существенному удорожанию генерируемой энергии. В связи с этим возобновляемые источники энергии служат единственным локально доступным средством энергообеспечения [4, 5].

При ответе на вопрос, какой вид возобновляемых источников энергии (ВИЭ) будет использоваться для работы энергоустановки, предназначенной, в том числе, для экстремальных климатических условий, очень важно учитывать особенности арктических территорий: длительное отсутствие солнечного света в течение полярной ночи [6]; трудность использования энергии биомассы на крайних широтах [7]; отсутствие гидроэнергетики в холодном климате [8]; ограниченное использование приливной и волновой энергии [9] и т.д. – то есть тот факт, что ни солнечная, ни приливная энергетика не смогут обеспечить регулярную ге-

нерацию энергии [10]. На основе проведенных исследований выбор был сделан в пользу ветра.

Правильность такого выбора подтверждают и другие расчёты. Каждая энергетическая установка, преобразующая энергию воздушных масс, выделяет в 10 ÷ 20 раз меньше парниковых газов, чем было выделено при производстве ее компонентов [11]. Так, при производстве ВЭУ номинальной мощностью 3 кВт с мачтой массой около 0,5 т, состоящей главным образом из углеродистой стали, в атмосферу выбрасывается до 1,1 т СО₂ в соответствии с таблицей А. III.8 [12] (общая интенсивность выбросов 2,2 тСО₂/т стали для 2010 г.) и дополнительно 0,3 тыс. т во время эксплуатации в соответствии с таблицей А. III.2 [12] (выбросы за время эксплуатации 11 гСО₂eq/кВт·ч), составляя суммарно всего 1,4 т СО₂. При выработке 0,390 кВт мощности и средней скорости ветра не менее 5 м/с с коэффициентом мощности $C_p = 0,4$ в течение 30 лет эксплуатации общая сумма составит около 100 000 кВт·ч. Для сравнения при эквивалентной производительности традиционного бензинового генератора (100 000 кВт·ч) будет сжигаться 10 000 литров бензина Е10 (стандарт DIN EN 228-2004), что приведет к выбросу 21 т СО₂ (с учетом того, что для генерации 1 кВт·ч требуется около 0,1 л бензина, и сгорание одного литра бензина Е10 приведет к выбросу около 2,1 кг СО₂ [13]). При этом необходимо отметить, что использование ВЭУ уменьшает выбросы СО₂ в 14 раз по сравнению с традиционными энергетическими установками.



2.1. Малая распределённая ветроэнергетика

Генерирующее оборудование, подключенное к сети, очень зависит от местной конъюнктуры, а его цена часто находится под политическим влиянием. Поэтому стоимость подключения потребителей энергии к сети, как правило, непомерно высока, особенно если расстояние до точки подсоединения является существенным [14].

Поскольку в большинстве случаев именно стоимость становится основой для принятия решения в пользу распределённой генерации [3], ключевым фактором является анализ затрат, особенно на оборудование и пусконаладочные работы. По данным [6], типичная новая воздушная однофазная линия передачи 69 кВ стоит приблизительно \$178,125 за км в сравнении с \$0,9 миллиона за км для новой линии подземной магистрали 69 кВ (без окончных устройств). Новая воздушная многофазная линия 138 кВ стоит приблизительно \$243,700 за км по сравнению с \$1,25 млн за км подземной магистрали (без окончных устройств). При таких разовых и ежемесячных платежах удаленному индивидуальному потребителю, не подключенному к сети и не нуждающемуся в больших количествах энергии, подойдут автономные энергоустановки на ВИЭ, тем более небольшая система генерации стоимостью \$10 ÷ 50 тыс. находится в пределах экономической досягаемости большой группы потребителей [15]. Кроме того, большим плюсом являются одновременные траты на установку генерирующих мощностей, эксплуатируемых на долгосрочной основе и не облагаемых налогом.

Самый крупный компонент затрат – стоимость турбины ветроэнергетической установки, которая может составлять 70 % или более от всей стоимости ВЭУ, остальные капитальные затраты – стоимость монтажа и создание инфраструктуры. При этом наблюдается некоторое снижение капитальных затрат при вводе в эксплуатацию ветроэнергетических установок, которое обусловлено главным образом значительным сокращением стоимости самих ВЭУ. Так, в отчете о рынке ветроэнергетических технологий [11] сообщается, что затраты на ввод в эксплуатацию одной ВЭУ в 2016 г. составили примерно \$1 590/кВт, что на \$780/кВт меньше, чем в 2009 г. и 2010 г.

Следует отметить, что сегмент бытовых и коммерческих потребителей составляет более 40 % от общего потребления энергии в развитых странах [7] и отражает глобальный потенциальный рынок мощностью не менее 3 млрд кВт. [15]. Это свидетельствует о том, что малая ветроэнергетика сегодня востребована и будет стремительно развиваться. Так, Департамент энергетики США, способствующий развитию инновационных ветроэнергетических установок малой мощности с 1970 г. (Национальная лаборатория Сандиа), с 2004 г. финансирует разработки высокоэффективных вертикально-осевых ветроэнергетических установок (Национальная лаборатория Беркли) [15, 17, 18], в которых принимали участие авторы этой статьи, а в 2013 г. объявил ряд тен-

деров на разработку ВЭУ малой мощности. В 2013 г. Европейская комиссия обнародовала первые конкурсы на развитие малых ВЭУ (до 100 кВт). В начале 2014 г. Всемирная ассоциация ветроэнергетики (ВАВ) начала публиковать информацию о малой ветроэнергетике как обязательную рубрику. Значительный рост интереса к этому сегменту рынка демонстрируют десятки саммитов, форумов и конференций по малой ветроэнергетике. Кроме того, растут Интернет-продажи малых ВЭУ. В отчете, опубликованном ВАВ в 2016 г. [9], утверждается, что общая установленная мощность малых ветротурбин (МВТ) по всему миру приближается к 1 000 МВт, введено в эксплуатацию более миллиона установок средней мощностью 1 кВт. В отчете ВАВ за 2017 г. [10] даётся прогноз, согласно которому рынок малой ветроэнергетики вырастет до 1 900 МВт к 2020 г., прибавляя ежегодно до 270 МВт новой установленной мощности. Это подтверждается постоянно растущим потоком заказов на разработку генерирующих устройств для индивидуального использования на основе ВИЭ.

В соответствии со статистикой энергопотребления Евростата, индивидуальные домовладения потребляют почти такое же количество энергии (25,4 %), как и промышленность (25,3 %) [14]. Однако, в отличие от промышленности, рынок бытовой энергии можно было бы разделить на небольшие сегменты мощностью до 10 кВт. Средний индивидуальный потребитель расходует около 300 ÷ 1 000 кВт·ч в месяц при мгновенной потребляемой мощности 0,4 ÷ 0,8 кВт, что может обеспечить ВЭУ установленной мощностью 5 ÷ 10 кВт в зависимости от географических и природных условий.

Малая распределенная энергетика экономически выгодна и государству, потому что снижает ответственность и затраты властей в случае местных аварий или отключений. Если для использования ВЭУ средней и большой мощности, как правило, требуется развитая сетевая инфраструктура, заключение долгосрочных соглашений о покупке электроэнергии, множество согласований с коммунальными предприятиями, то в малой распределенной ветроэнергетике государство обычно просто компенсирует затраты на покупку и ввод в эксплуатацию ВЭУ, приобретая вырабатываемую электрическую энергию по выгодным для владельца ВЭУ тарифам, которые могут в несколько раз превышать долгосрочные ставки [19, 20]. Этот способ финансовой помощи применяется в США, Индии, Германии, Австралии, России и многих других странах.

Тенденция использования электростанций малой мощности, распределенных по территории страны, проявляется повсеместно, причём даже в богатых углеводородами странах, включая Саудовскую Аравию и Россию. Несмотря на то что в газифицированных районах ВИЭ пока не могут конкурировать с традиционными источниками энергии, в не электрифицированных и не газифицированных районах они



уже сейчас могут успешно применяться. При этом экономия может составить:

– 20 ÷ 50 % на строительстве электросетевых линий;

– 20 ÷ 30 % на вспомогательных конструкциях ВЭУ (если размещать ветроэнергетическую установку на кровлях зданий и сооружений – до 20 ÷ 50 % от полной стоимости ВЭУ).

Таким образом, малая ветроэнергетика завоевывает мировые рынки, стремительно совершенствуя технологии [21–23] и привлекая все больше финансирования [24]. Эти тенденции уже заметны на фоне глобальной статистики, как например, в докладах ВЭВ [25].

3. Устройство ветро-водородной энергетической установки и принцип её действия

Ветроэнергетические установки малой мощности. ВЭУ средней и большой мощности вобрали в себя все современные технологии авиационной и электротехнической промышленности. Однако мощность больших ВЭУ практически достигла своего пика на уровне 10 ÷ 13 МВт (продукция Siemens, Vestas, Enercon). Дальнейшее увеличение мощности осуществить крайне сложно ввиду ограниченной предельной прочности материалов, особенно для лопастей, длина которых может достигать 0,1 километра. Это означает, что развитие ВЭУ в сторону масштабирования замедляется или останавливается. Более того, ряд стран (США, Германия, Испания, Италия и др.) стараются вынести крупные ветровые электростанции подальше от населенных территорий, в частности в открытое море (так называемые офшоры). Это обусловлено рядом причин, включая низкочастотные помехи и другие отрицательные черты ВЭУ большой мощности [21]. ВЭУ малой мощности могут примирить генерирующие компании и потребителей и одновременно решить проблему местного электроснабжения благодаря своим особенностям.

В категорию ВЭУ малой мощности, согласно стандарту МЭК (IEC) 61400-2, попадают ВЭУ, имеющие омегаемую площадь ротора менее 200 м², что соответствует номинальной мощности около 50 кВт при напряжении ниже 1 000 В переменного тока или 1 500 В постоянного тока. В дополнение к этому стандарту несколько стран разработали свое собственное определение ВЭУ малой мощности, где значение максимальной мощности колеблется от 10 кВт до 100 кВт.

Срок окупаемости ВЭУ является основным аспектом приобретения электростанции. Этот период зависит от среднегодовой скорости ветра в месте установки ВЭУ, высоты мачты, местоположения площадки, стоимости энергии (оборудования) и производительности ВЭУ. Малые ВЭУ примерно в 10 раз экономически эффективнее, чем ВЭУ большой мощности, что математически доказано в [26]. Не-

смотря на то что на практике это пока не подтверждено, поскольку массового серийного производства МВТ нет нигде в мире, однако очевидно, что с ростом производства ВЭУ малой мощности их себестоимость должна снизиться.

Другой аспект использования ВЭУ малой мощности – эстетический. Некоторые люди утверждают, что крупные традиционные гигантские ВЭУ недостаточно привлекательны и плохо гармонируют с окружающей средой. Малые ВЭУ позволяют сгладить этот недостаток.

К проблемам, связанным с ветроэнергетикой, относится травматизм и гибель птиц от столкновения с движущимися лопастями ВЭУ.

Сравнительный анализ вертикально-осевых и горизонтально-осевых ВЭУ малой мощности. Одна из задач настоящего исследования заключалась в поиске решений для преодоления основных технических проблем ВЭУ. В этих целях был проведен сравнительный анализ вертикально-осевых (ВОВЭУ) и горизонтально-осевых ВЭУ малой мощности.

Для ВЭУ с горизонтальной осью вращения, как отмечается во многих публикациях [27, 28], основными недостатками конструкции являются: большая длина лопастей; необходимость принудительной раскрутки ротора при возникновении ветра; необходимость применения аэродинамического торможения при сильном ветре; работа конструкции в условиях циклической знакопеременной нагрузки; низкие резонансные частоты конструкции; более высокие эксплуатационные расходы.

Благодаря аэродинамическим свойствам ВЭУ с вертикальной осью вращения не производит инфразвуковых колебаний и не создает шума.

Непривлекательный с эстетической точки зрения вид ВЭУ с вертикальной осью вращения можно скрыть с помощью маскирующей окраски, которая позволяет создавать впечатление естественного происхождения ВЭУ (дерево и т.д.).

Поскольку у вертикально-осевых ВЭУ ротор вращается с гораздо меньшей скоростью, то вероятность травматизма птиц снижается почти до нуля. Это подтверждается тем, что отсутствуют зарегистрированные случаи гибели птиц от столкновения с вертикально-осевыми ВЭУ.

Лопастей для горизонтально-осевых ВЭУ (ГО-ВЭУ), как правило, изготавливаются вручную, что приводит к увеличению стоимости конечного изделия. В отличие от горизонтально-осевых ВЭУ, лопасти вертикально-осевых конструкций имеют неизменный по размеру профиль лопасти. Это значит, что процесс изготовления можно автоматизировать, при этом для формирования профиля потребуется минимальное количество пресс-форм.

Применение вертикально-осевых ветроэнергетических установок позволит еще больше увеличить генерацию электрической энергии, поскольку работа таких ВЭУ не зависит от направления ветра (утвер-



ждение о конкуренции с горизонтально-осевыми конструкциями до сих пор спорное, однако, впервые после закрытия исследований в конце 1970-х гг. Национальная лаборатория Сандия (США) объявила о возобновлении исследований в области вертикально-осевых ветроэнергетических установок [19], что может косвенно указывать на их частично не раскрытые преимущества).

Примером, подтверждающим достоинства вертикально-осевых конструкций, являются ВЭУ, разработанные в ходе проекта в тесном сотрудничестве с Национальной лабораторией Беркли (США). Данные установки имеют устойчивый старт на $1,5 \div 2$ м/с, надежное аэродинамическое управление и дублирование электрических и электромеханических тормозных систем. Циклическая нагрузка на лопасти значительно уменьшена благодаря статической и динамической балансировке ротора. Система управления контролирует уровень вибрации и позволяет ротору проходить резонансные частоты как можно быстрее. Вследствие этого рядом с ВЭУ не было зарегистрировано ни вибрации почвы, ни инфразвука при любой скорости ветра. ВЭУ предназначена для

длительной эксплуатации в любых климатических условиях. Испытания начались в Арктике в ноябре 2011 г. и до сих пор продолжаются, демонстрируя работоспособность конструкции в суровых арктических условиях.

Все компоненты ВОВЭУ разработаны с помощью двухуровневого проектного подхода. На 1-ом уровне производится разработка компонентов на основе специального программного обеспечения. На этом уровне компоненты обеспечивают максимальную эффективность в обособленном (не взаимосвязанном с остальной структурой) состоянии. На 2-ом уровне осуществляются силовые механические и электрические расчеты. Все компоненты пересчитываются с учетом максимально возможных взаимодействий с внешней средой и сопряженными компонентами (расчет на максимальные механические и электрические нагрузки).

Некоторые результаты моделирования в Nastran CFX и SolidWorks показаны на рис. 1. Расчет магнитных сил и теплообмена в Ansys Maxwell представлен на рис. 2. Подробную информацию можно получить в [29].

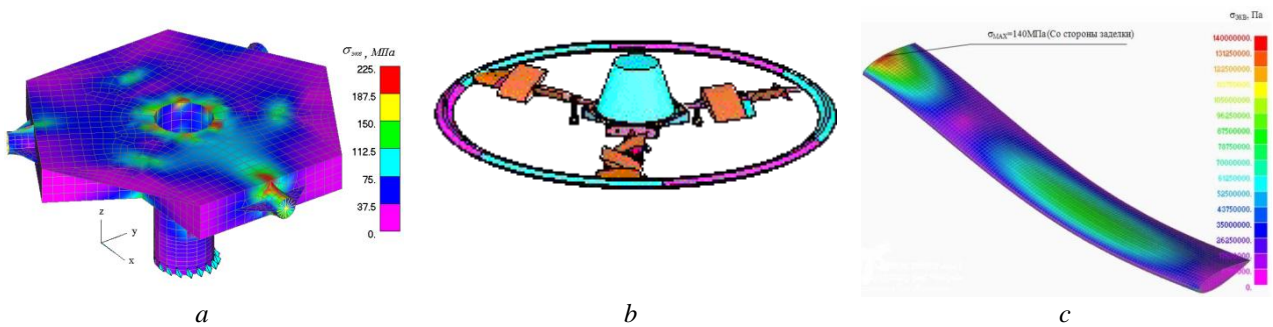


Рис. 1 – Компьютерное моделирование компонентов ротора ветротурбины: а – ступица (Nastran); б – аэродинамические компенсаторы (SolidWorks); в – лопасти (Nastran)
Fig. 1 – Computer modeling of wind rotor components: а – hub (Nastran); б – aerodynamic governors (SolidWorks); в – blade (Nastran)

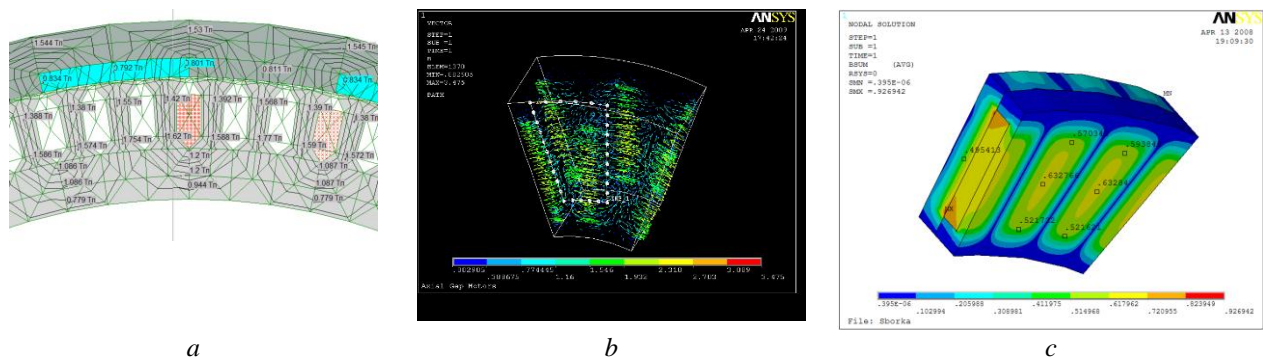


Рис. 2 – Компьютерное моделирование магнитных полей и тепловых процессов: а – магнитопровод (SolidWorks); б – магнитные поля (Ansys); в – расчет температуры (Ansys)
Fig. 2 – Computer modeling of magnetic fields and heat: а – magnetic forces (SolidWorks); б – magnetic fields (Ansys); в – heat calculations (Ansys)

Впервые разработаны ВЭУ для непрерывной работы на скорости ветра до 60 м/с (лучшие аналоги отключаются при скорости ветра 30 м/с) с постоян-

ной выработкой электроэнергии за счет стабилизации частоты вращения аэродинамическими регуляторами/тормозами.

Таким образом, комплексный анализ конструкций ВЭУ показал, что многоярусные вертикально-осевые ВЭУ являются наиболее подходящими для распределенных потребителей электроэнергии [4] с точки зрения эффективности, надежности, механической прочности, контроля вибрации, возможности аэродинамического торможения, электрического и электронного управления.

Всесторонний анализ различных видов ВИЭ и энергогенерации, типов энергоустановок и способов аккумулирования энергии позволил авторам приступить к разработке автономной ветро-водородной энергетической установки, схема кото-

рой представлена на рис. 3. При этом следует отметить, что компоненты электростанции подобраны таким образом, что любой из них может быть заменен аналогом с небольшими изменениями всей системы.

Общая схема электростанции аналогична [30], но имеет некоторые особенности. На рис. 3 показаны направления потоков электрической энергии от ветротурбины (ветрогенератора) к оборудованию для циклического процесса получения и окисления водорода с выделением энергии в системе топливных элементов, которое функционирует преимущественно при отсутствии ветра.

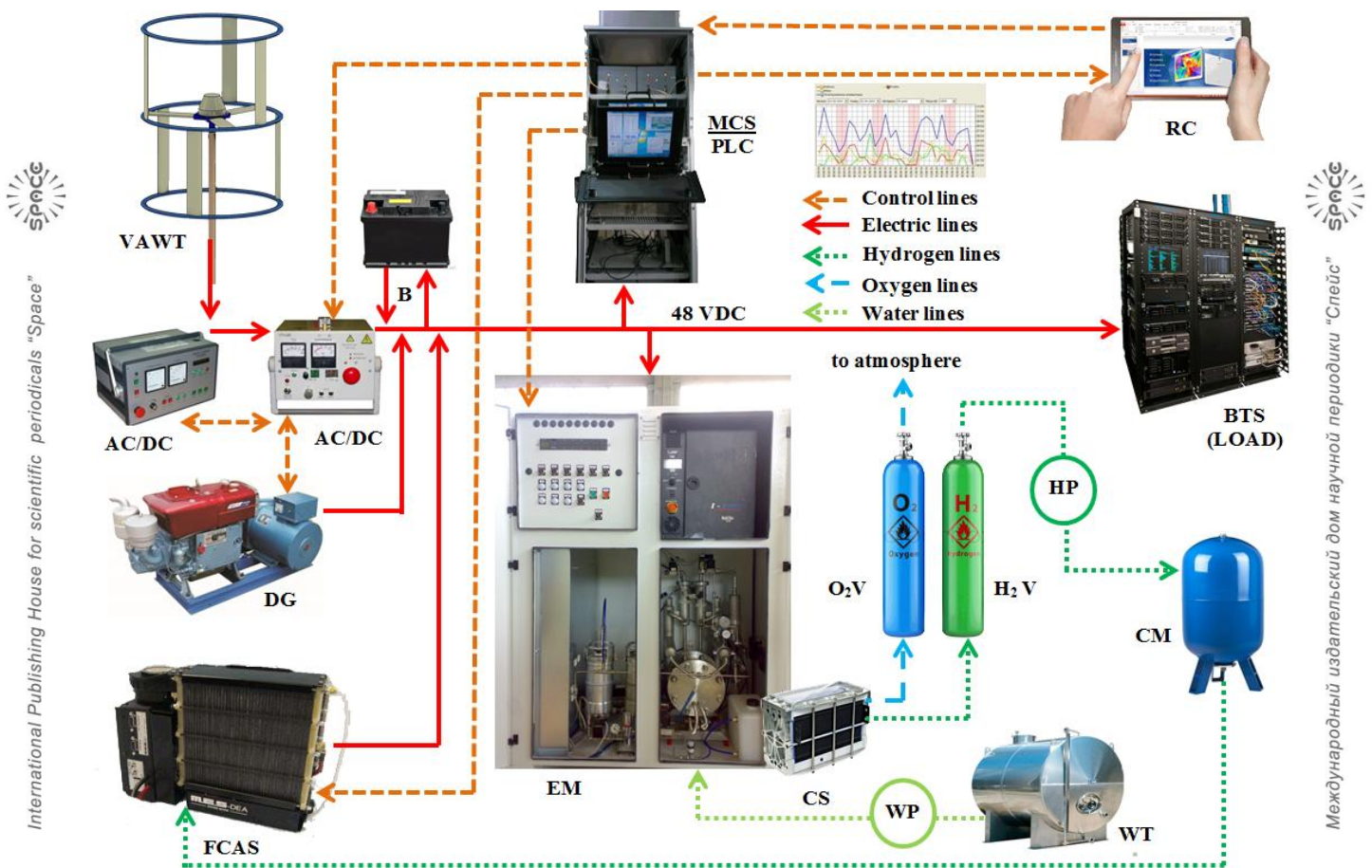


Рис. 3 – Ветро-водородный энергокомплекс с бесперебойным электроснабжением:

VAWT (ВОВЭУ) – вертикально-осевая ветроэнергетическая установка; AC/DC – преобразователь переменного тока в постоянный; DG (ДГ) – дизельный генератор; FCAS (МТЯ) – модуль топливных ячеек; B – аккумуляторная батарея; MSC (СМУ) – система мониторинга и управления; PLC (ПЛК) – программируемый логический контроллер; RC – удаленный компьютер; BTS (БПС) – базовая передающая станция; O₂V (HK) – накопитель кислорода; H₂V (HB) – накопитель водорода; EM (МЭ) – модуль электролизера; CS (БЭЯ) – батарея электролизных ячеек; CS (СЭЯ) – стек электролизных ячеек; HP (ВдрН) – водородный насос; WP (ВН) – водяной насос; WT – накопитель воды; CM (МК) – модуль компрессии.

Fig. 3 – Uninterruptible Wind-Hydrogen Power Plant: VAWT – Vertical Axis Wind Turbine; AC/DC – Alternating Current to Direct Current Converter; DG – Diesel Generator; FCAS – Fuel Cells Assembly System; B – Battery; MSC – Monitoring and Control System; PLC – Programmable Logic Controller; RC – Remote Computer; BTS – Base Transmitter or Differential Station; O₂V – Oxygen Vessel; H₂V – Hydrogen Vessel; EM – Electrolysis Module; CS – Cell Stack; CS – Cell Stack; HP – Hydrogen Pump; WP – Water Pump; WT – Water Tank; CM – Compression Module

Типичное место проведения испытаний характеризуется сильными ветрами, превышающими 7 ÷ 8 м/с с порывами до 60 м/с. Благодаря этому, вы-

рабатываемая мощность достаточна для питания системы получения и окисления водорода (технические характеристики приведены в табл.).

Технические данные
Performance Data

Таблица

Table

Параметр	Значения		
Вертикально-осевая ветроэнергетическая установка ВЭУ-3(6)			
<i>Производительность, кВт·ч в месяц, на скорости ветра</i>			
4 м/с (14 км/ч)	180 кВт·ч в месяц		
5 м/с (18 км/ч)	360 кВт·ч в месяц		
6 м/с (21 км/ч)	540 кВт·ч в месяц		
8 м/с (28 км/ч)	1 224 кВт·ч в месяц		
11 м/с (40 км/ч)	2 526 кВт·ч в месяц		
Диаметр ротора	3,4 м		
Высота ротора	4 м		
Ометаемая площадь	13,6 м ²		
Количество лопастей	6		
Материал лопасти	армированный стеклопластик		
Номинальная мощность	3 000 Вт		
Коэффициент мощности C_p	0,47		
Номинальная скорость ветра	11 м/с		
Стартовая скорость ветра	1,5 м/с		
Остановка при буревом ветре	нет (непрерывная работа до 60 м/с)		
Защита от сильного ветра	аэродинамическое регулирование		
Выходное напряжение постоянного тока	48 В		
Генератор [61]	синхронный, с постоянными магнитами		
Масса ветроколеса (ротора)	321 кг		
Крутящий момент на скорости ветра 60 м/с	20 кН		
Высота / масса мачты	12 м / 200 кг		
Шум на 20 м от ВЭУ на скорости ветра 11 м/с	не зарегистрировано		
Вибрация грунта на 5 м от турбины на 11 м/с	не зарегистрировано		
Электролизер			
Производительность по водороду	0,40 Нм ³ /час		
Чистота водорода по объему	99,99 %		
Рабочее нормальное давление	10 ÷ 20 бар		
Влажность водорода	насыщен		
Источник энергии	ВЭУ, 48 В постоянного тока, 3кВт		
Ток	10 ÷ 40 А		
Напряжение на 80 °С	48 VDC		
Потребляемая мощность (при рекомендуемом потоке газа H ₂)	2,2 кВт		
Мощность водяного насоса	0,1 кВт		
Мощность водородного насоса	0,4 кВт		
Потребление деминерализованной воды (<5 мС/см на 25 °С)	0,4 л/час		
Климатическое исполнение	термостатирована		
Минимальная / максимальная температура термостатирования	0 ÷ 35 °С		
Максимальная рабочая температура	80 °С		
Размеры шкафа	1 800 x 800 x 1 800 (высота) мм		
Массовая теплоемкость	H ₂	O ₂	H ₂ O
GAS, ккал/кг/°С	3,40	0,25	0,55
LIQ, ккал/кг/°С	–	–	1,00
Теплота испарения, вода (40 °С)	DNw = 580 ккал/кг		
Шум на 20 м	не зарегистрирован		
Вибрация почвы на 10 м	не зарегистрирована		
Датчик водорода	H240; аварийная сигнализация; диапазон 0,4 ÷ 5 % объемных единиц; температура эксплуатации 0 ÷ 45 °С; напряжение питания изменено до 48 В пост. тока		



Продолжение таблицы

<i>Модуль компрессии</i>	
Емкость	1 Нм ³
Давление	30 бар
<i>Топливные элементы</i>	
Максимальная выходная мощность	электрическая: 1 кВт; тепловая: 1 кВт
Выходное напряжение	24,0 ÷ 38,0 В постоянного тока
Удельная мощность	450 Вт/кг
Плотность мощности	330 Вт/л
Потребление водорода	13 л/мин, 0,06 кг/ч при полной загрузке (примерно 1Нм ³ /ч)
Чистота водорода	не хуже, чем по стандарту 4.5 [62]
Избыточное давление водорода	0,4 ÷ 0,5 бар
Подача кислорода	из окружающего воздуха
Давление воздуха	атмосферное
Дополнительное увлажнение газов	нет
Температура ячеек	не более 63 °С
Управление газом	циркуляция
Температура окружающей среды	0 ÷ +35 °С
Рабочий цикл	непрерывный
Охлаждение	принудительное охлаждение
Шум	70 дБ (на 1 м), не зарегистрирован на 10 м
Вибрация грунта на 5 м	не зарегистрировано
ПК-интерфейс	мониторинг Н ₂
Коммуникации	CAN шина 2,0 В
Число ячеек	40 ячеек (61 см ² активн. площади)
Размеры шкафа	350 x 235 x 140 мм
Масса	5,0 кг
<i>Базовая передающая станция (потребитель)</i>	
Потребляемая мощность	0,5 кВт (примерно 80 % времени) до 2 кВт (примерно 20 % времени)

3.1. Анализ систем бесперебойного электроснабжения на основе использования водорода

Непостоянство ВИЭ, в частности скорости ветра, которое препятствует стабильному бесперебойному энергоснабжению, – это серьёзная проблема для возобновляемой энергетике, которую можно разрешить за счёт системы накопления энергии или вспомогательного генерирующего оборудования. Анализ всех доступных способов накопления энергии показывает, что наиболее надёжным и эффективным в данном случае является водородная система аккумуляции энергии.

Эффективность водорода. Среди горючих веществ водород обеспечивает наибольшую гравиметрическую плотность энергии, которая достигает 39 кВт·ч/кг [30]. Водород также имеет значительно более высокую плотность энергии (142 МДж/кг) [31] по сравнению с такими накопителями энергии, как литий-ионные аккумуляторы (до 0,9 МДж/кг) [32], суперконденсаторы (до 0,16 МДж/кг) [33] и супермаховики (до 10 МДж/кг) [34]. В частности,

по этим причинам Департамент энергетики США уделяет особое внимание разработке технологий хранения водорода для стационарной и мобильной энергетики, а также для транспорта [35].

Доступность водорода. Существует несколько методов получения водорода, которые имеют и достоинства, и недостатки: из природного газа, нефти и угля (наносит вред окружающей среде); радиолиз и термолиз (очень дороги и неэффективны); силиколевый способ, основанный на применении ферросилиция (на выходе Н₂ ненадлежащей чистоты); фото-биологическое и фотокаталитическое расщепление воды (специальные условия и длительность процесса); из биомассы (специальные условия и длительность процесса).

На основании анализа, проведенного авторами данной статьи, наилучшим способом получения водорода для проекта автономного ветро-водородного энергокомплекса бесперебойного энергоснабжения в качестве основного и единственного метода получения водорода в данном проекте был выбран электролиз воды.



Во-первых, вода локально доступна практически везде; во-вторых, при нормальных температуре и давлении окружающей среды электролиз требует минимального напряжения 1,481 В при ΔH^0 286 кДж/моль и минимальной энергии 39,7 кВт·ч/кг водорода, при этом равновесный потенциал составляет 1,23 В, если ΔG^0 равно 237 кДж/моль [36]; в-третьих, современные электролизеры потребляют около 45 кВт·ч/кг водорода с КПД более 80 % [37].

Хранение водорода. Основная сложность хранения газообразного водорода связана с тем, что H_2 занимает довольно большой объем: для 1 кг водорода при нормальной температуре окружающей среды и атмосферном давлении требуется 11 м³. Однако это позволяет накопить 40 кВт·ч энергии, что примерно соответствует среднему потреблению одним человеком в месяц. Кроме того, плотность водорода при -53 °С, +27 °С и +60 °С составляет 0,11 кг/м³, 0,08 кг/м³ и 0,07 кг/м³ соответственно [38], что позволяет экономить около 10 % объема при его использовании в холодном климате (перспективно для северных регионов, а также Арктики и Антарктики). Водород также может храниться в молекулярном состоянии в полностью реверсивных гидридах металлов или сложных гидридах под давлением [39] с плотностью до 150 кг/м³ по сравнению с нормальной плотностью (0,08987 кг/м³), физическими адсорбцией (35 ÷ 45 кг/м³), гидратами углерода (50 ÷ 70 кг/м³), жидким водородом (50 ÷ 80 кг/м³) и жидкими углеводородами (100 ÷ 110 кг/м³).

При разработке энергетической установки с водородным накопителем энергии на основе электролиза было рассмотрено несколько технологий хранения водорода: в сжатом, жидком состоянии или в виде химических соединений (гидриды металлов и неметаллов, углеводы, жидкие органические водородоносители и др.). Решающим аргументом стал тот факт, что сжатие водорода является наиболее известным и надежным методом, доступным в любое время, в любом месте и без дополнительных материалов. Помимо этого, на сжатие водорода затрачивается всего 2,1 % всей энергии, хранящейся в сжатом топливе [40], что позволяет при минимальных затратах существенно снизить стоимость оборудования для хранения водорода. В исследовании объем резервуара был принят из расчета умеренного энергопотребления одним человеком в течение одного месяца.

Сегодня использование водорода имеет еще одно важное и перспективное направление – возможные путешествия на другие планеты. Следует учитывать,

что космонавтам потребуются источники энергии для удовлетворения своих потребностей, а ввиду того что все виды электрохимических аккумуляторных батарей и супермаховиков имеют большую массу и слишком тяжелы для транспортирования на большие расстояния, использование водорода в данном случае является наиболее предпочтительным.

Ветро-водородный энергокомплекс. Ветро-водородный энергокомплекс (ВВЭК) получает энергию от одной или нескольких ВЭУ (в зависимости от требований к генерируемой мощности), в которых давление ветрового потока преобразуется в крутящий момент ротора турбины и, далее, в напряжение генератора, переменное по фазе, амплитуде и частоте. Затем напряжение генератора преобразуется в стабилизированное напряжение постоянного тока с помощью AC/DC преобразователя. Если напряжение, поступающее от другой ветротурбины, отличается от выбранного напряжения бортовой сети, то оно должно быть отрегулировано соответствующим образом. Бортовая DC сеть используется в дальнейшем для подключения потребителей постоянного тока.

3.2. Описание работы энергокомплекса

При наличии ветра вертикально-осевая ветроэнергетическая установка ВЭУ-3(6) (ветроэлектрический агрегат мощностью 3 кВт с 6 лопастями) генерирует электроэнергию. Если количество получаемой энергии превышает уровень потребления нагрузки (в нашем случае примерно 0,5 ÷ 2 кВт – базовый передатчик или передающая станция (БПС) [41]), избыток энергии используется для генерации водорода и/или зарядки дополнительной батареи [42]. В случае, когда ветер отсутствует или потребляемая БПС мощность превышает вырабатываемую ветроагрегатом, система управления включает водородное оборудование, которое генерирует энергию [43]. При этом система является модульной и допускает гибкое масштабирование за счёт увеличения мощности (энергоемкости) всей системы или только компонентов водородного цикла. Все компоненты энергокомплекса были разработаны авторами данной статьи совместно с представителями корпорации Эмпайр Магнетикс (США) и компанией H2Нитидор (Италия) и являются экспериментальными изделиями. На рис. 4 показан генерирующий компонент описанной ветро-водородной генерирующей установки, расположенной на мысе «Канин нос», Арктика (широта: 68°39'20"N; долгота: 43°16'15"E) между Баренцевым и Белым морями.





Рис. 4 – Вертикально-осевая ветроэнергетическая установка ВЭУ-3(6) в Арктике, мыс Канин нос: несколько ярусов на одной мачте увеличивают единичную мощность (вверху слева)
Fig. 4 – WPU-3(6) Vertical Axis Wind Turbine in Arctic, Kanin Nos Cape: several tiers on the same mast increase the unit power (upper left)

Режимы работы контролируются системой мониторинга и управления (СМУ) и зависят от климатических условий [44]:

1. Генерация водорода начинается в модуле электролиза (МЭ) тогда, когда объем хранимого водорода составляет менее 70 % от номинальной емкости хранилища (1 Nm^3) и/или мощность, генерируемая ВЭУ, превышает потребляемую мощность ($0,5 \div 2 \text{ кВт}$).

2. Процесс генерации электроэнергии из водорода в модуле топливных ячеек (МТЯ) запускается тогда, когда генерируемой ВЭУ мощности недостаточно для потребителя.

Напряжение в бортовой сети постоянного тока (48 В) используется для питания СМУ, МЭ, водородного (ВдрН) и водяного насосов (ВН) для перекачки водорода в модуль компрессии (МК).

Учитывая тот факт, что приоритетом энергокомплекса является бесперебойное функционирование БПС, система электроснабжения оборудована дизельным генератором (ДГ) с функцией автоматического запуска и автоматической остановки с дальнейшим возвратом в нормальный режим работы. Таким образом обеспечивается как автоматическое резервирование, так и ввод автоматического резерва на тот крайний случай, если описанная экспериментальная система окажется неработоспособной.

Ветрогенератор. Для преобразования энергии ветра в электроэнергию применяется инновационная вертикально-осевая ветроэнергетическая установка, основными преимуществами которой являются: отсутствие зависимости мощности вырабатываемой электроэнергии от направления ветра; несколько ярусов лопастей на одной мачте, что увеличивает мощность и снижает затраты (см. рис. 4); самостоятельный запуск на низкой (от 1,5 м/с) скорости ветра; низкая частота вращения, что увеличивает ресурс; без ограничения по частоте вращения (без верхнего уровня ограничения скорости ветра) благодаря управлению аэродинамическими свойствами турбины [45]. Высокая эффективность ветровой турбины определяется коэффициентом использования энергии ветра C_p , который в данном случае превышает 0,47. Значение этого коэффициента у лучших мировых аналогов ниже 0,47. Конструкция ветрогенератора защищена несколькими патентами [45–47], принадлежащими, в том числе, некоторым из авторов настоящей статьи.

Ветроэнергетическая установка оснащена уникальной аварийной электромеханической тормозной системой [48], которая предотвращает аварийные ситуации при скорости ветра до 60 м/с.

3.3. Оборудование водородной подсистемы

Оборудование водородной подсистемы разработано для удобства, надежности и безопасности эксплуатации в соответствии с европейскими требованиями ИСО/ТК 197 [49], Директивы PED 97/23/ЕС [50] в отношении сосудов под давлением и Директи-

вы АТЕХ 94/9/ЕС [50], которые касаются электрических и управляющих установок, работающих во взрывоопасных средах. Данные требования были разработаны с учетом пожеланий зарубежных партнеров по проекту. Водородный модуль приведен на рис. 5.



Рис. 5 – Оборудование водородного модуля: а – система мониторинга и управления СМУ с программируемым логическим контроллером ПЛК; б – модуль компрессии МК и модуль электролизера МЭ

Fig. 5 – Equipment of hydrogen generation and storage: a – monitoring and supervising control MSC with programming logic controller PLC; b – compression module CM and electrolyser module EM

Все компоненты термостатически изолированы от окружающей среды. Модуль электролизера, стек (батарея) электролизных ячеек, блок-сборка топливных элементов, резервуар для воды и компоненты системы управления расположены в одном металлическом шкафу с герметичным корпусом, термостатированным материалом Пеноплэкс. Внутренняя температура 21 °С поддерживается теплообменниками. Для холодного климата тепло от электролизера, стека ячеек и топливных элементов, в зависимости от сигналов расположенных в шкафу тепловых датчиков, передается либо в окружающую среду, либо внутрь термостатируемого шкафа с помощью 2 воздушных насосов, которые потребляют мощность до 100 Вт, не учитываемую при расчетах потоков мощности. Система управления направляет воздушные потоки в необходимом направлении двунаправленного клапана. В жарком климате вместо теплого воздуха используется охлажденный теплоноситель (устанавливается кондиционер). Эти изменения не являются радикальными, поскольку общая концепция теплообмена одинакова. Однако, если потребляемая кондиционером мощность будет сравнима с мощностью нагрузки, баланс мощности должен быть пересчитан. Всё же, благодаря принципу модульности, кондиционер можно легко добавить к существующей структуре электростанции.

3.4. Электролизер

Электролизер производит водород и кислород под давлением без дополнительного механического сжатия, поэтому работает на максимуме энергоэффективности. Процесс электролиза максимально автоматизирован, акцент при проектировании сделан на безотказной работе с питанием от автономной ветроэнергостанции. Электролизер содержит оборудование, трубопроводы и приборы, необходимые для проведения процесса электролиза воды (см. рис. 3). Система контроля и управления (СМУ) основана на программируемом логическом контроллере (ПЛК).

Основным функциональным элементом модуля электролизера (МЭ) является батарея электролизных ячеек (БЭЯ), которая состоит из последовательно соединенных ячеек, работающих под высоким давлением. Водород и кислород генерируются внутри ячеек с помощью постоянного тока (DC) за счёт расщепления очищенной воды в соответствии с химической реакцией $H_2O = H_2 + 1/2O_2$.

Полученный в результате электролиза продукт, насыщенный водой, находится в газообразном состоянии при температуре 80 °С и давлении 20 бар. Сухой газ имеет около 0,2 % объемного содержания O_2 , который должен быть удален, например, в каталитическом реакторе, где «лишние» молекулы O_2 реагируют с H_2 , преобразуясь в воду. Несмотря на то что катализатор не нуждается в регенерации, необходимо предотвращать образование конденсата на его поверхности. Установленный перед реактором



предпусковой подогреватель необходим для того, чтобы нагреть газ до температуры примерно на 50 °С выше температуры насыщения. При этом, в целях учета потерь тепла, весь процесс считается изотермическим. На выходе каталитического реактора установлен охладитель, который должен снизить температуру до 40 °С для частичной конденсации воды, автоматически отделяемой потоком газа. Окончательное удаление влаги осуществляется посредством осушителя, где водяной пар поглощается частицами специального материала. Дополнительная очистка газа в дальнейшем будет проводиться аналогично [51, 52], что позволит сократить период между сервисными работами. Ввиду того что процесс производства газа непрерывен, задействовано сразу 2 осушителя: в одном происходит осушение газа, а в другом – цикл регенерации для удаления влаги. Регенерация осуществляется при давлении, близком к атмосферному, путем десорбции с поверхности частиц с потоком сухого H₂ при температуре 180 °С, которую обеспечивает газовый обогреватель. Расчетное потребление H₂ для регенерации составляет около 10 % от производства H₂. Длительность цикла регенерации зависит от расхода регенерационного газа. Расход газа можно уменьшить, если увеличить продолжительность цикла. В случае переменной производительности в процессе получения H₂, необходимо использовать измеритель расхода и программное обеспечение, которое будет управлять циклом регенерации в зависимости от количества газа, прошедшего через осушитель.

ПЛК управляет процессами внутри МЭ без участия оператора, кроме процессов включения и отключения, сообщая оператору о любом источнике сигнала тревоги. Программное обеспечение контролирует параметры процесса (температура, давление, уровень жидкости и параметры электропитания) для поддержания безопасной и эффективной работы энергетической системы. В случае возникновения аварийных режимов технологические газы автоматически удаляются путем впрыска инертного газа. ПЛК позволяет осуществлять мониторинг и управление с помощью удаленного компьютера благодаря специальному программному обеспечению, которое делает процесс управления доступным из любого места, даже с мобильного телефона. Для надежного удаленного управления СМУ, ПЛК оборудован также модулем спутниковой связи.

Скорость производства водорода прямо пропорциональна значению постоянного тока, протекающего в ячейках БЭЯ, которое может быть установлено вручную в диапазоне от 15 % до 100 % номинальной мощности электролизера. Напряжение на БЭЯ напрямую коррелирует с эффективностью ячеек и является одним из параметров, отображаемых на панели оператора, вместе со значением постоянного тока.

Степень очистки водорода и кислорода постоянно контролируется газоанализаторами. Сигналы тревоги

подаются, когда состав газа (процент кислорода в водороде и, соответственно, процент водорода в кислороде) достигает нижнего предела опасности взрыва смеси.

Объем водорода в два раза превышает объем кислорода. Для разделения воды требуется энергия около 3,55 кВт·ч / Нм³ в нормальных условиях, 760 мм рт. ст. и 0 °С (см. табл.). Эффективность БЭЯ рассчитывается путем сравнения теоретической и фактической мощности потребления постоянного тока. Разница в потреблении может составить до 85 %. Такое высокое значение достигается за счёт повышения проводимости разлагаемой воды добавлением гидроксида калия (КОН). В результате образуется электролитический раствор. Водород и кислород образуются на выходе из БЭЯ, расходуя при этом некоторое количество электролита до попадания газов в разделительные сосуды, где газовая фаза отделяется от жидкой фазы, которая возвращается обратно в БЭЯ. Полученные газы проходят через оконечные фильтры и перекрестные оконечные сепараторы перед выходом из электролизера. Водород проходит через регулятор обратного давления, а кислород выпускается в атмосферу (при необходимости может быть использован). Предполагается, что требования к чистоте газового потока для металлгидридных резервуаров более высоки, чем для щелочного топливного элемента. Извлеченная тепловая энергия используется в холодном климате для подогрева помещения или шкафов с оборудованием, или отводится в окружающую среду, когда оборудование перегревается в соответствии с информацией от датчиков и соответствующих команд СМУ. Перенос тепла осуществляется замкнутым контуром теплоносителя с воздушным радиатором.

Возможность утечки электролита и газов в системе предельно ограничена. Так, никакая ручная операция не может привести к контакту оператора с электролитом. Вся система заключена в термостатируемый контейнер, который разделен на две отдельные камеры: в первой камере находится основное оборудование, во второй – источник питания. Камеры разделяет двойная стенка, через которую проходят кабели с двойной бронировкой. Кроме того, камеры снабжены принудительной вентиляцией для удаления возможных следов водорода. Управление вентиляцией осуществляется с помощью анемометрического переключателя и датчика водорода (см. табл.) – типичных компонентов [53]. В настоящее время для этих целей тестируются перспективные датчики [54, 55]. Следует отметить, что компоненты



электрической станции выбраны в точном соответствии с техническими правилами.

Для повышения автономности установки, запас деминерализованной воды с электрической проводимостью не более 5 мкС/см на 25 °С автоматически пополняется из отдельного резервуара в цистерне с водой (НВ). Водяной насос (ВН) автоматически перекачивает воду в электролизер в соответствии с потребностью процесса электролиза. Деминерализованная вода в цистерну WT добавляется вручную, однако, при наличии естественного источника воды, процесс может быть автоматизирован с добавлением в структуру дополнительного резервуара для подготовки воды, по аналогии с [56]. Это увеличит не только энергопотребление, но и автономность эксплуатации.

МЭ оснащен модулем компрессии (МК), который с помощью насоса (ВдрН) готовит водород для хранения в отдельно вынесенном накопителе объемом 1 Нм³. МК отрегулирован для давления до 30 бар, которое гораздо ниже уровня давления в системах хранения водорода на транспорте. Однако, поскольку электростанция является экспериментальной, указанного давления достаточно для испытаний. В дальнейшем давление в накопителе водорода может быть увеличено до 350 бар и далее до 700 бар на основе углеродосодержащих технологий IV типа [56], в том числе, криогенных технологий, подобных [57–59].

Система может быть оборудована одно- или трехфазным инвертором, который способен обеспечить энергией локальных потребителей переменного тока (в основном электродвигатели). Это расширяет выбор оборудования, доступного для использования в описываемом энергокомплексе.

Модуль топливных элементов. Сравнивая методы преобразования энергии, основанные на сжигании водорода с топливными элементами с протонообменными мембранами, следует отметить, что последние считаются лучшим решением для системы бесперебойного энергообеспечения [60].

Модуль топливных ячеек (МТЯ) состоит из элементов, содержащих по 40 топливных ячеек со встроенным микропроцессором, который управляет клапанами и насосами. Подача водорода контролируется СМУ/ПЛК. Электрическая эффективность (КПД) топливных элементов находится в границах 55 ÷ 65 %. Однако, с учетом вырабатываемой и используемой тепловой энергии, а также потерь на вентиляцию, значение КПД достигает 90 %. При этом следует иметь в виду, что вырабатываемая теп-

ловая энергия особенно важна в условиях холодного климата.

Модуль аккумуляирования водорода. Оборудование энергокомплекса включает систему аккумуляирования водорода в виде газа, содержащегося под давлением 30 бар. Сварной сосуд, в котором содержится водород, имеет двухслойную стенку, внутренняя часть которой выполнена из аустенитной нержавеющей стали, препятствующей глубокому диффузному водороду, а наружная представляет собой емкость из высокопрочной стали [61]. Сосуд рассчитан на давление до 50 бар, емкость составляет 1 Нм³. Однако вместимость сосуда, как и остальные элементы энергокомплекса, может быть увеличена за счет добавления параллельных сосудов или замены на один более крупный. Слабым местом этого технического решения является недостаточная герметичность поршневых газгольдеров, поэтому отсек с аккумулятором водорода отделен от остального оборудования и оснащен дополнительными датчиками газа. Кроме того, с учетом требований об ограничении утечек (по аналогии с хранением природного газа не более 1,1 % в единицу времени с единицы объема), утечки являются относительно небольшими. Главное преимущество такого подхода заключается в минимальной стоимости и простоте оборудования, которые обеспечиваются кратковременной работой аккумулятора газа (каждые 12 ÷ 24 часа). Следует отметить, что в случае необходимости в дополнительной выработке газа или его дальнейшем преобразовании (сжижение, преобразование в аммиак, метанол, этанол и др.), например, с целью транспортировки, дополнительное оборудование также сравнительно легко подключается к имеющейся системе (с подбором соответствующих компонентов – насосов, емкостей, фиттингов и т.д.), однако при этом значительно возрастает стоимость энергокомплекса в целом.

3.5. Система управления

Система управления ВВЭК (СМУ/ПЛК) основана на 32-разрядном микроконтроллере (ядро ARM Cortex-M4F, тактовая частота 180 МГц). СМУ/ПЛК контролирует все процессы в комплексе. В обычном режиме работы ветровая турбина генерирует мощность в диапазоне 0 ÷ 3 кВт, обеспечивая 48 В на шине постоянного тока. БПС потребляет мощность в диапазоне от 0,5 кВт (80 % времени) до 2 кВт (20 % времени).

Временные диаграммы работы ВВЭК показаны на рис. 6.



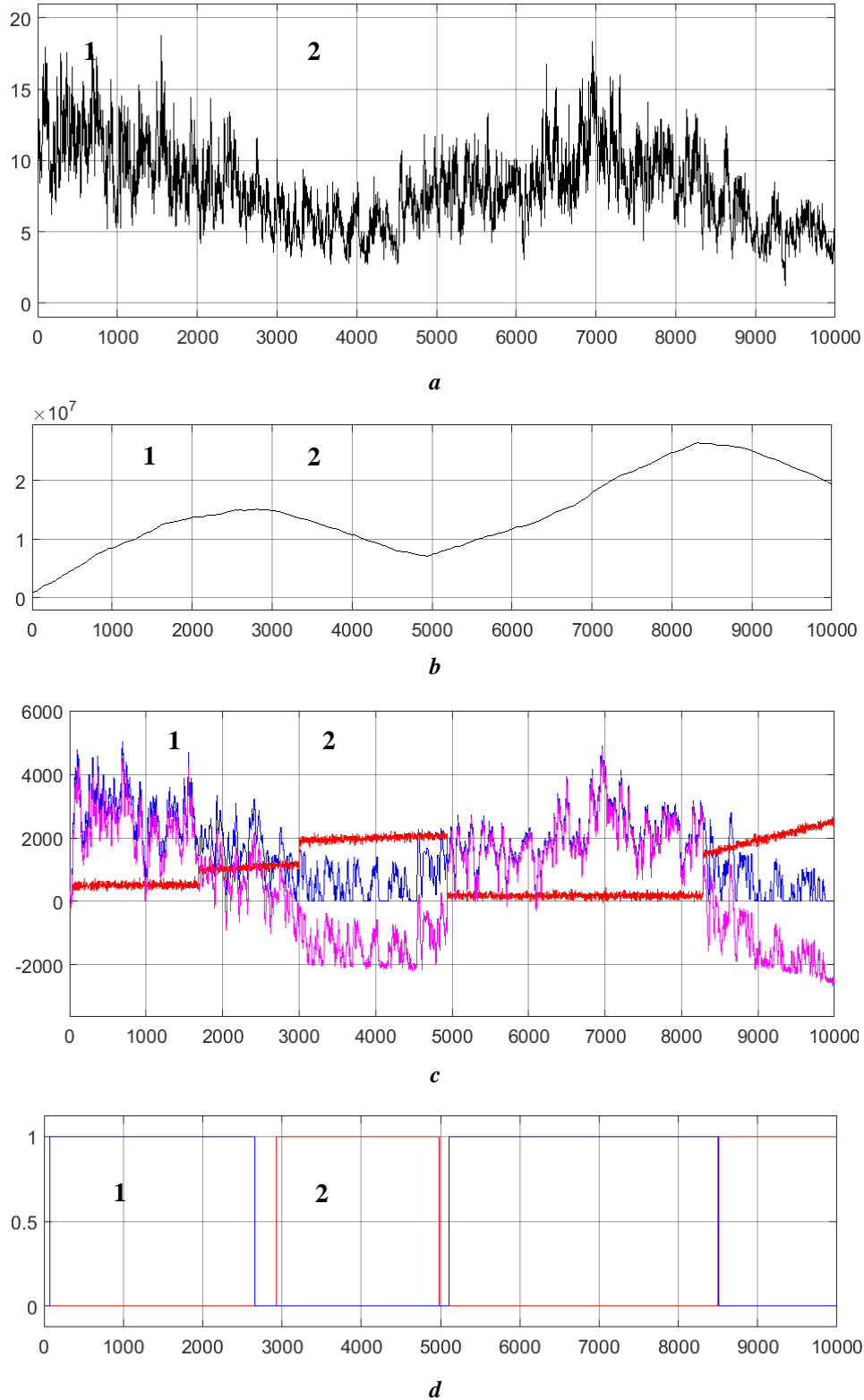


Рис. 6 – Пример работы ВВЭК:

1 – работа при избытке генерируемой мощности; 2 – работа при недостатке генерируемой мощности
(с: синий – генерируемая мощность, красный – потребляемая мощность, розовый – разница между генерируемой и потребляемой мощностями; d: красный – активность электролизера, синий – активность топливных элементов)

Fig. 6 – Sample of WHPP operation:

1 – excessive generated power; 2 – insufficient generated power
(c: blue – generated power, red – consumed power, pink – balance between generated and consumed power;
d: red – electrolyzer activity; blue – fuel cell activity)



При наличии достаточного количества энергии для функционирования БПС, при том что избыточная мощность от ВЭУ превышает 1 кВт (0,5 кВт для электролизера + 0,1 кВт для ВН + 0,4 кВт для насоса ВдрН), СМУ проверяет уровень заполнения емкости накопления для водорода и, при наличии свободного объема в емкости, ПЛК переключается на МЭ, а СМУ управляет функционированием ВН и ВдрН, производя перекачку водорода в МК до достижения 30 бар (участок 1 на рис. 6 а-d). При этом мощность, необходимая для работы электролизера, составляет $0,5 \div 2,2$ кВт и зависит от потока воды и силы тока. Дополнительная аккумуляторная батарея используется для демпфирования пиков потребления энергии электродвигателями насосов.

Когда вырабатываемой ветрогенератором мощности недостаточно для работы БПС, СМУ проверяет, есть ли газ в НВ, и при его наличии ПЛК включает МТЯ, а СМУ контролирует работу обратного насоса СМ (участок 2 на рис. 6 а-d). Водород из НВ перекачивается через сборку топливных элементов (МТЯ). Генерируемая мощность составляет до 1 кВт и зависит от установленного расхода газа.

В случае когда генерируемой мощности недостаточно, и водородный накопитель пуст, ПЛК посылает команду контроллеру БПС о переходе в режим ограниченного функционирования и принудительно уменьшения уровня потребления [62].

Для обеспечения максимально стабильного энергоснабжения БПС контроль потоков электрической энергии и водорода в ВВЭК осуществляется на трех различных уровнях управления, а также на уровне надлежащего взаимодействия между этими уровнями. На 1-ом уровне системы управление МЭ и МТЯ обеспечивается алгоритмом управления, который может первоначально идентифицировать текущие или спрогнозировать будущие проблемы в этом сегменте. Система слежения за питанием реализована на 2-ом уровне управления и контролирует потоки энергии и газа. Этот уровень реализуется посредством алгоритма, который основан на методах нечеткой логики с помощью искусственных нейронных сетей. Контроллер автоматически настраивает параметры регулирования для того, чтобы электростанцию можно было легко установить силами специалистов-электриков, не обладающих специальными знаниями в области систем управления. Изменения параметров системы непрерывно отслеживаются контроллером. 3-й уровень осуществляет дистанционное управление СМУ/ПЛК, которое координирует работу нескольких ЭМС, МТЯ или даже ВВЭК.

Выход постоянного тока может быть подключен к входу инвертора для питания потребителей переменного тока.

3.6. Масштабирование мощности

Исследуемый ветро-водородный энергетический комплекс (ВВЭК) на базе малой ветротурбины и водородной генерации предназначен в первую очередь

для распределенных локальных потребителей энергии. Однако, если территориально распределенные локальные потребители будут иметь между собой электрическое соединение, они могут быть объединены в масштабируемую электросеть, которая может быть оборудована единым для всей сети хранилищем водорода для обеспечения бесперебойного электроснабжения больших территорий с холодным климатом. Кроме того, поскольку ветер в регионах с подобными климатическими условиями достаточно сильный, и объемы производства водорода гарантированы, избыток водорода может быть транспортирован для энергоснабжения других территорий, не имеющих электросети.

3.7. Экономический анализ

Энергокомплекс оптимизирован технически и экономически. Общая стоимость ветро-водородной электростанции может быть определена как сумма стоимости отдельного оборудования:

- ветроэнергетическая установка ВЭУ-3 (6), 3 кВт, полный комплект = \$14 500;
- электролизер $0,4 \text{ м}^3 / \text{ч}$, полный комплект = \$18 200;
- топливный элемент 1 кВт, полный комплект = \$14 300;

Дополнительное оборудование, которое будет использоваться для бесперебойного питания, управляемого удаленно через сеть Интернет:

- модуль очистки до чистоты 99,99% – \$8 600;
- газоанализаторы – \$5 400;
- бак для хранения водорода – \$8 500;
- дистанционное управление с системой мониторинга – \$2 000;
- дополнительная батарея $750 \text{ А} \cdot \text{ч} / 48 \text{ VDC}$ – \$4 900.

Стоимость доставки не учитывалась, поскольку перевозка была осуществлена потенциальным заказчиком – Научно-исследовательским институтом космического приборостроения, филиалом Объединенной ракетно-космической корпорации. Данный институт также является и потребителем электроэнергии, необходимой для питания новых арктических приемо-передающих станций, которые используются для снижения навигационной ошибки GPS. При этом пиковая потребляемая мощность составляет 2 кВт, среднее энергопотребление – около 0,7 кВт·ч.

Приблизительная оценка периода окупаемости может быть выполнена на основе общей стоимости электростанции, которая составляет около \$100 000. Предполагается, что электростанция будет работать в среднем 20 ч около 300 дней в год в течение 20 лет, генерируя мощность $1,8 \div 2,5$ кВт, при незначительном обслуживании. Общая выработка за это время составит 240 000 кВт·ч. Стоимость энергии, произведенной с помощью дизельного топлива в отдаленных районах, составляет $\$0,80 \div 1,20 / \text{кВт} \cdot \text{ч}$. Общая стоимость электроэнергии составит около \$200 000 (98 % этой суммы – стоимость топлива, которое будет



транспортироваться в основном по воздуху). Причём срок окупаемости составляет около $7 \div 10$ лет [63].

Необходимо отметить, что затраты на обслуживание и ремонт могут быть значительно сокращены [64, 65]. При этом очевидно, что имеется запас по увеличению емкости водорода для данных генерирующих мощностей, а также расширению возможностей климатического применения посредством бортового кондиционера, работающего и на охлаждение газа. При масштабировании экономический расчет является многовариантной задачей и может быть проведен только в случае четкого представления о составе оборудования. Тем не менее линейная аппроксимация стоимости оборудования при масштабировании дает аналогичный приведенному расчету результат, в связи с чем можно утверждать, что линейное масштабирование не снижает рентабельности гибридного ветро-водородного энергокомплекса, однако любые изменения в структуре или масштабировании отдельных компонентов для удовлетворения специфических требований могут изменить картину рентабельности, причем как в лучшую, так и худшую сторону.

Общий КПД для полного цикла водорода составляет около 50 % (произведение КПД электролизера 85 % и КПД топливных элементов 65 %) без учёта повышения давления водорода до 30 бар, потери энергии на питание контроллера, зарядку аккумулятора и электроснабжение другого электронного оборудования.

4. Заключение

Изменение климата вносит коррективы в проектирование и разработку оборудования для генерации и электроснабжения: оно должно быть экологически чистым, гарантирующим безопасность жизнедеятельности, непрерывно эксплуатируемым, долговечным и максимально надежным. Всесторонний анализ оборудования, представленного на рынке, показывает, что одним из перспективных направлений является сочетание энергии ветра в качестве источника энергии и водородной системы в виде бесперебойного энергообеспечения. Такая система могла бы масштабироваться от 1 кВт до 50 кВт и использоваться в любых распределенных сетях постоянного и/или переменного тока, на которые приходится до 40 % всех потребителей электрической энергии. Кроме того, такое оборудование является идеальным источником питания для отдаленных домохозяйств и предприятий, расположенных в суровых климатических условиях полюсов, пустынь и островов. Оборудование является универсальным как с точки зрения использования, так и масштабирования как покомпонентно, так и в целом. Распределенные локальные генерирующие установки в будущем могут быть объединены в более крупные объекты со строительством общих резервуаров для хранения водорода, что позволит обеспечить бесперебойное электроснабжение больших территорий.

За счет оптимизации выработки генерируемого водорода, в зависимости от потребляемой энергии, капитальные затраты электролизера могут быть снижены до 85 % текущей цены, что будет выгодным как для персональных потребителей, так и для промышленности (в соответствии с «Исследовательскими целями по преодолению глобальных проблем» [66]). При этом внедрение системы сжатия газа в электролизер позволяет сэкономить на отдельном компрессоре.

Критическое время работы оборудования в промежутке между сервисным обслуживанием доведено до 1 000 часов благодаря оптимизации переключений пусков-остановов – до 1 000 переключений в год. Обслуживание может проводиться локально инструктированными техниками.

Благодарности

Проект финансировался Министерством энергетики США через Национальную лабораторию Лоуренс Беркли и Международный научно-технический центр в рамках Гранта № 2568p (контракт № LBNL-T2-0203-RU / RUE-2-010620-ч-06) и был поддержан актом 211 Правительства РФ (договор № 02.A03.21.0011). Любые предположения, выводы или рекомендации, изложенные в настоящем материале, принадлежат авторам и не обязательно отражают мнение финансирующих организаций.

Acknowledgements

This project was funded by US Department of Energy via Lawrence Berkeley National Laboratory and International Science and Technology Center, under grant #2568p (contract #LBNL-T2-0203-RU/RUE-2-010620-CH-06), and was supported by Act 211 Government of RF, contract № 02.A03.21.0011. Any options, findings, and conclusions or recommendations expressed in this material are those of the author(s) and do not necessarily reflect the views of the funding organizations.

Список литературы

- [1] Гольцов, В.А. В шаге от водородной цивилизации / В.А. Гольцов, Т.Н. Везироглу // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAE). – 2017. – № 22–24. – С. 33–39.
- [2] Ackermann, T. Distributed generation: a definition / T. Ackermann, G. Andersson, L. Södera // Electric Power Systems Research. – 2001. – Vol. 57. – P. 195–204.
- [3] Underground vs. Overhead: Power Line Installation – Cost Comparison and Mitigation, Electric Light and Power [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.elp.com/articles/powergrid_international/print/volume-18/issue-2/features/underground-vs-overhead-power-line-installation-cost-comparison.html – (Дата обращения: 20.01.2018).
- [4] Chade, D. Feasibility study of wind-to-hydrogen system for Arctic remote locations – Grimsey island case study / D. Chade, T. Miklis, D. Dvorak // Renewable Energy. – 2015. – Vol. 76. – P. 204–211.
- [5] Svalbard's electric power could come from hydrogen. SINTEF. ScienceDaily, 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:



<https://www.sciencedaily.com/releases/2017/02/170207104356.htm> – (Дата обращения: 04.01.2018).

[6] Underground Electric Transmission Lines. Public Service Commission of Wisconsin Electric 11 (05/11), 2011 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://psc.wi.gov/Documents/Under%20Ground%20Transmission.pdf>. – (Дата обращения: 20.01.2018).

[7] How much energy is consumed in US residential and commercial buildings? US Energy Information Administration. May 10, 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=86&t=1> – (Дата обращения: 20.01.2018).

[8] Wind Energy Reduces Greenhouse Gas Emissions. American Wind Energy Association [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.awea.org/reducing-greenhouse-gas-emissions> – (Дата обращения: 03.08.2017).

[9] Information. Statistics. World Wind Energy Association 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.wwindea.org/11961-2/>. – (Дата обращения: 01.08.2017).

[10] Small wind world market: back on track again. World Wind Energy Association 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<http://www.wwindea.org/small-wind-world-market-back-on-track-again/> – (Дата обращения: 01.08.2017).

[11] 2016 Wind Technologies Market Report, American Wind Energy Association, 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

https://emp.lbl.gov/sites/default/files/2016_wind_technologies_market_report_final_optimized.pdf – (Дата обращения: 01.08.2017).

[12] Bruckner, T. Report of IPCC Working Group III – Mitigation of Climate Change, Annex III: Technology – specific Cost and Performance Parameters 2014 [Электронный ресурс] / T. Bruckner [et al.]. – Режим доступа: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf – (Дата обращения: 08.01.2018).

[13] EIA.gov. How much carbon dioxide is produced from burning gasoline and diesel fuel. US Energy Information Administration, updated 19.05.17 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=307&t=11> – (Дата обращения: 08.01.2018).

[14] Consumption of energy. Eurostat Statistics Explained. European Commission. Modification of 09.11.2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption_of_energy – (Дата обращения: 08.02.2017).

[15] Reports 1-4 of SRC-Vertical, Project RUE-2-010620-CH-06 “All-Climate Testing of Vertical Axis Wind Turbines”, for Lawrence Berkeley National, DOE, USA / E. Solomin. – 2006–2009. – Режим доступа: по запросу автору или Glen Dahlbacka at LBNL.

[16] Vesborg, P.C.K. Europe’s real energy problem [Электронный ресурс] / P.C.K. Vesborg // Technolo-

gist. – 2015 – No. 5. – Режим доступа: <http://www.technologist.eu/europes-real-energy-problem/> – (Дата обращения: 03.08.2017).

[17] Dahlbacka, G. Vertical Axis Windpower Systems and Opportunities [Электронный ресурс] / G. Dahlbacka. – Berkeley Lab. – July 29, 2004. – Режим доступа: <http://www2.lbl.gov/today/2004/Jul/26-Mon/wind-jump.html>. – (Дата обращения: 27.02.2017).

[18] Reports 1-8 of SRC-Vertical on Project LBNL-T2-0203-RU “Development of Low-Maintenance Wind Power Systems” for Lawrence Berkeley National Laboratory and US Department of Energy [Электронный ресурс] / E. Solomin. – 2004–2006. – Режим доступа: <http://newscenter.lbl.gov/2004/10/04/from-russia-with-wind-power/> (Дата обращения: 22.02.2017).

[19] Ashwill, T.D. A Retrospective of VAWT technology [Электронный ресурс] / T.D. Ashwill, H.J. Sutherland, D.E. Berg // Report of Sandia National Laboratories #SAND2012-0304, TRN: US201205%90. – 2012. – Режим доступа:

<https://www.osti.gov/scitech/biblio/1035336-retrospective-vawt-technology> – (Дата обращения: 26.02.2017).

[20] Ruff, H. Why is there so much confusion about “Small Wind”? [Электронный ресурс] / H. Ruff // CleanTechnica. – 2014. – Режим доступа: <https://cleantechnica.com/2014/10/27/small-wind-turbine-myths/>. – (Дата обращения: 27.02.2017).

[21] Parker, H.S. The Hidden Human Tragedy Caused by Incessant Wind Turbine Noise [Электронный ресурс] / H.S. Parker // European Platform Against Windfarms. – Режим доступа:

<https://stopthesethings.com/author/stopthesethings/page/2/> – (Дата обращения: 01.05.2017).

[22] Solomin, E. Iterative Approach in Design and Development of Vertical Axis Wind Turbines / E. Solomin, I. Kirpichnikova, A. Martyanov // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 792: Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering. – No. 792. – P. 582–589.

[23] SWIP – New innovative solutions, components and tools for the integration of wind energy in urban and peri-urban areas. Spain, Great Britain. Program: FP7-ENERGY. European Commission. Modification of 17.07.2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://cordis.europa.eu/news/rcn/137715_en.html – (Дата обращения: 03.08.2017).

[24] Next-Generation Wind Technology. EU-funded projects [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://windeurope.org/policy/eu-funded-projects/> – (Дата обращения: 03.08.2017).

[25] WWEA released latest global small wind statistics. Jun.2, 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.wwindea.org/wwea-released-latest-global-small-wind-statistics/> – (Дата обращения: 20.01.2018).

[26] da Rosa, A.V. Fundamentals of Renewable Energy Processes / Aldo V. da Rosa. – 3rd Edition. – 2013. – P. 688.



[27] Borg, M. Offshore floating vertical axis wind turbines: advantages, disadvantages, and dynamics modeling state of the art [Электронный ресурс] / M. Borg, M. Collu, Brennan F.P. // The Royal Institution of Naval Architects. Marine & Offshore Renewable Energy. – 2012. – London, UK. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/235963001_Offshore_floating_vertical_axis_wind_turbines_Advantages_disadvantages_and_dynamics_modelling_state_of_the_art. – (Дата обращения: 24.01.2018).

[28] Albuquerque, I.M. A Characterization of Vertical Axis Wind Turbines / I.M. Albuquerque, F.F.d.S. Matos // IEEE Latin America Transaction. – 2016. – Vol. 14. – No. 10. – P. 4255–4260.

[29] Соломин, Е.В. Основы методологии разработки вертикально-осевых ветроэнергетических установок / Е.В. Соломин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAE). – 2011. – № 1. – С. 18–39.

[30] Züttel, A. Storage of Renewable Energy by Reduction of CO₂ with Hydrogen. Sion, a new Center for Chemistry and Chemical engineering in Valais / A. Züttel [et al.] // CHIMIA. – 2015. – Vol. 69. – No. 5. – P. 264–68.

[31] Energy Density of Hydrogen. An encyclopedia of scientific essays. The Physics Factbook. 2005.

[32] Hislop, M. Solid-state EV battery breakthrough from Li-ion battery inventor John Goodenough [Электронный ресурс] / M. Hislop // The American Energy News. Режим доступа: <http://theamericanenergynews.com/markham-on-energy/solid-state-battery-advance-goodenough> – (Дата обращения: 15.03.2017).

[33] Espinar, B. The role of energy storage for mini-grid stabilization / B. Espinar, D. Mayer. – Report IEA-PVPS T11-02:2011, IEA PVPS Task 11. – July 2011. – P. 28.

[34] Amiryar, M.E. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications / M.E. Amiryar, K.R. Pullen // Applied Science. – 2017. – Vol. 7. – P. 286.

[35] Hydrogen Storage. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of Energy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>. – (Дата обращения: 23.01.2018).

[36] LeRoy, R.L. The thermodynamics of aqueous water electrolysis. / R.L. LeRoy, C.T. Bowen, D.J. LeRoy // J. Electrochem. Soc. – 1980. – No. 127. – P. 1954–1962.

[37] Zeng, K. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications / K. Zeng, D. Zhang // Prog. Energy Combust. Sci. – 2010. – Vol. 36. – P. 307–326.

[38] Gupta, R. Properties of Hydrogen. Cryogenic Data Handbook. Brookhaven National Laboratory, US Department of Energy [Электронный ресурс] / R. Gupta. – Режим доступа:

<https://www.bnl.gov/magnets/staff/gupta/cryogenic-data-handbook/Section3.pdf>. – (Дата обращения: 23.02.2017).

[39] Dias, R. P. Observation of the Wigner-Huntington transition to metallic hydrogen / R.P. Dias, I.F. Silvera // Science. – 2017. – No. 355. – P. 715–718.

[40] Wind-to-Hydrogen Project. Hydrogen and Fuel Cells. National Renewable Energy Laboratory. DOE. USA [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.nrel.gov/hydrogen/wind-to-hydrogen.html>. – (Дата обращения 23.02.2017).

[41] Павлов, Н.А. Автономное энергоснабжение объектов крайнего севера / Н.А. Павлов [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAE). – 2015. – № 10–11. – С. 75–83.

[42] Solomin, E.V. Algorithms of LiFePO₄ batteries automatic charge / E.V. Solomin, D.V. Topolsky, I.G. Topolskaya // Procedia Engineering Journal. – 2015. – Vol. 129. – P. 213–218.

[43] Korobov, D.V. Wind Turbine Power Plant Control / D.V. Korobov [et al.] // Materials of X International IEEE Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” (Dynamics, IEEE), Omsk State Technical University. – Nov. 2016.

[44] Martyanov, A.S. Development of control algorithms in Matlab/Simulink / A.S. Martyanov, E.V. Solomin, D.V. Korobov // Procedia Engineering Journal. – 2015. – No. 129. – P. 922–26.

[45] Ротор ветряной установки с вертикальной осью вращения (варианты): пат. 2347104 РФ: МПК F03D 3/06 (2006.1) / Грахов Ю.В., Соломин Е.В. и др.; заявитель и патентообладатель ООО «ГРЦ-Вертикаль». – № 2006117014/06; заявл. 12.05.2006 опубл. 20.02.2009, Бюл. № 5. – 12 с.

[46] Ветроколесо ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения: пат. 2443902 РФ: МПК F03D3/06 (2006.01) / Грахов Ю.В., Соломин Е.В. и др.; заявитель и патентообладатель ООО «ГРЦ-Вертикаль». – № 2010121692/06; заявл. 27.05.2010 опубл. 27.02.2012, Бюл. № 6. – 5 с.

[47] Комбинированная ветро-солнечная энергетическая установка со светодиодным прожектором для социальных нужд: пат. 101105 РФ, МПК F03D 9/02 (2006.01) / Соломин Е.В.; заявитель и патентообладатель ООО «НИИ “Уралмет”». – № 2010137417/06; заявл. 08.09.2010 опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1. – 2 с.

[48] Sirotkin, E.A. Emergency Braking System for the Wind Turbine / E.A. Sirotkin [et al.] // Procedia Engineering Journal (ICIEAM). – 2016 (PROENG27157. PII: S1877–7058(15)03968–5).

[49] ISO/TR 15916:2015. Basic considerations for the safety of hydrogen systems. International Organization for Standardization [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/56546.html?browse=tc>. – (Дата обращения: 25.01.2018).

[50] Pressure Equipment Directive 97/23/CE. European Commission [Электронный ресурс]. – Режим



доступа: https://ec.europa.eu/growth/sectors/pressure-gas/pressure-equipment/directive_en. – (Дата обращения 25.01.2018).

[51] Gusev, A.L. Cleaning system for corrosive gases and hydrogen / A.L. Gusev // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2009. – Vol. 45. – No. 9–10. – P. 640.

[52] Gusev, A.L. Manufacture Nanocomposites Membranes for clearing Chlorine / A.L. Gusev, M.A. Kazaryan // *Work Meeting, Bayer MaterialScience AG, Leverkusen, Germany*, 12–15, August, 2007.

[53] Favier, F.L. Hydrogen sensors and switches from electrodeposited palladium mesowire arrays / F.L. Favier [et al.] // *Science*. – 2001. – No. 293(5538). – P. 2227–2231.

[54] Gusev, A.L. Hydrogen Sensor for Cryogenic Vacuum Objects / A.L. Gusev [et al.] // *Hydrogen Materials Science and Chemistry of Metal Hydrides*. – 01/2002. – P. 41–47. ISBN: 978-1-4020-0731-6.

[55] Gusev, A.L. Hydrogen Sensor for Cryogenic vacuum objects / A.L. Gusev [et al.] // *Abstracts book of NATO International Conference Katsiveli, Yalta, Ukraine September 02–08, 1999*. – P. 370.

[56] Eberle, U. Fuel cell electric vehicles and hydrogen infrastructure: status 2012 / U. Eberle, B. Mueller, R. von Helmolt // *Energy & Environmental Science*. – 2012. – Vol. 5. – No. 10. – P. 8790–8798.

[57] Gusev, A.L. Thermodynamic peculiarities of low-temperature regeneration of cryosorption devices in heat-insulation cavities of hydrogenous cryogenic tanks / A.L. Gusev // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2001. – Vol. 26. – No. 8. – P. 863–871.

[58] Gusev, A.L. Flaw detection of large cryogenic objects with regard for the effect of effusion induced hydrogen superinsulation instability // *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. – 2000. – No. 1. – P. 103–108.

[59] Gusev, A.L. Anomalies of the residual superinsulation pressure under emergency conditions of cryogenic objects / A.L. Gusev // *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. – 2000. – No. 1. – P. 55–75.

[60] Bratsch, S.G. Standard Electrode Potentials and Temperature Coefficients in Water at 298.15 K / S.G. Bratsch // *J. Phys. Chem. Ref. Data*. American Institute of Physics. – 1989. – No. 18 (1). – P. 1–21.

[61] ГОСТ 3022-80. Водород технический. Технические условия. – Введ. 1981-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 27 с.

[62] Kirpichnikova, I.M. Simulation of a generator for a wind-power unit / I.M. Kirpichnikova, A.S. Martyanov, E.V. Solomin // *Russian Electrical Engineering*. – 2013. – No. 84(10). – P. 46–49.

[63] Гольцов, В.А. От водородной экономики к водородной цивилизации / В.А. Гольцов, Т.Н. Везируглу // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE)*. – 2017. – № 22–24. – С. 25–32.

[64] Галеев, А.Г. Методика оптимизации параметров технического обслуживания и показателей

безотказности сложных технических систем, функционирующих на кислородно-водородном топливе / А.Г. Галеев [и др.] // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE)*. – 2017. – № 1–3. – С. 22–33.

[65] Наман, С.А. Пилотная промышленная установка по десорбции H₂S из воды черного моря / С.А. Наман, И.Э. Тур, Т.Н. Везируглу // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE)*. – 2017. – № 22–24. – С. 99–109.

[66] Research Focuses on Overcoming Challenges. Hydrogen Production: Electrolysis, Fuel Cell Technologies Office, US Department of Energy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis> – (Дата обращения: 25.01.2018).

[67] Varkarakı, E. Hydrogen based Uninterruptible Power Supply. 2nd Eu-ropean Hydrogen Energy Conference – EHES 2005, Nov. 22-25, Zaragoza [Электронный ресурс] / E. Varkarakı [et. al.]. – Режим доступа: http://www.cres.gr/kape/hmerida/files/ydrogen/Varkarakı_EHES_05%20HELPS.pdf – (Дата обращения: 24.01.2018).

References

[1] Goltsov V.A., Veziroglu T.N.. A step on the road to hydrogen civilization (V shage ot vodorodnoi tsivilizatsii). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2017;(22–24):33–39; doi:10.15518/isjaee.2017.22-24.033-039 (in Russ.) (previously: *International Journal of Hydrogen Energy*, 2002;27:719–723 in Eng.).

[2] Ackermann T., Andersson G., Södera L. Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*, 2001;57(3):195–204.

[3] Underground vs. Overhead: Power Line Installation – Cost Comparison and Mitigation, *Electric Light and Power*. Available on: http://www.elp.com/articles/powergrid_international/print/volume-18/issue-2/features/underground-vs-overhead-power-line-installation-cost-comparison.html [accessed 01.20.18].

[4] Chade D., Miklis T., Dvorak D. Feasibility study of wind-to-hydrogen system for Arctic re-mote locations – Grimsey island case study. *Renewable Energy*, 2015;76:204–211, ISSN 0960-1481. Available on: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114007381> [accessed 01.04.18].

[5] Svalbard's electric power could come from hydrogen. SINTEF. Science Daily. 2017. Available on: <https://www.sciencedaily.com/releases/2017/02/170207104356.htm> [accessed 01.04.18].

[6] Underground Electric Transmission Lines. Public Service Commission of Wisconsin Electric 11 (05/11), 2011. Available on: <https://psc.wi.gov/Documents/Under%20Ground%20Transmission.pdf> [accessed 01.20.2018].



[7] How much energy is consumed in US residential and commercial buildings? US Energy Information Administration. May 10, 2017. Available on: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=86&t=1> [accessed 01.20.2018].

[8] Wind Energy Reduces Greenhouse Gas Emissions. American Wind Energy Association. Available at: <http://www.awea.org/reducing-greenhouse-gas-emissions> [accessed 08.03.17].

[9] Information. Statistics. World Wind Energy Association 2016. Available on: <http://www.wwindea.org/11961-2/> [accessed 01.08.17].

[10] Small wind world market: back on track again. World Wind Energy Association 2017. Available on: <http://www.wwindea.org/small-wind-world-market-back-on-track-again/> [accessed 08.01.17].

[11] 2016 Wind Technologies Market Report, American Wind Energy Association, 2016. Available on: https://emp.lbl.gov/sites/default/files/2016_wind_technologies_market_report_final_optimized.pdf [accessed 08.01.17].

[12] Bruckner T. *et al.* Report of IPCC Working Group III – Mitigation of Climate Change, Annex III: Technology – specific Cost and Performance Parameters 2014. Available on: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf [accessed 01.08.18].

[13] EIA.gov. How much carbon dioxide is produced from burning gasoline and diesel fuel. US Energy Information Administration, updated 19.05.17. Available on: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=307&t=11> [accessed 01.08.18].

[14] Consumption of energy. Eurostat Statistics Explained. European Commission. Modification of 09.11.2016. Available on: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption_of_energy [accessed 02.08.17].

[15] Solomin E. Reports 1-4 of SRC-Vertical, Project RUE-2-010620-CH-06 “All-Climate Testing of Vertical Axis Wind Turbines”, for Lawrence Berkeley National, DOE, USA, 2006-2009. Available per request from author or Glen Dahlbacka at LBNL.

[16] Vesborg P.C.K. Europe’s real energy problem. *Technologist* 05, 2015. Available on: <http://www.technologist.eu/europes-real-energy-problem/> [accessed 08.03.17].

[17] Dahlbacka G. Vertical Axis Windpower Systems and Opportunities. July 29, 2004. Berkeley Lab. Available on: <http://www2.lbl.gov/today/2004/Jul/26-Mon/wind-jump.html> [accessed 02.27.17].

[18] Solomin E. Reports 1–8 of SRC-Vertical on Project LBNL-T2-0203-RU “Development of Low-Maintenance Wind Power Systems” for Lawrence Berkeley National Laboratory and US Department of Energy. 2004–2006. Available on: <http://newscenter.lbl.gov/2004/10/04/from-russia-with-wind-power/> [accessed: 02.22.2017].

[19] Ashwill T.D., Sutherland H.J., Berg D.E. A Retrospective of VAWT technology. Report of Sandia National Laboratories #SAND2012-0304, TRN: US201205% %90. 01.01.12. DOI: 10.2172/1035336. Available on:

<https://www.osti.gov/scitech/biblio/1035336-retrospective-vawt-technology> [accessed 02.26.17]

[20] Ruff H. Why Is There So Much Confusion About “Small Wind”? *CleanTechnica* 2014 October 27th. Available on:

<https://cleantechnica.com/2014/10/27/small-wind-turbine-myths/> [accessed 02.27.17].

[21] Parker H.S. The Hidden Human Tragedy Caused by Incessant Wind Turbine Noise. *European Platform Against Windfarms*. Available on:

<https://stopthesethings.com/author/stopthesethings/page/2/> [accessed 05.01.17].

[22] Solomin E., Kirpichnikova I., Martyanov A. Iterative Approach in Design and Development of Vertical Axis Wind Turbines. *Applied Mechanics and Materials* Vol. 792: Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering 2015; 792:582–89.

[23] SWIP – New innovative solutions, components and tools for the integration of wind energy in urban and periurban areas. Spain, Great Britain. Program: FP7-ENERGY. European Commission. Modification of 17.07.2017. Available on:

http://cordis.europa.eu/news/rcn/137715_en.html [accessed 08.03.17].

[24] Next-Generation Wind Technology. EU-funded projects. Available on: <https://windeurope.org/policy/eu-funded-projects/> [accessed 08.03.17].

[25] WWEA released latest global small wind statistics. Jun.2, 2017. Available on:

<http://www.wwindea.org/wwea-released-latest-global-small-wind-statistics/> [accessed 01.20.18].

[26] da Rosa A.V. *Fundamentals of Renewable Energy Processes*. 3rd Edition. p. 688, Chapter 15 “Wind Energy”. 2013. ISBN: 978-0-12-397219-4. Available on: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780123972194> [accessed 01.26.18].

[27] Borg M., Collu M., Brennan F.P. Offshore floating vertical axis wind turbines: advantages, disadvantages, and dynamics modeling state of the art. *The Royal Institution of Naval Architects. Marine & Offshore Renewable Energy*. September 2012, London, UK. Available on:

https://www.researchgate.net/publication/235963001_Offshore_floating_vertical_axis_wind_turbines_Advantages_disadvantages_and_dynamics_modelling_state_of_the_art [accessed 01.24.18].

[28] Albuquerque I.M., Matos F.F. d. S. A Characterization of Vertical Axis Wind Turbines. *IEEE Latin America Transaction* 2016; 14(10): 4255-60. Available on: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7786302&isnumber=7786295> [accessed 01.22.18].

[29] Solomin E.V. Development and optimizing of vertical axis wind turbines (Osnovy metodologii razrabotki vertikal'no-osevykh vetroenergeticheskikh



ustanovok). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2011;1:18–39. Available on:

https://www.researchgate.net/profile/Evgeny_Solomin [accessed 03.04.18].

[30] Züttelab A. *et al.* Storage of Renewable Energy by Reduction of CO₂ with Hydrogen. *Sion, a new Center for Chemistry and Chemical engineering in Valais. CHIMIA*, 2015;69(5):264–68.

[31] Energy Density of Hydrogen. An encyclopedia of scientific essays. The Physics Factbook. 2005.

[32] Hislop M. Solid-state EV battery breakthrough from Li-ion battery inventor John Goodenough. The American Energy News. Available on: <http://theamericanenergynews.com/markham-on-energy/solid-state-battery-advance-goodenough> [accessed 03.15.17].

[33] Espinar B., Mayer D. The role of energy storage for mini-grid stabilization. Report IEA-PVPS T11-02:2011, IEA PVPS Task 11, July 2011, p.28.

[34] Amiryar M.E, Pullen K.R. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. *Appl. Sci.*, 2017;7:286.

[35] Hydrogen Storage. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of Energy. Available on: <https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage> [accessed 01.23.18].

[36] LeRoy R.L., Bowen C.T., LeRoy D.J. The thermodynamics of aqueous water electrolysis. *J. Electrochem. Soc.*, 1980;127:1954–1962.

[37] Zeng K., Zhang D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2010; 36:307–326.

[38] Ramesh Gupta, Properties of Hydrogen. Cryogenic Data Handbook. Brookhaven National Laboratory, US Department of Energy. Available on: <https://www.bnl.gov/magnets/staff/gupta/cryogenic-data-handbook/Section3.pdf> [accessed 02.23.17].

[39] Dias R.P., Silvera I.F. Observation of the Wigner-Huntington transition to metallic hydrogen. *Science*, 2017;355:715–18. doi:10.1126/science.aal1579, 2017.

[40] Wind-to-Hydrogen Project. Hydrogen and Fuel Cells. National Renewable Energy Laboratory. DOE. USA. Available on: <https://www.nrel.gov/hydrogen/wind-to-hydrogen.html>. [accessed 02.23.17].

[41] Pavlov N.A., Rogachev D.S., Sinickiy A.V., Solomin E.V. Autonomous Power Supply for Extreme North Objects (Avtonomnoe energosnabzhenie ob"ektov krainego severa). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2015;(10–11):75–83. DOI:10.15518/isjaee.2015.10-11.007 (in Russ.).

[42] Solomin E.V., Topolsky D.V., Topolskaya I.G. Algorithms of LiFePO₄ batteries automatic charge. *Procedia Engineering Journal*, 2015;129:213–218 (Journal reference: PROENG27158. PII: S1877–7058(15)03919–3) DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.035. Available on:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815039193>. [accessed 02.23.17].

[43] Korobatov D.V., Sirotkin E.A., Troickiy A.O., Solomin E.V. Wind Turbine Power Plant Control, Materials of X International IEEE Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” (Dynamics, IEEE), Omsk State Technical University, Nov. 2016.

[44] Martyanov A.S., Solomin E.V., Korobatov D.V. Development of control algorithms in Matlab/Simulink. *Procedia Engineering Journal*, 2015;129:922–26 (PROENG27157. PII: S1877–7058(15)03968–5).

[45] Grakhov Y.V., Solomin E.V. *et al.* Patent # 2347104 Russian Federation, IPC F03D 3/06 (2006.1). Rotor of wind turbine with vertical axis of rotation (Rotor vetryanoi ustanovki s vertikal'noi os'yu vrashcheniya (varianty)). Applied on 12.05.2006. Available on: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1519059231888 (in Russ.).

[46] Grakhov Y.V., Solomin E.V. *et al.* Patent # 2443902 Russian Federation, IPC F03D3/06 (2006.01). Rotor of vertical axis wind turbine (Vetrokoleso vetroenergeticheskoi ustanovki s vertikal'noi os'yu vrashcheniya). Applied on 27.05.2010. Available on: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1519059266358 (in Russ.).

[47] Solomin E.V. Patent # 101105 Russian Federation, IPC F03D 9/02 (2006.01). Combined wind solar energy unit with LED lighter for public places (Kombinirovannaya vetro-solnechnaya energeticheskaya ustanovka so svetodiodnym prozhektorom dlya sotsial'nykh nuzhd) Applied on 09.08.2010 Available on: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1519059343881 (in Russ.).

[48] Sirotkin E.A., Martyanov A.S., Solomin E.V., Kozlov S.V. Emergency Braking System for the Wind Turbine. *Procedia Engineering Journal (ICIEAM)*, 2016; (PROENG27157. PII: S1877–7058(15)03968–5).

[49] Basic considerations for the safety of hydrogen systems. ISO/TR 15916:2015. International Organization for Standardization. Available on: <https://www.iso.org/standard/56546.html?browse=tc> [accessed 01.25.18].

[50] Pressure Equipment Directive 97/23/CE. European Commission. Available on: https://ec.europa.eu/growth/sectors/pressure-gas/pressure-equipment/directive_en [accessed 01.25.18].

[51] Gusev A.L. Cleaning system for corrosive gases and hydrogen. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2009;45(9–10):640.

[52] Gusev A.L., Kazaryan M.A. Manufacture Nanocomposites Membranes for clearing Chlorine//Work Meeting, Bayer MaterialScience AG, Leverkusen, Germany, 12–15, August, 2007.

[53] Favier F.L., Walter E.C., Zach M.P., Benter T., Penner R.M. Hydrogen sensors and switches from electrodeposited palladium mesowire arrays. *Science*, 2001;293(5538):2227–31.



[54] Gusev A.L., Belousov V.M., Bacherikova I.V., Lyashenko L.V., Rozhkova E.V. Hydrogen Sensor for Cryogenic Vacuum Objects. *Hydrogen Materials Science and Chemistry of Metal Hydrides*, 01/2002: pp. 41–47. ISBN: 978-1-4020-0731-6, DOI:10.1007/978-94-010-0558-6_5.

[55] Gusev A.L., Belousov V.M., Bachericova I.V., Rozhkova E.V. Hydrogen Sensor for Cryogenic vacuum objects. *Abstracts book of NATO International Conference Katsiveli*, Yalta, Ukraine September 02–08, 1999, p.370; A.L. Gusev, V.M. Belousov, I.V. Bachericova, E.V. Rozhkova. Hydrogen Sensor for Cryogenic vacuum objects. Book full-text of NATO International Conference, 09/1999, p. 370.

[56] Eberle U., Mueller B., von Helmholt R. Fuel cell electric vehicles and hydrogen infrastructure: status 2012. *Energy & Environmental Science*, 2012;5(10):8790–98.

[57] Gusev A.L. Thermodynamic peculiarities of low-temperature regeneration of cryosorption devices in heat-insulation cavities of hydrogenous cryogenic tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2001;26(8):863–871. DOI 10.1016/S0360-3199(01)00024-6.

[58] Gusev A.L. Flaw detection of large cryogenic objects with regard for the effect of effusion induced hydrogen superinsulation instability. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2000;1:103–108.

[59] Gusev A.L. Anomalies of the residual superinsulation pressure under emergency conditions of cryogenic objects. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2000;1:55–75.

[60] Bratsch S.G. Standard Electrode Potentials and Temperature Coefficients in Water at 298.15 K. *J. Phys. Chem. Ref. Data. American Institute of Physics*, 1989;18(1):1–21.

[61] GOST (RF Standard) 3022-80. Hydrogen for industrial use. Specifications (Vodorod tekhnicheskii. Tekhnicheskie usloviya) (in Russ.).

[62] Kirpichnikova I.M., Martyanov A.S., Solomin E.V. Simulation of a generator for a wind power unit. *Russian Electrical Engineering*, 2013;84(10):46–49. DOI:10.3103/S1068371213100076.

[63] Goltsov V.A., Veziroglu T.N. From hydrogen economy to hydrogen civilization (Ot vodorodnoi ekonomiki k vodorodnoi tsivilizatsii). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2017;(22–24):25–32 (in Russ.). doi:10.15518/isjaee.2017.22-24.025-032 (previously: *International Journal of Hydrogen Energy (IJHE)*, 2001;26:909–915 (in Eng.)).

[64] Galeev A.G., Gusev E.V., Zolotov A.A., Odelevskiy V.K., Rodchenko V.V. The method of optimization of maintenance and reliability of complex technical systems operating on oxygen-hydrogen fuel (Metodika optimizatsii parametrov tekhnicheskogo obsluzhivaniya i pokazatelei bezotkaznosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem, funktsioniruyushchikh na kislородно-vodorodnom toplive). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2017;(1–3):22–33. DOI:10.15518/isjaee.2017.01-03.022-033 (in Russ.).

[65] Naman S.A., Türe I.E., Veziroglu T.N. Industrial extraction pilot plant for stripping H₂S gas from black sea water (Pilotnaya promyshlennaya ustanovka po desorbtsii H₂S iz vody chernogo morya). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2017;(22–24):99–109. doi:10.15518/isjaee.2017.22-24.025-032 (in Russ.) (previously: *International Journal of Hydrogen Energy (IJHE)*, 2008;33:6577–6585 (in Eng.)).

[66] Research Focuses on Overcoming Challenges. Hydrogen Production: Electrolysis, Fuel Cell Technologies Office, US Department of Energy. Available on: <https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis> [accessed 01.25.18].

[67] Varkaraki E., Lymberopoulos N., Zoulias E. et al. Hydrogen based Uninterruptible Power Supply. 2nd European Hydrogen Energy Conference – EHEC 2005, Nov. 22–25, Zaragoza. Available on: http://www.cres.gr/kape/hmerida/files/ydrogen/Varkarak_i_EHEC_05%20HELPS.pdf [accessed 01.24.18].

Транслитерация по BSI

