

УДК 620

АРКТИКА: ЭКОЛОГИЯ И ВОДОРОДНАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА****Р.Н. Шульга¹, А.Ю. Петров¹, И.В. Путилова²***¹Филиал ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ»д. 12, ул. Красноказарменная, Москва, 111250, Россия
тел.: +7(903) 248-20-56; e-mail: rnshulga@vei.ru²НИО «Научно-образовательный центр «Экология энергетики» НИУ МЭИд. 14, ул. Красноказарменная, Москва, 111250, Россия
тел./факс: +7(495)362-79-12; e-mail: putilovaiv@ecopower.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.07-09.043-061

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



Рассмотрены социальные и экологические аспекты, климатические и гляциологические особенности освоения Арктики в части энергоснабжения. Показаны наиболее целесообразные способы комплексного освоения Арктики. На примере крупных и уникальных стационарных проектов отмечен ряд недостатков: высокая стоимость, долгострой, неполная автономность, недостаточное решение проблем экологии и переработки отходов. Неполная автономность обусловлена необходимостью подвоза материалов, продуктов, сменных экипажей и персонала, а также недостаточной логистикой и трудностями транспортировки на материке в условиях лета и по морю в условиях зимы. Проблемы экологии и переработки отходов связаны с применением традиционных способов сжигания твердого и жидкого топлива с использованием угля или мазута. Переход на сжиженный природный газ (СПГ) для электродвижения и энергоснабжения заметно улучшит экологическую обстановку. Исследования, выполненные на математической модели многофункционального энергетического комплекса, показали возможность бесперебойного энергоснабжения локальной нагрузки как от централизованной сети, так и от дизель-генератора (ДГ) и накопителя электроэнергии, причем ДГ используется с целью экономии топлива в качестве резервного источника. Предлагаемые технологии электрогенерации на основе водорода или атомных станций малой мощности (АСММ) позволяют наряду с улучшением экологической обстановки повысить энергоэффективность установки непосредственного преобразования топлива и обеспечить комплексную переработку отходов. Малочисленность населения Арктики, его мобильность при вахтовом методе требуют комплексной разработки мобильных систем энерго- и жизнеобеспечения малой мощности до 30 МВт с помощью СПГ или АСММ, дополненных ВИЭ. Если установка на водороде является одновременно источником и накопителем электроэнергии, то применение АСММ и особенно ВИЭ требует наличия накопителей электроэнергии. Указанные накопители водородного или электрохимического цикла являются наиболее прогрессирующими в мировой энергетике, и их применимость существенно зависит от развития обслуживающей инфраструктуры. Отмечено, что типизация и тиражирование источников электроснабжения позволят решить проблему освоения удаленных и изолированных регионов Арктики путем комплексного использования инновационных технологий генерации, накопления, передачи и распределения электроэнергии, обеспечения жизнедеятельности, утилизации и переработки отходов, сохранения благоприятной экологической обстановки с использованием водородной энергетики и цифровых систем управления и мониторинга.

Ключевые слова: Арктика; экология; водородное энергоснабжение; жизнеобеспечение; постоянный ток; накопление энергии.

THE ARCTIC: ECOLOGY AND HYDROGEN ELECTRICAL POWER ENGINEERING***R.N. Shulga¹, A.Y. Petrov¹, I.V. Putilova²***¹VEI – the Branch of the Federal State Unitary Enterprise RFNC-VNIITF12 Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russia
tel.: +7(903) 248 20 56, e-mail: rnshulga@vei.ru

*Шульга Р.Н., Петров А.Ю., Путилова И.В. Арктика: экология и водородная электроэнергетика // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;07-09:43-61.



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

doi: 10.15518/isjaee.2019.07-09.043-061

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

The social and environmental aspects, climatic and glaciological features of the Arctic development in terms of energy supply are considered. The most expedient ways of complex development of the Arctic are shown. On the example of the large and unique stationary projects, paper marks some shortcomings: high cost, long-term construction, incomplete autonomy, insufficient solution of problems of ecology and waste processing. Incomplete autonomy is due to the need for transportation of materials, products, replacement crews and personnel, as well as insufficient logistics and transportation difficulties in summer on the mainland and in winter by sea. Problems of ecology and waste processing are associated with the use of traditional methods of burning solid and liquid fuels using coal or fuel oil polluting the environment. Switching to liquefied natural gas (LNG) for electric propulsion and power supply will significantly improve the environmental situation. The research performed on the mathematical model of the multi-functional energy complex of IEC shows the possibility of uninterrupted power supply of local load from both the centralized network, and from the diesel generator (DG) and the electric power storage; DG is used to save fuel as a backup source. The proposed technologies of power generation based on hydrogen or low-power nuclear power plants allow increasing the energy efficiency of the direct fuel conversion plant and provide integrated waste processing along with improving the environment. The small population of the Arctic, its mobility when using the rotational method requires the integrated development of mobile energy and life support systems of low power up to 30 MW using LNG or low-power nuclear power plants supplemented with RES. If the installation on hydrogen is both source and storage of electricity, the use of low-power nuclear power plants and especially RES require the use of energy storage devices. These hydrogen or electrochemical cycle storage devices are the most progressive in the world energy sector, and their applicability significantly depends on the development of the service infrastructure. Typing and replication of power supply sources can solve the problem of development of remote and isolated regions of the Arctic through the integrated use of innovative technologies for generation, storage, transmission and distribution of electricity, life support, recycling and recycling of waste, environmental conservation using hydrogen energy and digital control and monitoring systems.

Keywords: Arctic; ecology; hydrogen energy supply; life support; direct current; energy storage.



Ирина Вячеславовна
Путилова
Irina Putilova

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

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

Образование: Московский энергетический институт (2001 г.).

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

Публикации: более 90.

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

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

Education: Moscow Power Engineering Institute, 2001.

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

Publications: more than 90.





Александр Юрьевич
Петров
Alexander Petrov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, заместитель директора РФЯЦ-ВНИИТФ – директор ВЭИ, ВЭИ – филиал ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ».

Награды и премии: Почетный работник Топливо-энергетического комплекса РФ, Знак «За заслуги перед атомной отраслью» 2 степени.

Образование: Уральский политехнический институт им. С.М. Кирова (1983 г.).

Область научных интересов: электрические аппараты; технологии металлообработки; комплексы электрооборудования.

Публикации: более 60.

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Deputy Director of RFNC-VNIITF – Director of VEI, VEI – the branch of FSUE “RFNC – VNIITF”.

Awards: Honorary Worker of the Fuel and Energy Complex of the Russian Federation, the Sign “For Services to the Nuclear Industry” 2 degree.

Education: S.M. Kirov Ural Polytechnic Institute, 1983.

Research interests: electrical devices; metalworking technologies; electrical equipment complexes.

Publications: more than 60.



Роберт Николаевич
Шульга
Robert Shulga

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

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

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

Публикации: 150, включая 20 патентов.

SPIN РИНЦ: 5136-4188 по РИНЦ 41 публикация, 100 цитирований; индекс РИНЦ: 5, ResearcherID: A-9321-2014; Scopus AuthorID: 6506511448.

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

Education: Bauman Moscow State Technical University, 1963.

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

Publications: 150, including 20 patents.



1. Введение

В настоящий момент проект Арктика является определяющим для России. По подсчетам к середине XXI века каждый четвертый баррель нефти будет из Арктики, 400 месторождений газа находятся за Полярным кругом, из них на данный момент освоены только 60. Побережье вечной мерзлоты имеет протяженность 23 тыс. км Арктики, глубина которой в западной части составляет до 500 м, а в восточной – до 1 000 м, причем эта мерзлота относительно быстро тает.

Арктика в границах Северного полярного круга занимает 21 млн кв. км, а арктическая зона РФ (АЗРФ) – 9 млн кв. км, что составляет пятую часть территории РФ [1]. АЗРФ сегодня дает до 15 % ВВП страны и четверть экспорта. Вопросы обустройства Арктики связаны с разведкой и освоением ее природных богатств, защитой северных границ большой протяженности, освоением Северного морского пути (СМП) за счёт организации и обеспечения ледокольных газозавозов, ледоколов и портов с береговой инфраструктурой. Запасы нефти по данным Геологической службы США составляют 90 млрд баррелей, что с учетом мирового расхода обеспечивает потребление в течение 150 лет даже с учетом истощения запасов на континентах. Вопросы использования природных богатств Арктики становятся всё острее вплоть до военного противостояния. После 50-х гг. XX в. это снова требует создания военной инфра-

структуры на арктических островах: 2 военных баз, 7 аэродромов, РЛС, метеостанций и др. В течение пяти лет Министерство экономического развития РФ (МЭР РФ) выделяет 150 млрд руб. на освоение Арктики и СМП в виде 8 зон поддержки с помощью фондов и проектов [2, 3].

Суровый климат Арктики от минус 60 °С до плюс 50 °С требует разработки специального оборудования, материалов, топлив. Несмотря на высокий ветропотенциал на островах и побережье, применение возобновляемых источников (ВИЭ) в виде ветровых электростанций (ВЭС) и фотоэлектрических станций (ФЭС) проблематично. Экономичные дизель-электрические станции (ДЭС) загрязняют Арктику отходами окиси углерода и бочками из-под топлива и масел. Малочисленность населения, его мобильность, вахтовый метод освоения, сложная логистика и суровый климат затрудняют энергетическое обеспечение Арктики путем использования централизованного энергоснабжения и применения сетей переменного тока воздушных и кабельных линий (ВЛ и КЛ соответственно). Тем не менее в ближайшие годы необходимо провести геологоразведку акваторий Арктики, разработать технологию арктической нефтегазодобычи, обеспечить охрану и реализацию СМП и другие мероприятия.

Важным вопросом является определение направлений вложения выделенных средств в развитие арктических регионов. На данный момент определены ведомства и направления арктической зоны, в кото-



рые необходимо вкладывать средства, имея в виду, что острова относятся к Минобороны РФ, суша – к Минтранса РФ и РЖД (Северный широтный ход – СШХ), а СМП – к ГК «Росатом». По-видимому, приоритет в части энергетики должен быть отдан водородной энергогенерации (ВЭГ) с использованием сжиженного природного газа (СПГ), атомным электростанциям (АЭС) малой и средней мощности, а также ВИЭ, ввиду их опережающего развития по энергоснабжению. В России и в мире АЭС малой мощности (АСММ) быстро развиваются, расширяя диапазон мощностей от 0,1 МВт до 200 МВт, совершенствуя технологии при обеспечении надежности и соответствия экологическим требованиям. СПГ расширенными темпами добывается в западной части Арктики и вывозится по СМП ледовыми газовозами, а в перспективе будет вывозиться по железнодорожным путям. ВИЭ начали применяться на островах и в прибрежных районах. Удаленные от побережья рудники и горно-обогатительные комбинаты (ГОКи) скорее всего будут обеспечены электричеством и теплом с помощью малых тепловых электростанций

(ТЭС), плавучих атомных теплоэлектростанций (ПАТЭС) с использованием ВЛ и КЛ, предпочтительно на постоянном токе. Ввиду вечной мерзлоты, малочисленности населения, а также отсутствия дорог, распространенные средства, а также способы транспортировки и снабжения энергией мало подходят для Арктики. Например, генерация и выработка СПГ проще и дешевле не на суше, а на воде, в том числе под водой, что осуществляется в проекте Ямал-2. Наибольшие перспективы энергетики связаны с прогрессом развития ВЭГ, АСММ, новых технологий накопления, преобразования, передачи электроэнергии, цифровизации и роботизации.

Цель настоящей статьи состоит в рассмотрении особенностей экологической обстановки в Арктике и анализе возможных путей обустройства с минимизацией экологического вреда преимущественно за счет водородной энергетики. Под обустройством понимается автономное обеспечение энергоснабжением, водоподготовкой, а в ряде случаев воздухоподготовкой. Вопросы бытового и производственного обеспечения не рассматриваются.



Список обозначений	
<u>Буквы греческого алфавита</u>	
φ	Фазовый угол нагрузки
ω	Частота, рад/с
Δ	Отклонение
<u>Буквы латинского алфавита</u>	
<i>C</i>	Емкость, Ф
<i>I</i>	Сила тока, А
<i>L</i>	Индуктивность, Гн
<i>P</i>	Мощность, Вт
<i>Q</i>	Реактивная мощность, ВА
<i>R</i>	Сопротивление, Ом
<i>tg</i>	Тангенс
<i>U</i>	Напряжение, В
<u>Индексы нижние</u>	
<i>d</i>	Постоянный
АБ	Аккумуляторная батарея
г	Генератор
и со	Инверторная сетевая обмотка
н	Нагрузка
р	Реактор
уст	Уставка
<u>Аббревиатуры</u>	
АБ	Аккумуляторная батарея
Авт.ген.	Автономный генератор
АГ	Асинхронный генератор
АЗРФ	Арктическая зона Российской Федерации
АСММ	Атомная станция малой мощности
АЭС	Атомная электростанция
ВЛ	Воздушная линия
ВИЭ	Возобновляемый источник электроэнергии
ВПТ	Вставка постоянного тока
ВСЭ	Внешняя система энергоснабжения
ВТ	Выключатель постоянного тока
ВЧ	Высокая частота
ВЭГ	Водородная электрогенерация
ВЭМ	Водородный энергомодуль
ВЭИ	Всероссийский электротехнический институт



Продолжение списка обозначений

ВЭС	Ветроэлектростанция
ВЭУ	Ветроэлектроустановка
ВЭЭ	Водородная электроэнергетика
ГК	Государственная корпорация
ГОК	Горно-обогатительный комбинат
ж/д	Железная дорога
ДГ	Дизель-генератор
ДЭС	Дизельная электростанция
И	Инвертор
имп.	Импульсы
КЛ	Кабельная линия
КПД	Кoeffициент полезного действия
ЛИА	Литий-ионный аккумулятор
КИУМ	Кoeffициент использования установленной мощности
ММКЖ	Мобильный модульный комплекс жизнеобеспечения
МЛСП	Морская ледостойкая платформа
МСПТ	Мультиагентная (многоподстанционная) сеть постоянного тока
МЭР РФ	Министерство экономического развития Российской Федерации
НЭЭ	Накопитель электроэнергии
ПА	Преобразователь автономный
ПАТЭС	Плавучая атомная теплоэлектростанция
ПН	Преобразователь напряжения
ППТ	Передача постоянного тока
ПС	Преобразователь сетевой
ПЭБ	Плавучий энергоблок
РГ	Распределенная генерация
РЖД	Российские железные дороги
РУ	Распределительная установка
САУК	Система автоматического управления
САЭ	Система автономного энергоснабжения
СГ	Синхронный генератор
СК	Суперконденсатор
СМП	Северный морской путь
СПГ	Сниженный природный газ
СПП	Силовой полупроводниковый прибор
СПТ	Сеть постоянного тока
СПИНЭ	Сверхпроводящий индуктивный накопитель электроэнергии
СУ	Система управления
СУП.А	Система управления преобразователями автономная
СУП.С	Система управления преобразователями сетевая
СШХ	Северный широтный ход
ФИУ.А	Фазо-импульсное управление автономное
ФИУ.С	Фазо-импульсное управление сетевое
ТЭ	Водородный топливный элемент
ФЭС	Фотоэлектрическая станция
ШИМ	Широтно-импульсная модуляция
ЩУДГ	Щит управления дизель-генератора
ЭЛВ	Электронно-лучевой вентиль
ЭЭС	Электроэнергетическая система (переменного тока)



2. Экологические аспекты

2.1. Социальные и экологические особенности Арктики

Социальные и экологические особенности Арктики, которые необходимо учитывать при ее освоении и энергообеспечении, обусловлены в первую очередь малочисленностью и разнородностью местного коренного населения или даже его отсутствием. Численность населения за Полярным Кругом в зоне АЗРФ составляет 2,4 млн чел., численность местного

коренного населения – примерно 400 тыс. чел. В основном население проживает либо в 3÷5 крупных городах, либо обслуживает порты, ГОКи, рудники, шахты, преимущественно вахтовым методом. Например, население большинства десяти портов по трассе СМП не превышает 5 тыс. чел. Низкая интенсивность ультрафиолета, короткое лето и длительная темная полярная зима вынуждают ограничивать срок пребывания приезжего населения примерно пятью годами по условиям арктической медицины. В связи с этим используется преимущественно вахтовый ме-



тод работы, а в лучшем случае необходимо широкое применение робототехники и автоматизации. Тем не менее сохраняется потребность в ручном труде для добывающих производств. Следовательно, существует необходимость разработки комплексов не только для энергообеспечения, но и для комфортного жизнеобеспечения (тепло-, водоснабжение, утилизация и переработка отходов и др.). При этом такие комплексы должны быть разной мощности и выполнения, желательно мобильными для передислокации добывающих буровых, рудников, ГОК, воинских подразделений и др. В настоящее время Арктика существует за счет поставки всего необходимого, начиная с продуктов питания и заканчивая топливом (уголь, мазут, дизельное топливо, масла и др.), особенно в зимнее время.

Данные условия неизбежно приводят к ухудшению экологии всего региона за счёт отходов жизнедеятельности, выбросов окиси углерода, таяния мерзлоты и изменения климата. Отсутствие дорог, складов для хранения приводят к удорожанию доставки в зависимости от региона, что тем более препятствует стационарному строительству жилых и производственных объектов.

2.2. Специфические климатические и гляциологические особенности Арктики

Климатические условия на побережье сильно различаются. Например, на юге АЗРФ в январе отрицательная температура воздуха составляет минус 2÷4 °С, в Баренцевом море – минус 25 °С (запад), в Чукотском море – минус 32÷36 °С, в Сибири – минус 45÷50 °С, причем значения минимальной температуры достигают минус 55÷60 °С, в то время как в летнее время – плюс 50 °С. Указанная особенность предъявляет специфические требования к людям, материалам, топливу и маслам. Продолжительность лета составляет 120 дней, а в условиях потепления достигнет 180 дней, что уже изменяет условия обитания людей, животных, а также состояние растительного покрова в условиях таяния льда.

Ледовитость АЗРФ зимой достигает 11 млн кв. км, а летом снижается до 8 млн кв. км. Льды Арктики отражают солнечный свет и не дают перегреться Земле, а также сильно влияют на циркуляцию воды в океанах. Потеря льда в 2003–2013 гг. составила почти 5 %. В связи с этим обеспечение экологической безопасности Арктики – это сохранение климата на Земле.

Наличие вечной мерзлоты заставляет строить стационарные сооружения на опорах, опоры ВЛ и ж/д дорог – с использованием теплоизоляции, а автомобильные дороги практически отсутствуют и заменяются так называемыми зимниками. В настоящее время вся линейка продуктов завозится в летнюю навигацию в течение 3÷4 месяцев морским транспортом, а развозится по побережью и в глубинку по зимнику. Из-за отсутствия складов и хранилищ существенно дорожает логистика, увеличиваются сроки освоения и

обслуживания. Энергетика большинства портов и поселков Арктики обеспечивается тепловыми угольными ТЭС мощностью порядка 25 МВт, а также ДЭС, топливо которых завозится с материка в летнюю навигацию. Острова Арктики осваиваются преимущественно средствами Минобороны РФ, которое вынуждено также ликвидировать тот мусор, который остался в виде отходов холодной войны 50–60 гг. XX в. В частности, на островах архипелага Франца-Иосифа на 2010 г. оставалось 250 тыс. бочек (60 тыс. т нефтепродуктов), а также 1 млн пустых бочек, которые вывозятся в летнюю навигацию.

Наряду с энергообеспечением, которое также необходимо для получения тепла и холода, следующим фактором жизнедеятельности является получение питьевой и технической воды. Энергетически наиболее оправданный способ получения пресной воды заключается в вымораживании льда и снега. Наиболее проблемной является утилизация технических отходов (масла, мазута, продуктов нефтехимии, а также радиационных отходов), которая до сих пор не решена, в то время как органические отходы утилизируются преимущественно термическим способом. Вопросы водоподготовки и утилизации отходов в значительной мере проработаны в ВЭИ и МЭИ, преимущественно в части использования озонирования и других способов очистки.

Таким образом, освоение этих земель затрудняют громадная площадь, суровый климат, малочисленность населения и т.д.

2.3. Проблемы комплексного освоения Арктики

Освоение Арктики – это государственная проблема, сопоставимая с национальной задачей, однако решить ее во многом мешают ведомственные разделения и подходы. Поскольку острова относятся к Минобороны РФ, СМП – к ГК «Росатом», СШХ – к РЖД, пункты добычи – к компаниям и регионам, затрудняется выполнение общегосударственных задач и требуется организация не только командования «Север», но и государственно-частной компании по типу Русско-Американской компании 18 века. Такая компания, возможно, созданная в рамках ГК «Росатом», могла бы за счет отчислений от провоза СПГ и грузов по СМП осуществлять комплексное освоение островов и прибрежной зоны по трассе СМП.

Разнообразие условий освоения островов, прибрежной и материковой зон, а также западного, центрального и восточного регионов АЗРФ должно учитываться в выборе средств энерго- и жизнеобеспечения. Комплексное освоение Арктики в условиях ее специфических особенностей предполагает



обеспечение определенных конгломераций по численности людей, сроку обитания и функционированию добывающих установок, наличию коренного и привозного населения, географическому расположению и др. Кроме того, необходимо обеспечить экономичное получение электричества, тепла, холода, питьевой и технической воды, утилизацию технических и органических отходов, минимизацию выбросов окиси и диоксида углерода и др. с помощью новых технологий.

Если численность населения поселка, города, порта превышает условно 1 тыс. человек, а срок функционирования составляет 10 лет, тогда объект относится к стратегически важным, и в этом случае может быть допустимо стационарное возведение объекта с длительным сроком окупаемости или даже его отсутствием. Поставка всех строительных материалов, техники, людей на осваиваемые территории в условиях полярной зимы, льдообразования делает капитальное строительство весьма затратным, но в ряде случаев необходимым.

Если численность населения или вахты на добывающей установке или поселке условно не превышает 100–500 человек, а срок функционирования составляет примерно 5–10 лет, то наиболее рациональным становится создание и использование мобильных модульных комплексов жизнеобеспечения (ММКЖ) заводского исполнения, доставляемых с материка морским транспортом в летнюю навигацию [4]. Подобные комплексы разной мощности от 1 МВт до 30 МВт могут обеспечить все вышеприведенные функции, включая дополнительные мероприятия по потребности, то есть воздухоподготовку, сигнализацию и охрану периметра, освещение, телеуправление и дистанционный мониторинг оборудования модулей. Общими требованиями к комплексу являются полная автоматизация, обслуживание по необходимости, высокая надежность со сроком службы до 30 лет, унификация и стандартизация отечественного оборудования. В западной части Арктики указанным требованиям отвечают ВЭГ с использованием СПГ [4], а в восточной части – атомные электростанции малой мощности АСММ [5, 6].

Рассмотрим возможности и реализацию стационарных и мобильных объектов на примере ВЭГ для нефтегазовых платформ, в частности, морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП) «Приразломная» в Печорском море, а также энергообеспечение порта Певек по трассе СМП.

2.4. Стационарное энерго- и жизнеобеспечение

Нефтегазовая платформа МЛСП «Приразломная» расположена на шельфе Печорского моря, глубиной около 20 м, на удалении от берега в 55 км к северу от п. Варандей. Указанная платформа осуществляет бурение скважин, добычу, хранение, отгрузку на танкеры, выработку электричества и тепла в районе дрейфующих ледовых полей с высотой торосов до 2 м и льдообразованием в течение 7 месяцев. Платформа обслуживает 32 скважины, из них 19 добывающих, 12 нагнетательных, 1 поглощающая отходы. Платформа, принадлежащая ПАО «Газпромнефть», введенная в строй в 2014 г., является уникальной и первой в регионе [7].

Персонал платформы составляет 200 чел., смена вахт осуществляется через 30 суток, пополнение материалов – через 60 суток. Платформа полностью автоматизирована с помощью автоматической системы управления и безопасности (АСУБ), включая контроль пожарно-газовой обстановки; имеет нулевой сброс, то есть растворы, шлам, отходы сбрасываются в специальную поглощающую скважину. Специальные системы перекачки нефти в два ледостойких танкера водоизмещением по 70 тыс. т позволяют осуществлять перекачку за 2–3 часа, а при наличии прилива/отлива через каждые 6 часов. Система АСУБ позволяет отключить перекачку за 7 секунд при возникновении нештатной ситуации. Ориентировочная стоимость инвестиций в проект составляет примерно 200 млрд руб., из них стоимость платформ – 60 млрд руб., остальное – это танкеры и инфраструктура. Ожидаемая окупаемость проекта зависит от цен на нефть, но заведомо оправдана освоением новых технологий добычи и транспортировки нефти, так как каждый четвертый баррель нефти во второй половине XXI века будет добываться в Арктике.

Определенными недостатками проекта являются: использование традиционных источников электропитания и подвоза жидкого топлива; недостаточная автономность в части водоснабжения, недостаточная утилизация отходов в поглощающую скважину; влияние на гнездование и перелет птиц. Перевод на СПГ в качестве топлива танкеров и платформы может улучшить экологическую обстановку прилегающего региона. На рис. 1 приведено фото МЛСП «Приразломная» с изображением наклонных скважин и кранов с трубопроводами для перегрузки нефти на подходящие раз в 2 месяца ледостойкие танкеры.



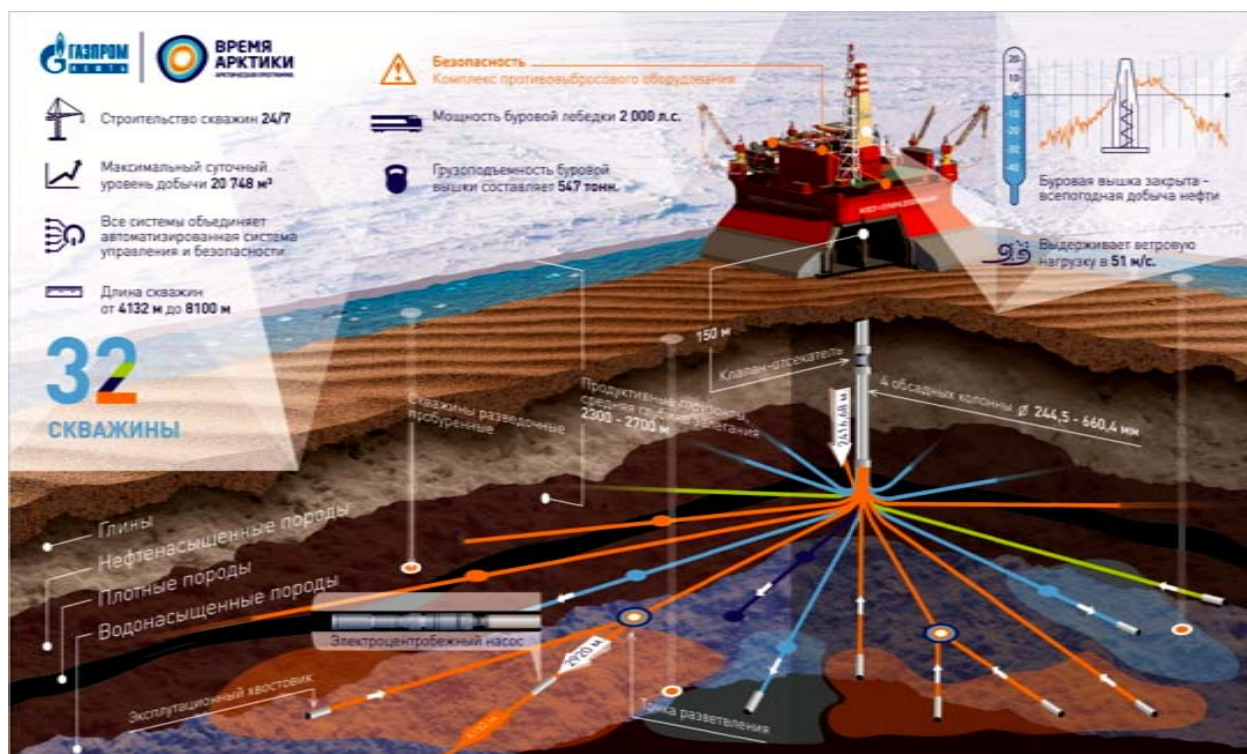


Рис. 1 –МЛСП «Приразломная» [7]
 Fig. 1– “Prirazlomnaya” Platform [7]

Другим уникальным объектом для энергообеспечения Чукотки и Якутии является плавучая ПАТЭС «Академик Ломоносов» электрической мощностью 70 МВт, которая в 2019 г. должна быть установлена в п. Певек и через ВЛ 110 кВ обеспечивать питанием поселки, рудники и ГОКи, ранее питаемые Билибинской АЭС мощностью 48 МВт (выработала свой ресурс и будет выведена из эксплуатации). Плавучий энергоблок (ПЭБ) – это автономный энергетический объект, который целиком создается на судостроительном заводе как самоходное судно и затем буксируется морским или речным путем к месту его эксплуатации. Заказчику поставляется полностью построенный, испытанный и готовый к работе энергетический объект с жилыми помещениями и полной инфраструктурой, обеспечивающей проживание эксплуатационного персонала и техническое обслуживание самого объекта [8].

На рис. 2 приведены структура и характеристики ПАТЭС с АСММ и схематичное размещение основных агрегатов, частично показана береговая инфраструктура с отводом кабелей и тепла.

Согласно проекту, ПАТЭС состоит из гладкопалубного самоходного судна с двумя реакторными установками КЛТ-40С ледокольного типа, разрабо-

танными АО «ОКБМ Африкантов». Плавучая станция может использоваться для получения электрической и тепловой энергии, а также для опреснения морской воды. В сутки она может выдать от 40 тыс. т до 240 тыс. т пресной воды.

Срок эксплуатации станции составит минимум 36 лет: 3 цикла по 12 лет, между которыми необходимо осуществлять перегрузку активных зон реакторных установок. Экипаж 72 человека, сменяемых вахтовым методом. Сметная стоимость проекта равна 37 млрд руб., из них 7 млрд руб. предполагается выделить на создание береговой структуры.

Такая плавучая атомная теплоэлектростанция с АСММ применяется впервые. Достоинствами проекта являются минимизация выбросов диоксида углерода в атмосферу; возможность тиражирования для выработки электричества, тепла; возможность применения для опреснения воды. К недостаткам относятся большие затраты на инфраструктуру (все, включая песок и щебень, доставляется из Мурманска); хранение радиоактивных отходов на борту; недостаточная защита от цунами, тайфунов, диверсий, несмотря на наличие мола; большое выделение тепла зимой с подогревом воды и обледенением в замкнутом объеме и др.



Рис. 2 – Структура и характеристики ПАТЭС с АСММ [8]
Fig. 2 – Structure and features PATES with ASM [8]

Рассмотренные уникальные проекты требуют больших затрат, много времени и в определенной степени не решают задачи по комплексному освоению Арктики, по крайней мере в части чистого энергоснабжения, сохранения экологии и утилизации отходов. Кроме того, освоить громадное по протяженности пространство СМП длиной 23 тыс. км невозможно такими разовыми проектами, поэтому нужны типовые проекты с комплексным решением проблем жизнеобеспечения, скорее всего на базе ВЭГ и АСММ, вероятно, не только плавучего, но и подводного типа. В западной части Арктики возможно использование СПГ на базе ВЭГ и ВЭС; для восточной части – различных средств ВИЭ в сочетании с АСММ и накопителями электроэнергии НЭЭ. Стационарное размещение энергообъектов из-за трудностей и дорогостоящей доставки ограничено, поэтому для Арктики актуальным является разработка мобильных комплексов энерго- и жизнеобеспечения с использованием новых инновационных технологий, включая применение НЭЭ и кабельных сетей постоянного тока [9, 10].

3. Исследования режимов работы многофункционального энергетического комплекса (МЭК)

Выполненные ранее исследования позволили сформулировать требования к оборудованию МЭК, которые могут быть автономными, сетевыми и комбинированными в составе МСПТ [4]. Исходя из принятого диапазона мощности $1 \div 10$ МВт, покрываю-

щего нужды мобильных и стационарных систем автономного энергоснабжения (САЭ), выбран уровень напряжения на шинах нагрузки 6(10) кВ.

Автономный МЭК (МЭК.А) изолирован от сети, работает на пассивную нагрузку и содержит дизель (турбину) с синхронным генератором (СГ), преобразователь с накопителем электрической энергии (НЭЭ) в виде аккумуляторных батарей (АБ) или топливных элементов (ТЭ).

Преобразователь МЭК.А типа dc-ac выполняется на приборах IGBT или IGCT, то есть в виде силовых полупроводниковых приборов (СПП), и его мощность варьируется от 1 МВт до 2 МВт в зависимости от мощности нагрузки.

Сетевой МЭК (МЭК.С) отличается наличием дополнительной связи с энергосистемой через сетевой преобразователь dc-ac или dc-dc с мощностью преобразователя $4 \div 8$ МВт. Сетевой преобразователь рассчитан на реверс мощности из внешней сети в сеть, внешняя система энергоснабжения (ВСЭ) выполняется в виде связи с сетью на постоянном и/или переменном токе, и его мощность определяется мощностью нагрузки и избыточной мощностью источников энергии.

Комбинированный МЭК отличается от предыдущих (автономного и сетевого) и имеет следующие особенности [10]:

- содержит как минимум три источника в виде генератора, автономного и сетевого преобразователя;
- может включать широкий набор источников электроэнергии в виде синхронных СГ и/или асинхронных генераторов (АГ) применительно к ветро-

вой энергоустановке (ВЭУ), АБ и/или топливных элементов (ТЭ), фотоэлектрических установок (ФЭУ) и др. Указанные источники присоединяются к шинам нагрузки: АГ через преобразователь ас-дс-ас, остальные источники (АБ, ТЭ, ФЭУ) – через преобразователи ас-дс.

Мощность и число СГ, АГ определяются базисной мощностью нагрузки и/или избыточной мощностью, отдаваемой в сеть. Мощность НЭЭ (АБ, ТЭ) определяется мощностью единичного генератора (СГ или АГ), который может выйти из строя. Запасенная в НЭЭ энергия должна обеспечить бесперебойное питание нагрузки в течение 1÷10 минут вплоть до запуска резервного генератора. Кроме того, НЭЭ может выравнивать колебания мощности на шинах нагрузки из-за фликкера ВЭУ, изменения освещенности ФЭУ, качаний мощности между нагрузкой и сетью в переходных режимах и др.

Резервный генератор СГ или АГ обычно запускается от баллона со сжатым воздухом или электро-стартера за интервал до 5 мин., что допускает применение АБ. При более длительном отключении генератора или его ремонте необходимо применение ТЭ.

НЭЭ и его преобразователь обычно выполняются в виде модулей. Мощность модуля НЭЭ, а также напряжение определяются массогабаритными показателями по условиям монтажа и транспортировки и составляет 200÷250 кВт, уровень номинального напряжения 0,7 кВ. Соответственно, мощность модуля преобразователя НЭЭ равна 200÷250 кВт и зависит от типа приборов СПП с учетом их принудительного воздушного охлаждения. Таким образом, НЭЭ и его преобразователь мощностью 1 МВт должен содержать 4÷5 модулей.

В зарубежной и отечественной практике наметилась тенденция выпуска унифицированного модуля преобразователя ас-дс мощностью 200÷250 кВт для применения с различными типами НЭЭ (АБ, ТЭ и ФЭУ). Определяющим для МЭК является мощность и характер нагрузки. Нагрузка мощностью 1 МВт характерна для узла связи или отдельного жилого района, мощность 10 МВт – для поселка. Нагрузка является пассивной и замещается $R-L-C$ эквивалентной цепью, причем значение сопротивления R определяется преимущественно мощностью потребителей для нужд освещения и нагрева, индуктивности L – мощностью технологических установок (моторы, насосы, приводы), емкости C – мощностью фильтров, кабелей. В течение суточного графика изменяются мощность и характер нагрузки, так что $\operatorname{tg} \varphi_n$, характеризуемый отношением реактивной Q_n и активной P_n мощностей нагрузки, может изменяться в диапазоне 0,1÷0,9. Среднестатистическое значение $\operatorname{tg} \varphi_n$ принимается равным 0,5.

Среднесуточный график нагрузки характеризуется базисной мощностью, покрываемой генераторами СГ (АГ) и, возможно, сетью, а также пиковой мощностью, покрываемой НЭЭ, ВЭУ, ФЭУ. Остальное

время вне пиковой нагрузки все источники заряжают НЭЭ.

Силовое оборудование МЭК должно быть максимально унифицировано с использованием преимущественно серийных аппаратов и установок, выпускаемых отечественной промышленностью. В первую очередь это касается генераторов ДГ и СГ, трансформаторов, шкафов распределительных устройств ~6(10) кВ, конденсаторов и фильтров, шкафов АБ, шкафов распределительных устройств (1 кВ), коммутационных и защитных устройств. К указанным типовым устройствам могут относиться и модули преобразователей на основе СПП для АБ, ТЭ и ФЭУ.

Сетевой преобразователь на основе электронно-лучевых вентилей (ЭЛВ) повышенной мощности до 4÷8 МВт относится к нестандартному оборудованию. ЭЛВ 50/100 производства ОАО «Контакт» (г. Саратов) имеет следующие преимущества: самозащитность, компактность, широкая полоса пропускания, а также облегчение кабелей за счет снижения тока при удалении МЭК.С от ВСЭ. Для этого ЭЛВ наряду с приборами нового класса должны быть разработаны сухие реакторы, шинопроводы, коммутационное оборудование на класс напряжения 35 кВ переменного тока, решены вопросы электромагнитной совместимости устройств различного типа, в том числе микропроцессорной техники.

Работа МЭК возможна лишь при наличии системы управления, регулирования и защиты (САУК), которая должна была быть разработана специально под специфический характер режимов МЭК: автономного, сетевого и/или комбинированного. САУК выполняется также из типовых элементов и включает в себя системы:

- измерений;
- синхронизации, синфазирования;
- регуляторов активной и реактивной мощностей;
- системы раздачи уставок по напряжению и мощности;
- системы защиты от перегрузок оборудования;
- реализации программ автоматического включения и отключения различных генераторов, источников и преобразователей.

В процессе исследования были осуществлены:

- разработка схем и компьютерное моделирование трех вышеуказанных типов МЭК;
- разработка технических требований к силовому оборудованию;
- выбор источников электроэнергии и выработка требований к САУК;
- разработка принципов и алгоритмов управления САУК.

На основе программного комплекса ЕМТР-АТР [11] были проведены исследования установившихся и переходных режимов для автономного, сетевого и комбинированного МЭК соответственно.

Исследование автономного МЭК показало, как изменяется структура нагрузки, определяемой $\operatorname{tg} \varphi_n = Q_n/P_n$, на уровень воздействия на оборудование.



Оценивалось влияние потерь относительно номинального значения 1 000 Гц при изменении частоты широтной импульсной модуляции (ШИМ) на энергетические показатели МЭК (коэффициент полезного действия (КПД), быстродействие и др.). Выбрана структура регуляторов мощности и напряжения, определен диапазон напряжения НЭЭ, в котором возможна устойчивая работа МЭК.

Исследования сетевого МЭК с применением ЭЛВ позволили оценить воздействие на силовое оборудование и выбрать вспомогательное оборудование (фазные реакторы, предвключенные резисторы выключателей и др.).

Исследования в схеме комбинированного МЭК помогли оценить в динамике взаимодействие сетевого МЭК с преобразователем (И1) и автономного МЭК с преобразователем (И2) при отключении СГ. При этом графики явлений мощности, напряжения и тока позволяют оценить наибольшие воздействия на оборудование как в установившихся, так и переходных режимах, сформулировать требования к системе автоматического управления комплексом САУК.

На рис. 3 приведена однолинейная схема замещения модели комбинированного МЭК [12].

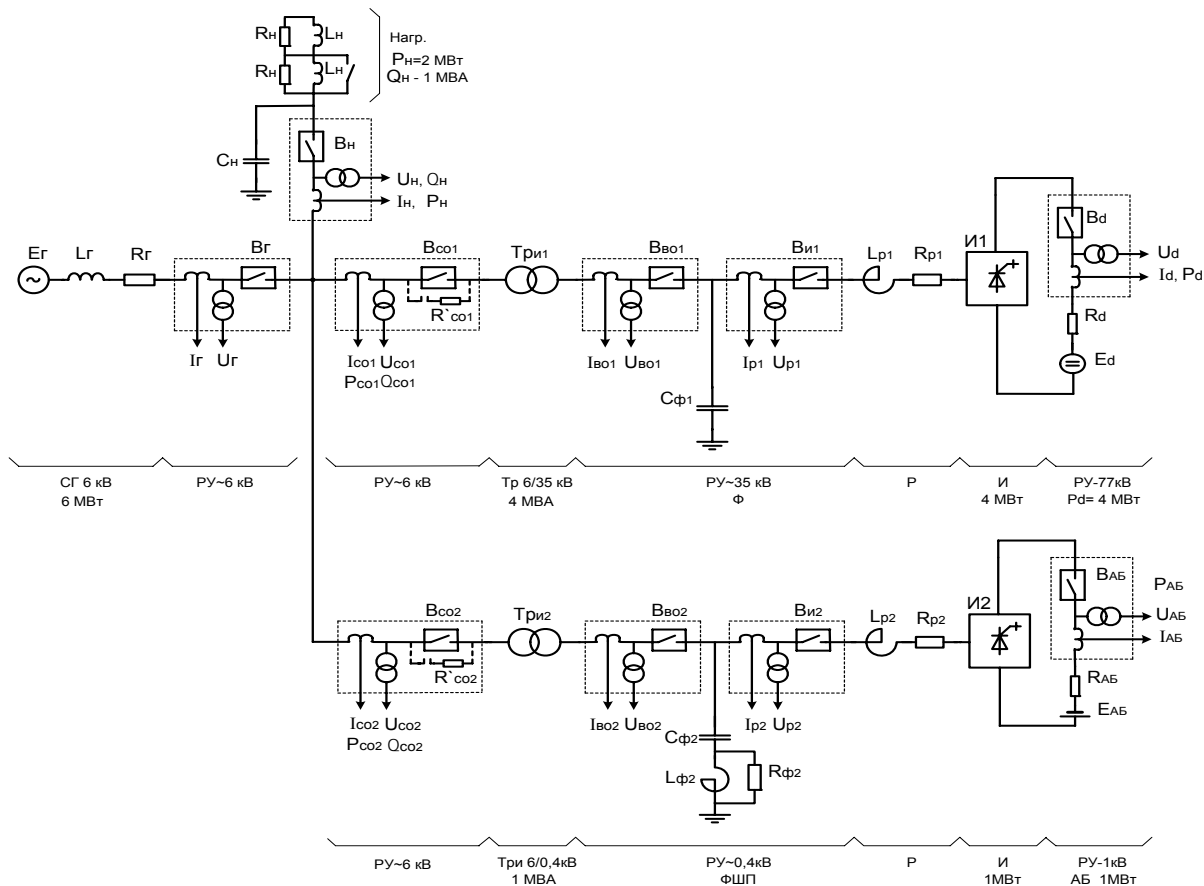


Рис. 3 – Однолинейная схема замещения модели комбинированного МЭК [12]
 Fig. 3 – Single-line equivalent circuit of combined IEC model [12]

Однолинейная схема замещения модели комбинированного МЭК, приведенная на рис. 3, содержит:

- один или более СГ напряжением 6 кВ и мощностью 6÷8 МВт;
- РУ ~6 кВ с одной секцией шин и четырьмя шкафами выключателей генератора Вг, нагрузки Вн, сетевой обмотки трансформатора Три₁-Всо₁, сетевой обмотки Три₂-Всо₂;
- приведенный к напряжению 6 кВ эквивалент нагрузки R_н-L_н-C_н активной мощностью P_н = 2 МВт и реактивной мощностью Q_н = 1 МВА;

- трансформатор сетевого инвертора Три₁ 6/35 кВ мощностью 4÷8 МВА;
- РУ ~35 кВ в составе двух шкафов с выключателями Вво₁ и Ви₁ соответственно (последний может отсутствовать);
- реактор индуктивностью L_{p1} = 50 мГ;
- фильтр высокой частоты (ВЧ) мощностью 420 кВА;
- 1÷2 трехфазных двухуровневых инвертора И1 на вентилях ЭЛВ 50/100 каждый мощностью 4 МВт и напряжением 77 кВ;

- распределительное устройство (РУ) = 77 кВ с выключателем Вd;
- выпрямитель на напряжение $U_d = 77$ кВ и мощность $P_d = 4$ МВт;
- трансформатор инвертора накопителя Три₂ 6/0,4 кВ мощностью 1 МВА;
- РУ ~0,4 кВ в составе двух шкафов с выключателями Вво₂ и Ви₂ соответственно (последний может быть заменен предохранителем);
- фильтр ВЧ мощностью 40 кВА;
- трехфазный двухуровневый инвертор И2 на приборах IGBT мощностью 1 МВт и напряжением 880 В;

- РУ = 1 кВ с выключателем В_{АБ};
- АБ мощностью 1 МВт и напряжением 880 В.
- Вместо АБ может использоваться батарея ТЭ и дополнительно батарея суперконденсаторов (СК) в случае значительного содержания насосов, двигателей, приводов в составе нагрузки.
- В состав комбинированного МЭК может быть дополнительно включена схема преобразователя ИЗ, содержащая АБ вместо ФЭУ, причем его мощность может варьироваться от 0,2 МВт до 1 МВт.
- На рис. 4 приведена блок-схема системы управления и регулирования САУК комбинированного преобразователя, которая соответствует схеме рис. 3.

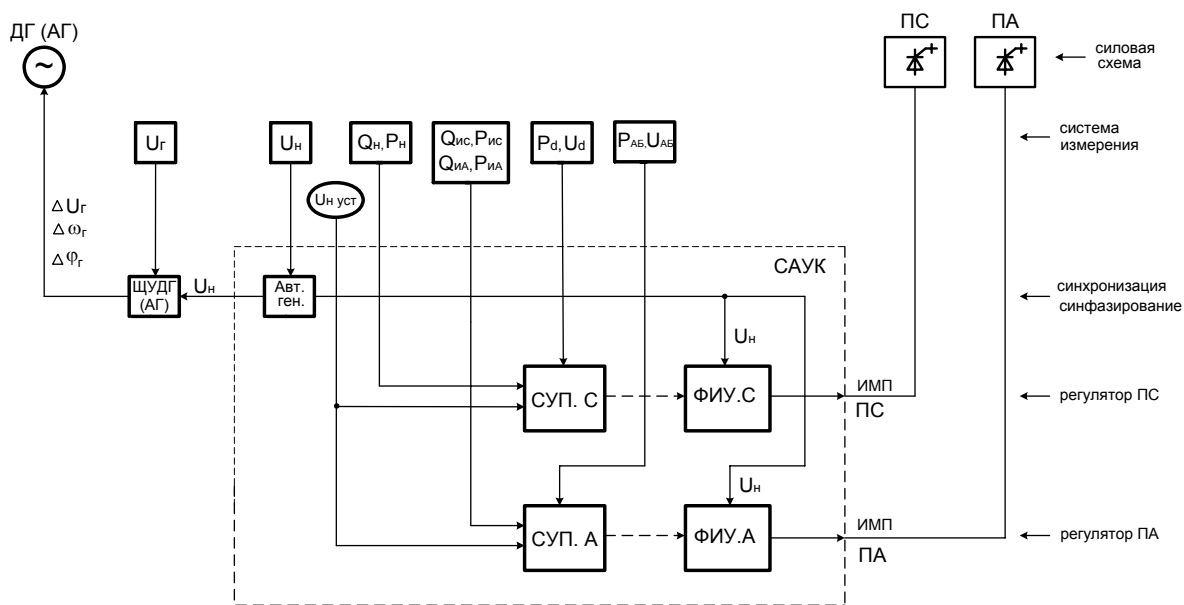


Рис. 4 – Блок-схема САУК комбинированного преобразователя [13]
 Fig. 4 – A block diagram of a control system and regulation (CSR) of the combined converter [13]

На схеме рис. 4 в верхней части приведены силовые элементы схемы рис. 3:

- ДГ или АГ ВЭУ;
- преобразователь сетевой (ПС) (И1), преобразователь автономный (ПА) (И2).

Может присутствовать также преобразователь ИЗ в случае применения ВЭУ или ФЭУ.

Ниже в квадратах и кружках показана система измерения и фильтрации.

САУК комбинированного МЭК представлена блок-схемой, обведенной пунктиром.

В САУК входит устройство синхронизации и синфазирования в виде автономного генератора (авт. ген.), задающего амплитуду, фазу и частоту для САУК и шита управления ДГ (ЩУДГ).

САУК также содержит блок-схемы систем управления преобразователей (СУП) и фазо-импульсные устройства (ФИУ) для преобразователей ПС и ПА соответственно. Структура и настройки САУК отражены в [13].

На графиках рис. 5a-d приведены переходные процессы в комбинированном МЭК ($\text{tg}\varphi_n = 0,5$), схема замещения которого показана на рис. 3.

В исходном состоянии СГ питает нагрузку; в момент 0,1 с включается сетевой преобразователь И1, в момент 0,3 с отключается СГ; в момент 0,6 с отключается И1 и включается автономный преобразователь И2. Обратный перевод питания нагрузки от преобразователя И1 осуществляется в момент 0,9 с и сопровождается предварительной подачей импульсов (1 с) на вентили И1 с последующей подачей уставок мощностей (1,2 с). Переходный процесс сопровождается взаимным мешающим влиянием регуляторов напряжения обоих преобразователей и колебательным процессом выравнивания напряжений на емкостях оборудования. Для исключения взаимного влияния регулятор напряжения И2 должен отключаться в момент включения И1.

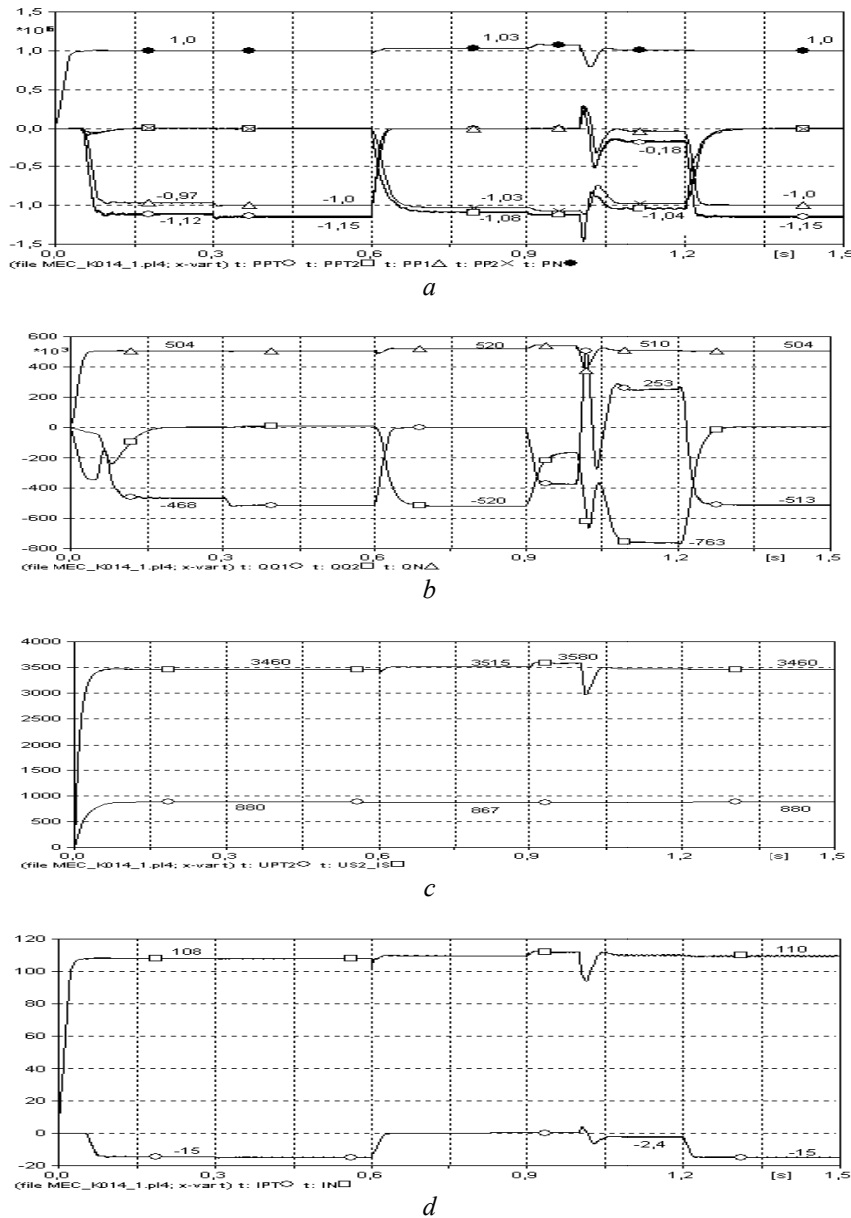


Рис. 5 – Переходные процессы в комбинированном МЭК:
 (tg φ_н = 0,5) *a*: ○ – P_d; □ – P_{АБ}; Δ – P_и со₁; × – P_и со₂; ● – P_н; *b*: ○ – Q_и со₁; □ – Q_и со₂; Δ Q_н;
c: ○ – U_{АБ}; □ – U_н; *d*: ○ – I_d; □ – I_н
Fig. 5 – Transients in combined IEC:
 (tg φ_н = 0,5) *a*: ○ – P_d; □ – P_{АБ}; Δ – P_и со₁; × – P_и со₂; ● – P_н; *b*: ○ – Q_и со₁; □ – Q_и со₂; Δ Q_н;
c: ○ – U_{АБ}; □ – U_н; *d*: ○ – I_d; □ – I_н

Активные мощности (рис. 5*a*) для нагрузки P_н = 1 МВт, для И1 P_d = 1,15 МВт, для И2 – P_{АБ} = 1,08 МВт. Реактивные мощности (рис. 5*b*) для нагрузки Q_н = 0,5 МВА, для преобразователей 0,5 МВА.

Анализ графиков (рис. 5*a,b*) показывает, что благодаря наличию НЭЭ в виде АБ (или ТЭ), нагруженного на преобразователь И2, полностью исключается перерыв энергоснабжения нагрузки при приемлемых отклонениях уровня напряжения.

На графиках (рис. 5*c,d*) соответственно приведены действующее напряжение нагрузки 3,58/3,48 кВ, а на шинах АБ напряжение, равное 880/867 В, и токи

нагрузки, равные 110 А и 15 А (соответственно для преобразователей И2 и И1).

Из графиков (рис. 5*c,d*) следует, что применение комбинированного МЭК благодаря наличию накопителя энергии в составе И2 удастся полностью исключить перерыв энергоснабжения на нагрузке как при отключении СГ (момент времени 0,3 с), так и в момент 0,9 с перевода питания от автономного инвертора И2 на сетевой инвертор И1. Предлагаемые схмотехнические решения по МЭК отражены в работах [12, 13].



В ходе работы:

– Исследовано взаимодействие существующих ДГ или предлагаемых микрогазовых турбин автономной электростанции объекта с многофункциональным энергетическим комплексом МЭК, содержащим автономный преобразователь на приборах СПП с АБ и СП на электронно-лучевых вентилях, стойких по отношению к электромагнитному импульсу.

– Сформулированы требования и структура системы автоматического управления комплекса САУК для бесперебойного энергоснабжения потребителей.

– Исследованы установившиеся и переходные режимы МЭК для определения воздействий на оборудование и систему САУК.

4. Водородная электроэнергетика

4.1. Разновидности водородной электроэнергетики

Водородная электроэнергетика (ВЭЭ) в значительной мере опирается на наработки профессора Т.Н. Везируглы (США) [14, 15] и использует совокупность водородных источников и накопителей, приведенных в [16, 17]. Следует отметить, что именно ВЭЭ является предпочтительной в условиях Арктики исходя из минимизации выбросов диоксида углерода, соединений серы и других загрязняющих веществ. На качественной структурной схеме безотходной водородной энергогенерации (рис. 6) показана циркуляция различных сред для получения и выработки электричества, тепла, воды и переработки твердых отходов.

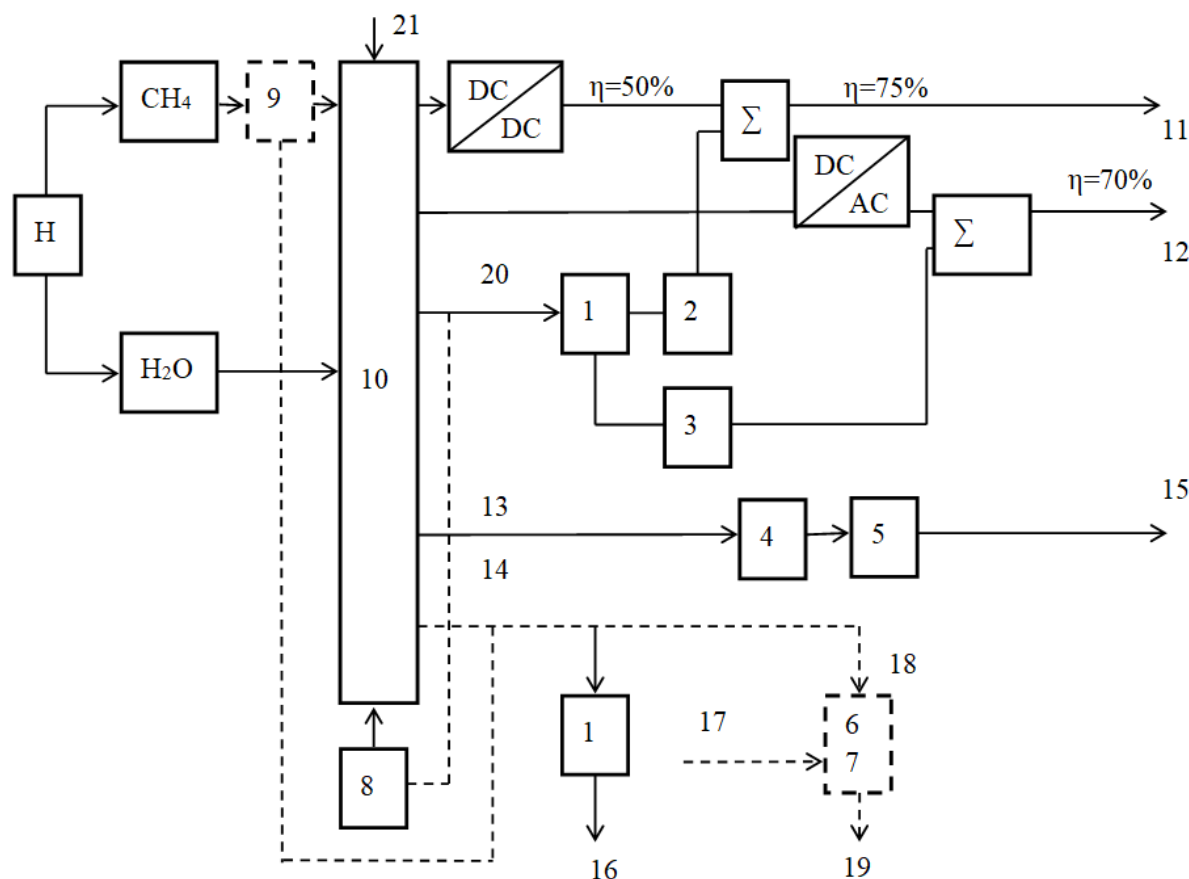


Рис. 6 – Структурная схема водородной энергогенерации, или безотходная водородная энергогенерация [4]: 1 – теплообменник; 2 – МДГ генератор; 3 – турбогенератор; 4 – минерализатор; 5 – озонатор; 6 – пиролиз; 7 – прокаливание; 8 – дожигатель; 9 – подогрев; 10 – твердооксидный топливный элемент ТОТЭ; DC/DC – преобразователь; DC/AC – инвертор; 11 – DC ток; 12 – AC ток; 13 – вода; 14 – тепло; 15 – питьевая вода; 16 – обогрев; 17 – отходы; 18 – переработка отходов; 19 – зола; 20 – дымовые газы; 21 – воздух

Fig. 6 – Block diagram of hydrogen power generation or waste-free hydrogen power generation [4]: 1 – heat exchanger; 2 – MHD generator; 3 – turbogenerator; 4 – mineralizer; 5 – ozonizer; 6 – pyrolysis; 7 – calcination; 8 – afterburner; 9 – heating; 10 – solid oxide fuel cell; DC / DC – converter; DC / AC – inverter; 11 – DC current; 12 – AC-current; 13 – water; 14 – heat; 15 – drinking water; 16 – heating; 17 – waste; 18 – processing of waste; 19 – ash; 20 – exhaust gases; 21 – air

Исходный неустойчивый атомарный водород в процессе создания углеводородов, например, метана CH_4 и воды H_2O , в элементах ТОТЭ вступает во

взаимодействие при нагреве до $500 \div 1\ 000\ ^\circ\text{C}$, получая на выходе электричество и тепло с минимумом уходящих газов, которые также используются для



подогрева исходного метана и воды и повышения КПД электрогенерации до 75 %, что недостижимо для тепловой электрогенерации. Согласно [4], на вход ТОТЭ поступают воздух, метан, вода (техническая), а на выходе вырабатывается постоянный электрический ток с КПД до 50 %, который с помощью теплообменника и МГД генератора суммируется с DC-током для повышения КПД до 75 %. Если необходимо получить AC-ток, то в канал уходящих газов к выходу ТОТЭ присоединяют турбогенератор (ТГ), который суммируется с AC-током инвертора для повышения КПД до 70 %. В результате получают электрический ток, пригодный для использования потребителем. Вода на выходе ТОТЭ, пройдя минерализатор МН и озонатор ОЗ, становится питьевой. Тепло на выходе ТОТЭ через теплообменник используется для обогрева помещений, а в случае необходимости – для переработки опасных и твердых отходов после того, как будет пропущен через пиролизную камеру при $500 \div 800$ °С, а затем с прокаливанием при $900 \div 1\,000$ °С и дожиганием дымовых газов при $1\,200 \div 1\,250$ °С. Например, присоединение к ТОТЭ гибридной установки термического обезвреживания осадков и отходов У-50К [18] со средней производительностью 47,5 кг/г, средним потреблением жидкого топлива 1,25 кг/г и потреблением электрической мощности 7 кВт позволяет получить на выходе $5 \div 10$ % безопасной золы 4 класса.

Наиболее прогрессивными в техническом и коммерческом отношении являются ТОТЭ и ТПМТЭ, обладающие высоким КПД ($50 \div 75$ %), высокой наработкой от 40 тыс. час. до 80 тыс. час., приемлемой удельной стоимостью, в настоящее время уже до 250 долл./кг.

4.2. Мобильные комплексы энерго- и жизнеобеспечения

Мобильные комплексы энерго- и жизнеобеспечения с применением водородных ТЭ, а в общем случае накопителей электроэнергии (НЭЭ) и кабельных сетей постоянного тока напряжением $6 \div 10$ кВ и мощностью $10 \div 20$ МВт частично описаны в [19, 20] в виде МСПТ. Создание МСПТ различной мощности, включая многоподстанционные сети постоянного тока, является мировой проблемой, которая, например, освещается в работе [21]. Малонадежная прокладка опор ВЛ в условиях вечной мерзлоты показывает необходимость поиска новых вариантов энергообеспечения Арктики с учетом тиражирования проектов для их окупаемости, а также комплексного обеспечения потребностей электричества, тепла (холода), водоподготовки, воздухоподготовки (по потребностям), связи, освещения, охраны и др. Такие новые направления предлагает ВЭИ-филиал «РФЯЦ-ВНИИТФ», г. Москва: микро- и минисети постоянного тока мощностью $1 \div 30$ МВт. Базовым энергомо-

дулем для МСПТ является либо надводный водородный энергомодуль ВЭМ, либо подводный модуль АСММ с управляемым выпрямителем, соединенным подводным кабелем с центральным модулем преобразования, накопления и распределения электроэнергии, который в свою очередь питает вспомогательные модули водо- и воздухоподготовки и др., размещаемые на суше непосредственно у потребителей. Главным атрибутом обоих проектов является ТЭ (НЭЭ) мощностью от 10 % до 30 % от мощности нагрузки для обеспечения надежной работы потребителей в случае аварии или замены ВЭМ или АСММ, отсутствия питания от ВИЭ и др. Структурная схема МСПТ приведена на рис. 7.

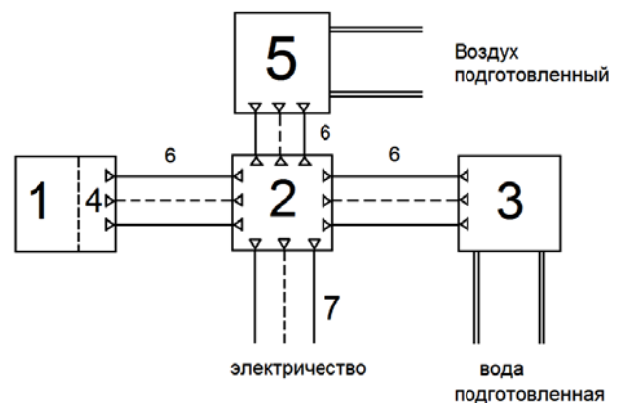


Рис. 7 – Структурная схема МСПТ:

- 1 – ВЭМ или атомный энергетический модуль с турбогенератором (подводный) на основе АСММ;
- 2 – модуль преобразования, накопления и распределения электроэнергии;
- 3 – модуль водоподготовки;
- 4 – управляемый выпрямитель;
- 5 – модуль воздухоподготовки;
- 6 – биполярный кабель постоянного тока;
- 7 – трехфазный кабель переменного тока или биполярный кабель постоянного тока

Fig. 7 – Block diagram of MSDS:

- 1 – hydrogen module VEM or nuclear power module with turbogenerator (underwater) based on ASM;
- 2 – module of conversion, accumulation and distribution of electricity;
- 3 – water treatment module;
- 4 – controlled rectifier;
- 5 – air treatment module;
- 6 – bipolar DC cable;
- 7 – three-phase AC cable or bipolar DC cable

ВЭМ может быть плавучим, подводным, а в ряде случаев и сухопутным при стационарном исполнении. Управляемый выпрямитель 4 входит в состав модуля 1, который удален от суши на $1 \div 5$ км и связан с наземными модулями 2, 3, 5 и другим биполярным подводным кабелем и оптоволоконном 6. Другие наземные биполярные кабели постоянного тока размещаются на суше непосредственно у потребителей. Дополнительно к указанным модулям необходимо предусмотреть модули и системы для производства работ, освещения в условиях полярной ночи, сигнализации и охраны зоны. Комплекс МСПТ может быть стационарным и мобильным. Модули должны быть необслуживаемыми и иметь свои подсистемы собственных нужд для обеспечения климат-контроля, телеуправления, связи с диспетчерским

пунктом, от которого передаются уставки мощности и тока в первую очередь на модули 1, 2. Модуль водоподготовки 3 в условиях Арктики использует технологию плавления снега или вымораживания, а для южных регионов – технологию выпаривания, причем получение питьевой воды дополняется минерализацией и озонированием. Для спецобъектов предусматривается применение модуля 5 воздухоподготовки. При любом варианте планируется заводское изготовление модулей, причем комплекс должен обеспечивать все нужды вахты, поселка, гарнизона в части электричества, тепла (холода), воды, воздуха (при необходимости), освещения, связи и других нужд.

Применение биполярных кабелей постоянного тока обусловлено их повышенной надежностью, меньшими потерями, использованием ТЭ и НЭЭ только на постоянном токе. Реализация модулей МСПТ показана в [22, 23].

Важнейшим параметром источников и НЭЭ является их надежность, энергоэффективность, определяемая электрическим КПД, удельной мощностью, электрической емкостью и, конечно, стоимостью [24, 25]. Электрический КПД ТЭ достигает $50 \div 75$ %, в то время как АСММ – примерно 30 %, удельная мощность ТЭ на сегодня достигает около 200 Вт/кг (для традиционных источников в виде газовых турбин до 1 000 Вт/кг), удельная энергоемкость ТЭ пока не превышает 200 Вт·ч/кг. Удельная стоимость как во-

дородных, так и остальных НЭЭ приближается к отметке 250 долл./кВт·ч (для литий-ионных аккумуляторов (ЛИА)). ЛИА являются наиболее развитыми НЭЭ благодаря широкому внедрению на транспорте. Однако для энергоснабжения более предпочтительными в части электрической емкости и длительности работы являются натрий-сернистые АБ и проточные ванадиевые редокс-батареи, которые имеют удельную энергоемкость от 3 до 5 раз выше, чем ЛИА, а также срок службы в $1,5 \div 2$ раза больше, чем ЛИА [26].

Применение ТЭ и остальных НЭЭ вместе с преобразователями напряжения, а в МСПТ и без них, приводит к кардинальному пересмотру идеи формирования локальных сетей, особенно с применением ВИЭ. Для Арктики особенно важно, когда традиционный источник, например, ДГ, ВЭМ или АСММ вместо базисного становится резервным и меньшей мощности, чем в традиционных проектах. На рис. 8 приведена структура локальной микросети на переменном токе, где наряду с ДГ малой мощности установлен накопитель в виде ВЭМ с ТОТЭ или аккумуляторной батареей АБ, подстанцией ПС и инвертором с контроллером микросети. Для микросети на постоянном токе МСПТ (см. рис. 7) вместо инвертора используется управляемый выпрямитель 4, а вместо подстанции – распределительный модуль 2, что существенно упрощает микросеть, повышает ее надежность и снижает стоимость, ликвидируя дополнительные преобразования электричества [27].

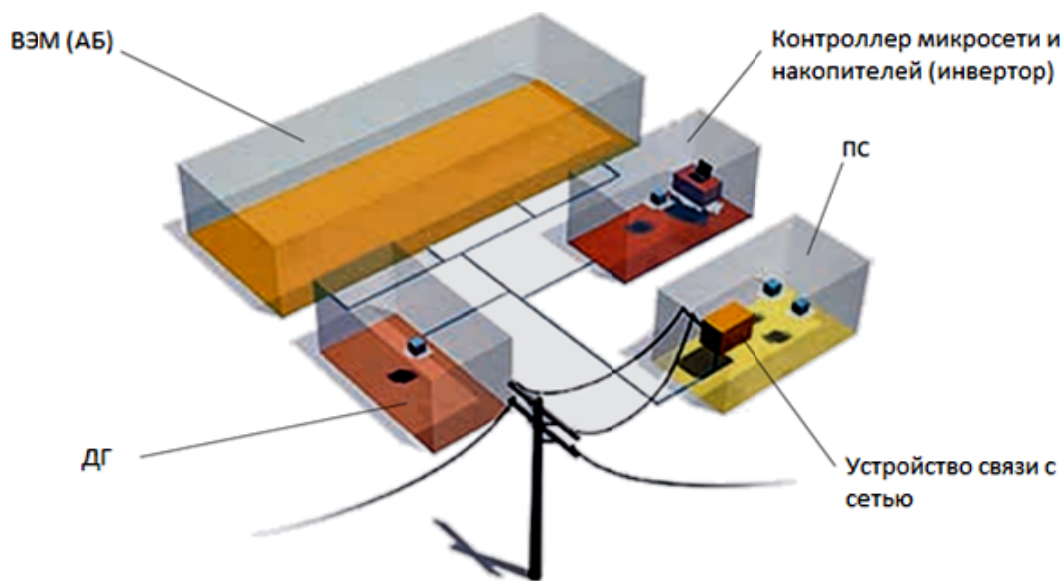


Рис. 8 – Схематическая структура локальной микросети на переменном токе с накопителем ВЭМ (АБ); ДГ – дизель-генератор; ПС – подстанция, контроллер микросети и накопителей, устройство связи с сетью
Fig. 8 – Schematic local structure of the micronetwork of alternating current with “ВЭМ (АБ)” – hydrogen power module (accumulator battery); “ДГ” – diesel generator; “ПС” – substation, the controller of a micronetwork and drives, the device of communication with a network

Следует отметить, что важнейшими для Арктики являются минимальные показатели выброса диоксида углерода, по которому лидируют ВЭМ (ТОТЭ), затем АСММ, а после них остальные НЭЭ. ТОТЭ

может обеспечить безотходную электрогенерацию, а с модулями К-50 [18] или им подобными возможно утилизировать любые посторонние отходы. Электрохимические НЭЭ трудно утилизировать, особен-

но ЛИА. Технология утилизации АСММ, так же как твердых и жидких радиоактивных отходов, до сих пор не разработана в полном объеме и предполагает специализированную разделку и утилизацию.

Себестоимость электроснабжения отдаленных регионов Арктики на материке может достигать 20 руб./кВт·ч, на островах – до 200 руб./кВт·ч, в то время как при централизованном электроснабжении на материке – порядка 5 руб./кВт·ч, а в сельской местности – более 7 руб./кВт·ч [6]. Высокая стоимость электроснабжения вызвана отсутствием логистики в Арктике, поэтому применение АСММ и ВЭМ позволят, несмотря на высокие капитальные затраты, обеспечить значительное сокращение эксплуатационных затрат и минимизировать экологический ущерб. Дальность перевозки на одном кг энергоносителя, которым является водород, в 3 раза больше, чем на одном кг бензина (21 км и 6,6 км соответственно) [28].

Применение мобильных модульных комплексов энергоснабжения позволит снизить стоимость затрат на 20÷30 %, повысить экологические показатели за счет утилизации выброса газов и комплексно использовать ресурсы.

5. Заключение

Наиболее целесообразным способом комплексного освоения Арктики является разработка и применение мобильных модульных устройств энергоснабжения с использованием АСММ и ВЭМ, что позволит снизить стоимость таких устройств на 20÷30 % сравнительно со стационарными установками. Отказ от завоза топлива позволит существенно снизить эксплуатационные расходы и улучшить экологию.

Исследования на математической модели подтвердили возможность организации бесперебойного энергоснабжения за счет применения накопителя электроэнергии и выбора алгоритма систем управления преобразователей и накопителя.

Прямая электрогенерация с помощью СПГ и ВЭМ позволяет повысить электрический КПД до 70÷75 % вместо 30÷40 % при сжигании топлива в ДВС, а также практически исключить выброс дымовых газов в атмосферу.

Использование технологии постоянного тока в мобильных модульных комплексах энерго- и жизнеобеспечения в сочетании с накопителями электроэнергии позволяет снизить эксплуатационные затраты на выработку и передачу электроэнергии, минимизировать загрязнение окружающей природной среды и комплексно использовать ресурсы сравнительно с затратными стационарными объектами, тем более в условиях вечной мерзлоты.

Список литературы

[1] «СОНАР-2050». Союзная энергетика: Малая энергетика для Арктики [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.sonar2050.org/publications/malaya-energetika-dlya-bolshoy-arktiki-pochemu-rf-i-rb-doljny-delat-malyeae-vmeste/> – (Дата обращения: 16.02.2019).

[2] Об утверждении основ государственной политики регионального развития Российской Федерации на период до 2025 г.: указ Президента РФ от 16 января 2017 г. №13 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://constitution.garant.ru/act/federative/71587690/> – (Дата обращения: 12.03.2019).

[3] О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2014 г. № 366: постановление Правительства Российской Федерации от 31 августа 2017 г. № 1064 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://government.ru/docs/all/113146/> – (Дата обращения: 14.02.2019).

[4] Шульга, Р.Н. Мультиагентные системы постоянного тока с использованием ВИЭ и водородных топливных элементов / Р.Н. Шульга, И.В. Путилова // Международный научный журнал «Альтернативная электроэнергетика и экология» (ISJAEЕ). – 2019. – № 2. – С. 65–82.

[5] Мобильный модульный комплекс жизнеобеспечения. Шульга Р.Н., Стальков П.М., Кокуркин М.П., Лавринович В.А. Заявка в Роспатент № 2019101084 от 10.01.2019.

[6] Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики: Т. 2 / под ред. акад. РАН А. А. Саркисова. – М.: Академ-Принт, 2015. – 387 с.: ил. — ISBN 978-5-906324-04-7 (в пер.).

[7] Проект «Приразломное»: Освоение Приразломного месторождения – первый проект добычи нефти на арктическом шельфе, реализованный в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gazprom-neft.ru/company/business/exploration-and-production/new-projects/prirazlomnoe/index.php> – (Дата обращения: 16.02.2019)

[8] «Росатом» пускает в плаву плавучую атомную теплоэлектростанцию ПАТЭС «Академик Ломоносов» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://goroda-rosatoma.ru/pates> – (Дата обращения: 16.02.2019).

[9] Шульга, Р.Н. К вопросу о возможности создания гибридной энергораспределительной сети ГЭРС с накоплением электроэнергии / Р.Н. Шульга // Новое в Российской электроэнергетике. – 2015. – № 12. – С. 29–44.

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

[11] ATP Rule Book. – Leuven EMTP Center, 1992. – P. 247.

[12] Патент RU 95434U1, МПК: H02j3/28, G05F1/66/ Многофункциональный энергетический комплекс / Шульга Р.Н., Переводчиков В.И., Щербаков А.В., Розанов Ю.К., Матвеев Н.В., Шульга А.Р., патентообладатель Минпромторг РФ; Заявка от 03.11.2009, опубликован 27.06.2010.



[13] Патент RU 2432659, МПК: H02j3/28, G05F1/70/ Система автоматического управления комплексом / Шульга Р.Н., Переводчиков В.И., Щербаков А.В., Розанов Ю.К., Матвеев Н.В., Шульга А.Р., патентообладатель Минпромторг РФ; Заявка от 03.11.2009, опубликован 27.10.2011

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

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

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

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

[18] Термическое обезвреживание отходов по гибридной технологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://enviro.su/tech/termicheskoe-obezvrezhivanie-othodov/> – (Дата обращения: 16.02.2019).

[19] Шульга, Р.Н. Распределенная генерация с использованием ВИЭ в составе мультиагентных систем постоянного тока / Р.Н. Шульга // Энергосбережение и водоподготовка. – 2017. – № 5 (109). – С. 58–68.

[20] Сулова, О.В. Техничко-экономические характеристики электропередач и вставок постоянного тока / О.В. Сулова, Р.Н. Шульга // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2017. – № 76. – С. 125–139.

[21] Шульга, Р.Н. Контейнерные подстанции среднего напряжения / Р.Н. Шульга // Новости электротехники. – 2018. – № 2 (110). – С. 16–20.

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

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

[24] Аналитический обзор. Твердооксидные топливные элементы: проблемы, пути решения, перспективы развития и коммерциализации. – М. 2017. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.extech.ru/files/anr_2015/anr_8.pdf – (Дата обращения: 16.02.2019).

[25] Савицкий, А.А. Редокс-батареи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bsu.by/Cache/pdf/524693.pdf> – (Дата обращения: 16.02.2019).

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

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

[28] Кутенев, В.Ф. Некоторые вопросы создания экологически чистого транспортного средства с криогенной силовой установкой / В.Ф. Кутенев [и др.] // Труды МАМИ. – С. 152–159; Режим доступа: <http://mospolytech.ru>

References

[1] “SONAR-2050”. Union energy: Small energy for the Arctic (Soyuznaya energetika: Malaya energetika dlya Arktiki) [E-resource]. Available on: <https://www.sonar2050.org/publications/malaya-energetika-dlya-bolshoy-arktiki-pochemu-rf-i-rb-doljny-delat-malye-aes-vmeste/> (02.16.2019).

[2] Approving the fundamentals of state policy of regional development of the Russian Federation for the period till 2025: the decree of the President of the Russian Federation of 16 January 2017. No. 13 (Ob utverzhenii osnov gosudarstvennoi politiki regional'nogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2025 g.: ukaz Prezidenta RF ot 16 yanvarya 2017 g. no. 1) [E-resource]. Available on: <http://constitution.garant.ru/act/federative/71587690/> (03.12.2019).

[3] About modification of the order of the Government of the Russian Federation of April 21, 2014 No. 366: the order of the Government of the Russian Federation of August 31, 2017 No. 1064 (O vnesenii izmenenii v postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 21 aprelya 2014 g. no. 366: postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 31 avgusta 2017 g. no. 1064) [E-resource]. Available on: <http://government.ru/docs/all/113146/> (02.14.2019).

[4] Shulga R.N., Putilova I.V., DC multi-Agent systems using RES and hydrogen fuel cells (Mul'tiagentnye sistemy postoyannogo toka s ispol'zovaniem VIE i vodorodnykh toplivnykh elementov). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecologia* (ISJAEE), 2019;2:65–82 (in Russ.).

[5] Shul'ga R. N., Starkov P.M., Kokurin M.P., Lavrinovich V.A. Mobile modular complex life support (Mobil'nyi modul'nyi kompleks zhizneobespecheniya). Application in Rospatent no. 2019101084 10.01.2019. (in Russ.).

[6] Nuclear power plants of low power: a new direction of energy development (Atomnye stantsii maloi moshchnosti: novoe napravlenie razvitiya energetiki): Vol. 2 / Ed. Acad. RAS A.A. Sarkisov. Moscow: Academic-Print, 2015; 387 p.



[7] Prirazlomnoye Project: Development of the Prirazlomnoye field is the first oil production project on the Arctic shelf implemented in Russia (Proekt "Prirazlomnoe": Osvoenie Prirazlomnogo mestorozhdeniya – pervyi proekt dobychi nefi na arkticheskom shel'fe, realizovannyi v Rossii) [E-resource]. Available on: <https://www.gazprom-neft.ru/company/business/exploration-and-production/new-projects/prirazlomnoe/index.php> (03.04.2019) (in Russ.).

[8] Rosatom starts floating nuclear power plant "Akademik Lomonosov" (Rosatom puskaet vplav' plavuchuyu atomnyu teploelektrostantsiyu PATES "Akademik Lomonosov") [E-resource]. Available on: <http://goroda-rosatoma.ru/pates> (02.16.2019) (in Russ.).

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

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

[11] ATP Rule Book. Leuven EMTP Center, 1992; p. 247.

[12] Shulga R.N., Perevodchikov V.I., Shcherbakov, A.V., Rozanov, Y.K., Matveev N.V., Shulga A.R. Multifunctional energy complex (Mnogofunktsional'nyi energeticheskii kompleks). Patent RU 95434U1, IPC: H02j3/28, G05F1/66/, patent owner – Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation; date of application 11.03.2009, published 06.27.2010 (in Russ.).

[13] Shulga R.N., Perevodchikov V.I., Shcherbakov A.V., Rozanov Y.K., Matveev N.V. Shulga A.R. Complex automatic control system. Patent RU 2432659, IPC: H02j3/28, G05F1/70/, patent owner – Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation; date of application 11.03.2009, published 10.27.2011 (in Russ.).

[14] Veziroglu T.N. Energy system based on nuclear fusion of hydrogen (Energeticheskaya sistema na osnove termoyadernogo sinteza vodoroda). *International Scientific Journal for Alternative energy and ecology (ISJAE)*, 2017;16–18:16–29; (in Russ.).

[15] Bokris J.O'M., Veziroglu T.N., Smith D. Solar hydrogen energy. The power to save the world. – Moscow: Publishing house of MEI, 2002; 164 p.

[16] Solomin E.V. *et al.* Wind-hydrogen standalone uninterrupted power supply plant for all-climate application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019;44(7):3433–3449; [17] Solomin E.V. *et al.* Use of wind-hydrogen complex of uninterrupted power supply in different climatic conditions (Ispol'zovaniye vetrovodorodnogo kompleksa bespereboynogo energosnabzheniya v razlichnykh klimaticheskikh usloviyakh). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2018;(13–15):30–54; (in Russ.).

[18] Thermal waste disposal by hybrid technology (Termicheskoe obezvrezhivanie otkhodov po gibridnoi tekhnologii) [E-resource]. Available on: <https://enviro.su/tech/termicheskoe-obezvrezhivanie-otkhodov/> (02.16.2019) (in Russ.).

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

[20] Suslova O.V., Shulga R.N. Technical and economic characteristics of power and VST-vok DC (Tekhniko-ekonomicheskie kharakteristiki elektroperedach i vstavok postoyannogo toka). *Proceedings of the STC of the Unified Energy System*, St. Petersburg, 2017, no. 76, pp. 125–139 (in Russ.).

[21] Shulga R.N. Container substations of medium voltage (Konteinernyye podstantsii srednego napryazheniya). *Electrotech. News*, 2018;2(110):16–20 (in Russ.).

[22] Shulga R.N. The appearance of an electricity storage device based on lithium-ion batteries of megawatt power class (Oblik nakopitelya elektroenergii na osnove lityi-ionnykh akkumulyatorov megavattnogo klassa moshchnosti). *Electro*, 2017;(6):38–44 (in Russ.).

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

[24] Analytical review. Solid oxide fuel cells: problems, solutions, prospects for development and commercialization (Tverdooksidnye toplivnye elementy: problema, puti resheniya, perspektivy razvitiya i kommertsializatsii). Moscow, 2017 [E-resource]. Available on: http://www.extech.ru/files/anr_2015/anr_8.pdf (02.16.2019) (in Russ.).

[25] Savitsky A.A. Redox batteries (Redoks-batarei). Available on: <https://www.bsu.by/Cache/pdf/524693.pdf> (02.16.2019) (in Russ.).

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

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

[28] Koutenev V.F., Makarov R.A., Burikov V.S., Burikov I.V., Burikov Y.V. Some issues of creating environmentally friendly vehicles with cryogenic power plant (Nekotoryye voprosy sozdaniya ekologicheskhi chistogo transportnogo sredstva s kriogennoi silovoi ustanovkoi). *Works of MAMI*, pp. 152–159. Available on: <http://mospolytech.ru> (in Russ.).

Транслитерация по BSI

