

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ МОДУЛЬНЫХ ПОДСТАНЦИЙ И ЭНЕРГОБЛОКОВ ДЛЯ АРКТИКИ

Р.Н. Шульга¹, А.Ю. Петров¹, А.Ю. Хренников²

¹ ВЭИ-филиал ФГУП «РФЯЦ ВНИИТФ», г. Москва, Россия

² АО «НТЦ ФСК ЕЭС», г. Москва, Россия

✉ rnshulga@vei.ru, ak2390@inbox.ru

Представлено описание энергетических платформ в виде системы автономного энергоснабжения (САЭ) с использованием цифровых модульных подстанций (ЦМП) и энергоблоков для Арктики. Приведены образцы электротехнического оборудования, применяемого для реализации указанных подстанций. Рассмотрены два направления реализации: ЦМП **AC** на переменном токе и ЦМП **DC** на постоянном токе. В части ЦМП **AC** описана структура по протоколу IEC 61850, приведены образцы цифровых датчиков тока и напряжения, комплектных распределительных устройств, контейнеров статических компенсаторов. В части ЦМП **DC** приведена структура, описаны статические преобразователи, накопители электроэнергии водородного и электрохимического типов. Рассмотрены области применения обеих типов подстанций и отмечены преимущества реализации ЦМП **DC** для обеспечения надежного энергоснабжения в условиях природных и техногенных аварий.

Ключевые слова: энергетическая платформа; цифровая модульная подстанция; переменный ток; постоянный ток.

ENERGY PLATFORMS USING DIGITAL MODULAR SUBSTATIONS AND POWER UNITS FOR ARCTIC

R.N. Shulga¹, A.Yu. Petrov¹, A.Yu. Khrennikov²

¹ VEI-branch of FSUE RFNC VNIITF, Moscow, Russia

² S&R Centre of FGC UES, Moscow, Russia

The description of energy platforms in the form of SAE using digital modular substations and power units is presented. Samples of electrical equipment used for the implementation of these substations are given. Two directions of implementation are considered: CMP as AC and DC CMP in DC. The part of the DSM as describes the structure according to the IEC 61850 Protocol, samples of digital current and voltage sensors, complete switchgears, containers of static compensators are given. In the part of the DC CMC, the structure is given, static converters, and electric power storage devices of hydrogen and electrochemical types are described. The scope of application of both types of substations is considered and the advantages of implementing DC CMC for providing reliable power supply in the conditions of natural and man-made accidents are noted.

Keywords: energy platform; digital modular substation; alternating current; direct current.

Статья получена: 15.09.2020

Принята к публикации: 05.10.2020

Опубликована онлайн: 07.10.2020

Электроэнергетика России и мира, хотя и является наиболее консервативной и одной из старейших отраслей промышленности, переживает существенные изменения, связанные с использованием не только новых технологий, но и идеологий построения и развития, объединяя традиционную (ТЭС, ГТЭС, ГПЭС) и нетрадиционную энергетику (ВИЭ, АЭС, АСММ и др.) в составе централизованных и локальных энергосетей [1, 2], переходя от автоматизации в виде АСУТП к цифровизации, а затем к нейронным сетям [3], от стационарных к модульным (контейнерным) подстанциям в виде цифровых подстанций и электростанций [4]. Нетрадиционная энергетика, несмотря на определенные ограничения по надежности, стоимости, землеотводу, позволяет отчасти ограничить риск потепления на планете. Цифровизация должна облегчить трудозатраты, заменить человека на рабочем месте искусственным интеллектом, повысить надежность, ликвидировав ошибки персонала, недопустимые особенно в энергетике и на других ответственных производствах. Модульность любых объектов, причем и конструктивная, и технологическая, и функциональная, становится приоритетной в части не только снижения затрат, но и создания унифицированных блоков энергосистемы, которые могут придать ей новые качества.

Например, прогресс силовой электроники в конце XX в. привел к созданию FACTS – гибких электропередач переменного тока, которые, пусть и немного, но повысили управляемость и устойчивость электросетей [4]. Функциональные модули в виде накопителей электроэнергии (НЭЭ) являются основой применения ВИЭ, наряду с традиционными базисными источниками электроэнергии. Конструктивная модульность блоков позволяет существенно удешевить и ускорить строительство и ввод в эксплуатацию энергоблоков (до 20%) [5], а также унифицировать конструктивно-техниче-

ские решения на этапах разработки, проектирования и эксплуатации с использованием цифровых двойников любого изделия и комплекса. Например, применение функциональных модулей дает возможность унифицировать и стандартизировать любую разработку путем формирования цифровых двойников. Это хорошо согласуется с созданием боевых наземных, воздушных, надводных и других платформ с разного рода функциональными модулями.

Энергетической платформой для автономной и распределенной энергетики является система автономного энергоснабжения (САЭ), а функциональными модулями – источники генерации (энергоблоки) и подстанции либо их разновидности в виде отдельных устройств контейнерного (заводского) исполнения. САЭ предполагают любую степень базирования и связь между собой силовыми воздушными (ВЛ), кабельными линиями (КЛ), а также сигнальными и/или оптоволоконными линиями для управления, защиты, автоматики, мониторинга и др.

Цель настоящей статьи состоит в формировании облика САЭ в составе цифровых модульных подстанций переменного (ЦМП **AC**) и постоянного тока (ЦМП **DC**), а также энергоблоков с традиционными и возобновляемыми источниками для Арктики. Структура САЭ и виды оборудования приведены на рис. 1 и касаются в основном мощностей до 10–100 МВт напряжением до 10–100 кВ, т.е. малой и распределенной энергетики. Если традиционные и возобновляемые источники достаточно подробно описаны в литературе, то ЦМП **AC**, и особенно ЦМП **DC** недостаточно освещены.

Преимущества и недостатки ЦМП **AC** и ЦМП **DC** приведены на рис. 2. Они широко описаны в литературе [см., напр., 6] и отражают мировую тенденцию возврата к построению сетей постоянного тока (см. материалы последних сессий CIGRE, статью В.М. Перминова, М.Г. Тягунова [1] и доклад Н.Д. Роголёва, В.В. Молодюка [2]).



Рисунок 1 – Структура САЭ с использованием источников, ЦМП АС и ЦМП DC для Арктики
 Обозначения: АС – переменный ток; ДГУ – дизель-генераторное устройство;
 ГТУ – газотурбинное устройство; ГПУ – газопоршневое устройство;
 АСММ – атомная станция малой мощности; DC – постоянный ток; ТР – трансформатор;
 КРУ – комплектное распределительное устройство;
 ЦДТН – цифровой датчик тока и напряжения; РЗА – релейная защита и автоматика;
 СТК – статический тиристорный компенсатор; ВЭУ – ветровая электроустановка;
 ФЭУ – фотоэлектрическая установка; В, И – выпрямитель, инвертор;
 НЭЭ – накопители электроэнергии;
 С, СК – конденсатор, суперконденсатор; АБ – аккумуляторная батарея;
 ЛИА – литий-ионный аккумулятор; ТЭ – топливный элемент;
 САУК – система автоматического управления комплекса;
 ЛО, КО – лазерное и кинетическое оружие.



Рисунок 2 – Преимущества и недостатки ЦМП АС и ЦМП DC
 Обозначения: см. рис. 1.

Задачи настоящей статьи показаны на рис. 3, причем первый пункт касается наработок ВЭИ в части САЭ, второй пункт – реализации типичного одного присоединения комплектного распределительного устройства (КРУ) к шине процесса по IEC 61850. Второй пункт связан с измерением, управлением и передачей сигналов на шину станции, последующие пункты отражают реализацию наработок ВЭИ и других организаций относительно ЦМП DC контейнерного исполнения, включая преобразователи тока, напряжения, частоты, НЭЭ водородного и электрохимического типа. Из-за ограниченного объема статьи наработки по выключателям постоянного тока, системам управления и другим элементам САЭ не представлены.

ЦМП AC

ЦМП AC базируются на внедренной в практику ОАО «Россети» концепции «Цифровая подстанция» [7], учитывающей стандарты IEC 61850, smart-технологии, ГОСТы, РД, СТО, приказы и руководящие документы РАО «ЕЭС России» и АО «ФСК ЕЭС». За прошедшее десятилетие

указанная концепция внедрена на многих подстанциях и станциях РФ и за рубежом, претерпела ряд трансформаций [8, 9] и продолжает изменяться в части резервирования, применения устройств FACTS, НЭЭ, интеллектуальных устройств LED и др. Наиболее перспективным направлением цифровизации представляется замена устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) на компьютерное программное обеспечение (ПО). Например, ПО с использованием ПК, разработано в НГТУ им. Р.Е. Алексеева, однако, требования надежности, безопасности, резервирования пока ограничивают реализацию подобного подхода.

На рисунке 4 приведена архитектура шин по протоколу IEC 61850 для одного присоединения с применением традиционных датчиков тока и напряжения, электромагнитного типа [8], использующих преобразователи тока и напряжения (соответственно ПТ, ПН), объединяющие устройства измерения и команд (соответственно ОУИ и ОУК) для управления работой выключателя (В).

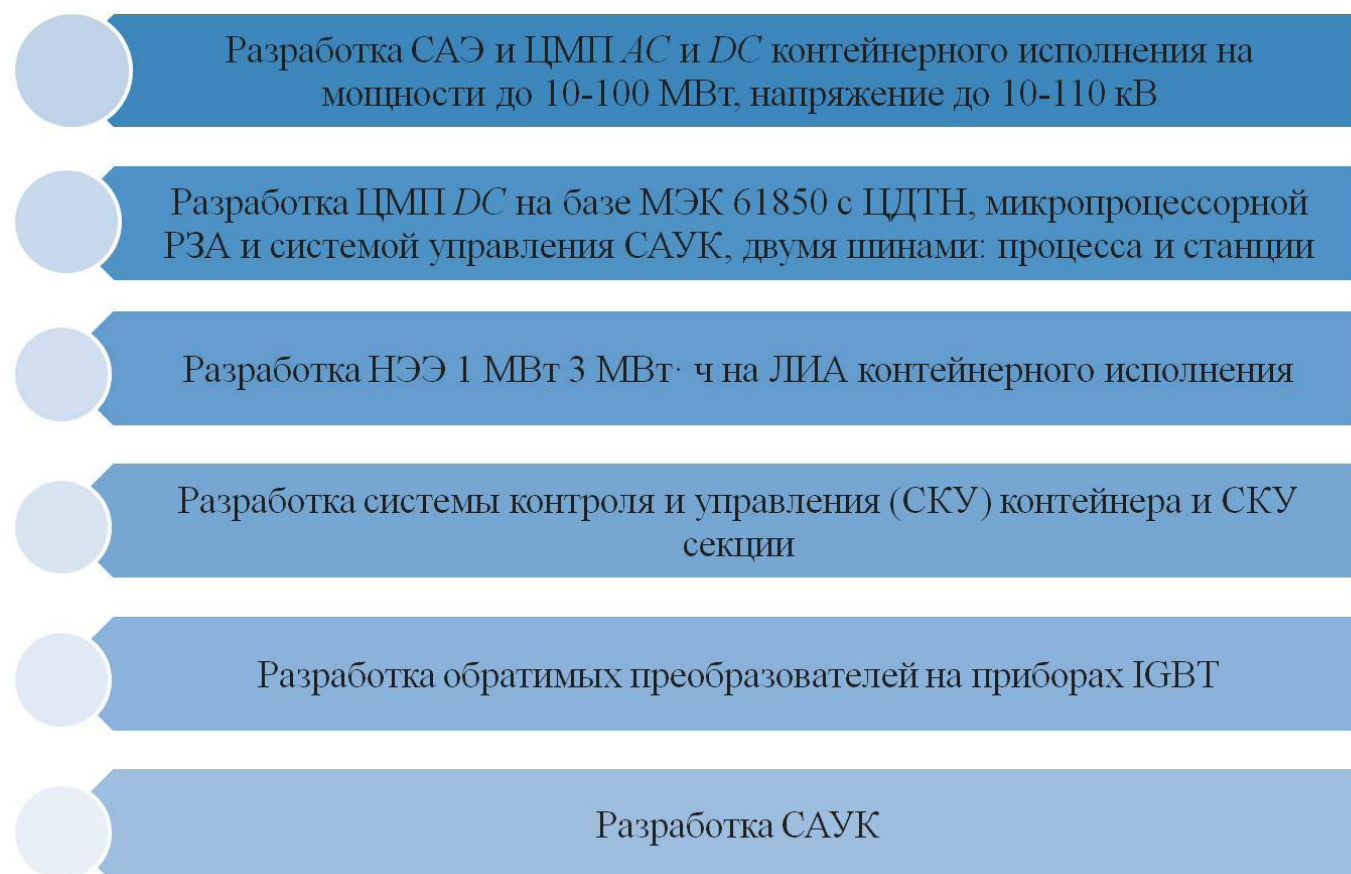


Рисунок 3 – Задачи в части разработки САЭ (1), ЦМП AC (2), ЦМП DC (3), НЭЭ с ЛИА (4), НЭЭ с ТЭ (5). Обозначения: см. рис. 1.

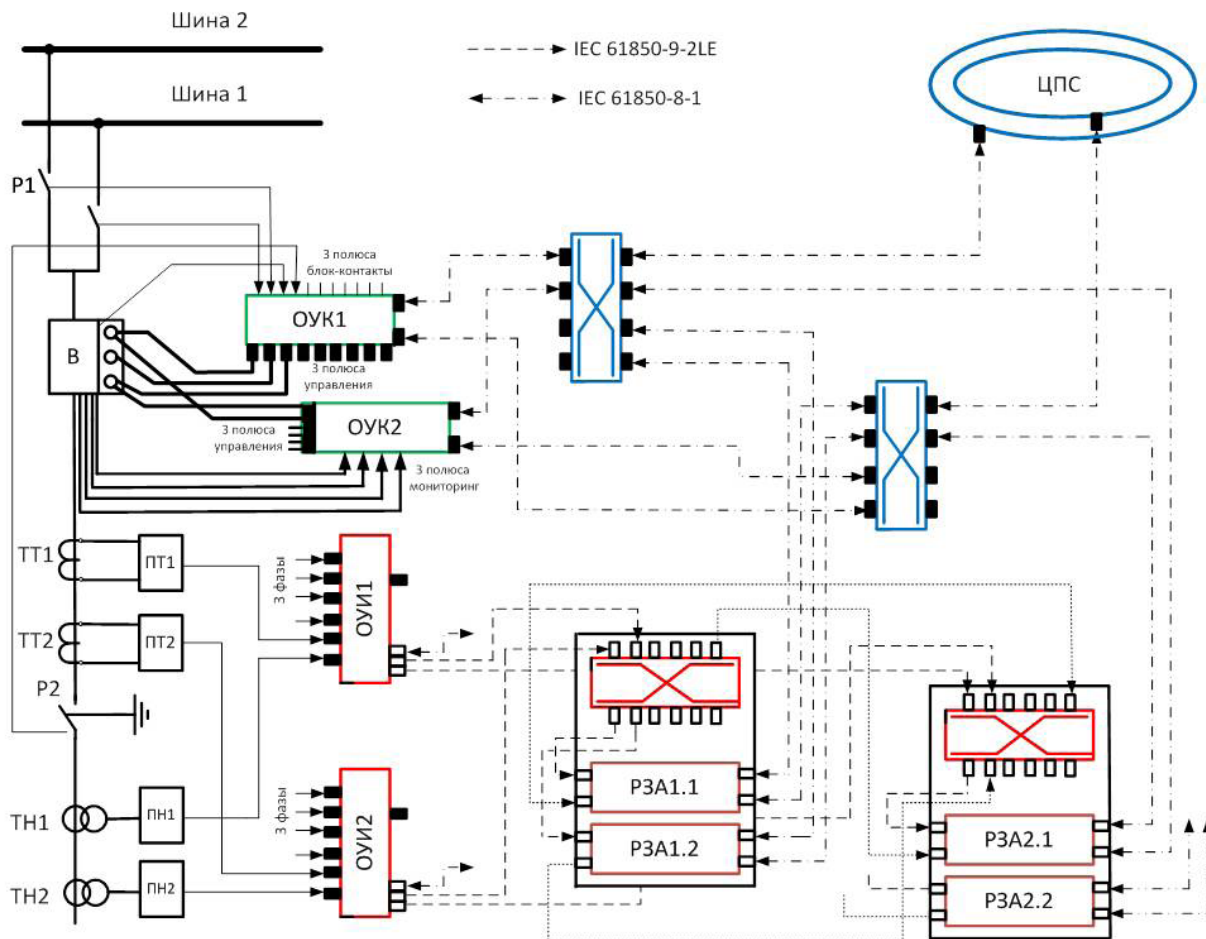


Рисунок 4 – Архитектура шин по протоколу IEC 61850 для одного присоединения

Обозначения: В – выключатель; ЦПС – цифровая подстанция; P1 – разъединители; P2 – заземлитель; ТТ1, ТТ2 – трансформаторы тока; ТН1, ТН2 – трансформаторы напряжения; ПТ1, ПТ2 – преобразователи тока; ПН1, ПН2 – преобразователи напряжения; ОУИ1, ОУИ2 – объединяющие устройства измерения; ОУК1, ОУК2 – объединяющие устройства команд; P3A1.1, P3A1.2 – терминалы шкафа 1P3A; P3A2.1, P3A2.2 – терминалы шкафа 2P3A.

Структурная схема и фотография разработанных и изготовленных в ВЭИ цифровых датчиков тока и напряжения (ЦДТН) на классы напряжения 35–110 кВ приведены на рис. 5 [10]. ЦДТН состоит из трех модулей: измерительного модуля (ИМ) на высоком потенциале, опорного изолятора со встроенным датчиком напряжения (ДН) и коммуникационного устройства (КМ) на потенциале земли. ИМ содержит оптический источник питания (фотодиод), аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и блок питания (аккумулятор). Датчиками тока являются катушки Роговского (для цепей измерения и релейной защиты), а датчиком напряжения – RC-делитель напряжения, сигналы которых поступают на входы АЦП. ИМ и КМ связаны оптическим каналом, по которому на ИМ передаются питание АЦП (мощность до 2 Вт) и сигналы управления, а от ИМ на КМ – измеренные значения тока и напряжения. Последние по протоколу

IEC 61850-9-2 LE передаются на шину процесса ЦПС (см. рис. 4). КМ содержит лазерный источник питания, коммуникационный контроллер, блок синхронизации и блок питания и является объединяющим устройством для трех фаз одного присоединения.

Основным устройством первичного оборудования ЦМП АС являются КРУ напряжением 10–35 кВ. На рис. 6 показано модульное КРУ 10 кВ типа *Premset* [11] с использованием твердой экранированной изоляции токопроводов и комплектующих элементов. Главный элемент КРУ – коммутационный аппарат, обычно в виде вакуумного выключателя с пружинным приводом, совмещенного с разъединителем и заземлителем. Датчики тока и напряжения преимущественно электромагнитного или электронного типа присоединяются через адаптеры к коммутационному аппарату. В верхней части КРУ устанавливается ми-

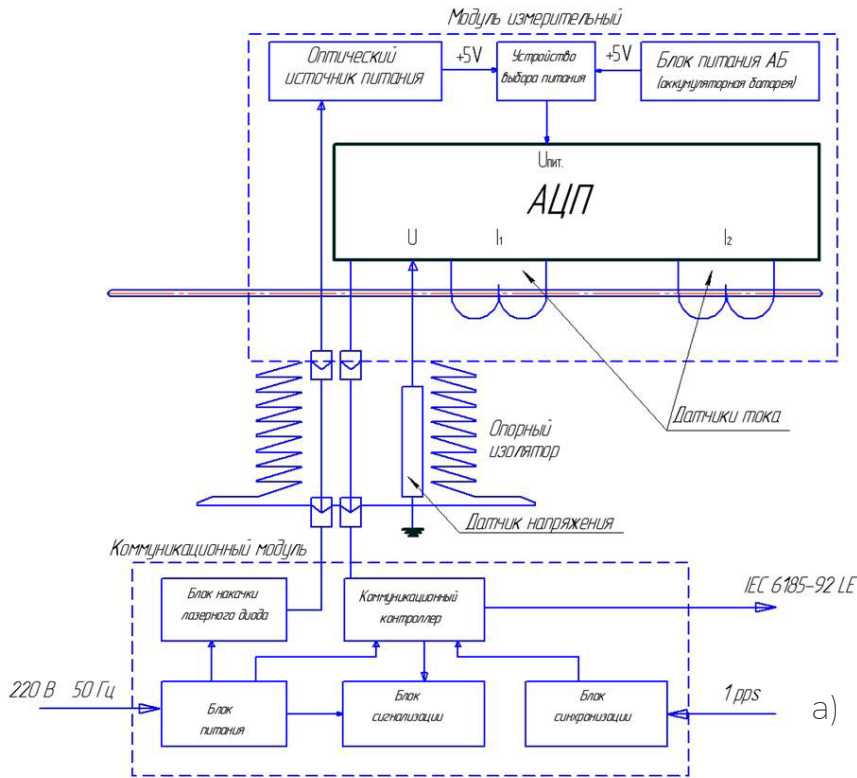


Рисунок 5 – ЦДТН: а) структурная схема; б) фотография [10].

кропроцессорный терминал управления и защиты, а также блоки мониторинга и испытания кабелей. Модульные КРУ выпускаются всеми известными фирмами и широко применяются для контейнерной установки благодаря компактности, удобству обслуживания, безопасности и

ремонтпригодности. Наиболее важными проблемами обеспечения надежности работы таких КРУ являются контроль комбинированной изоляции кабелей, токопроводов и элементов, особенно в КРУ 35 кВ [12, 13].

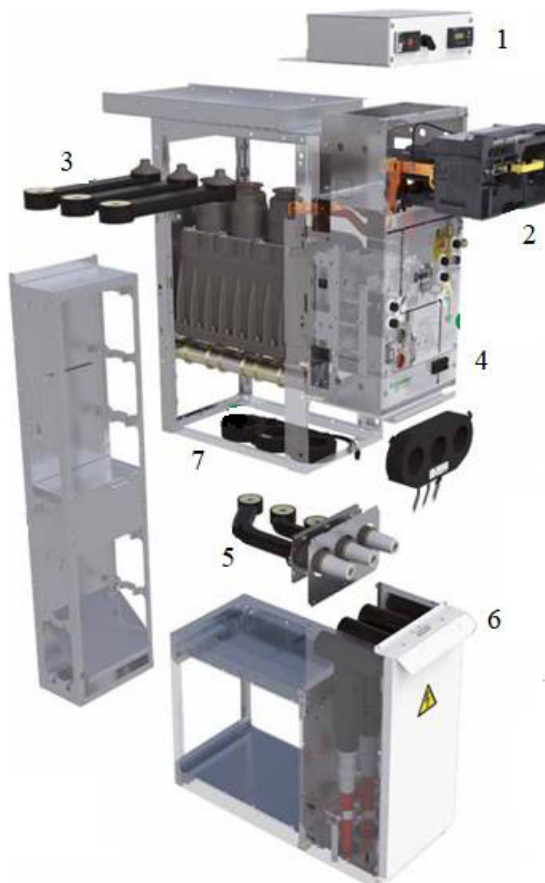


Рисунок 6 – Модульное КРУ 10–35 кВ с твердой экранированной изоляцией [11].

- 1 – отсек низкого напряжения;
- 2 – блок испытания кабелей;
- 3 – верхнее присоединение;
- 4 – коммутационный аппарат;
- 5 – нижнее присоединение;
- 6 – нижний отсек;
- 7 – измерительные датчики тока и напряжения.

На рисунке 7 в виде примера показан внешний вид контейнера СТК 35 кВ с использованием вышеописанных КРУ, а также устройств *FACTS* на основе тиристоров и приборов *IGBT* [14]. Указанные устройства позволяют устранить недостатки в части компенсации реактивной мощности, стабилизации и симметрирования напряжения, повышения пропускной способности, устойчивости и управляемости, особенно присущих локальным сетям при наличии ВИЭ.

ЦМП DC

ЦМП *DC* по принципу действия являются дискретными и цифровыми с использованием микропроцессорных систем управления, регулирования, защиты и автоматики (СУРЗА). Если раньше на их основе строились передачи и вставки *DC*, то в настоящее время для организации надежного энергоснабжения больших систем проектируются сети *DC* вплоть до напряжений 500 кВ, создаваемые в Китае. Для локальных сетей, особенно с использованием ВИЭ, приходится применять

НЭЭ разных типов и мощностей, которые могут работать только на постоянном токе, что стимулирует применение ЦМП *DC*.

На рисунке 8 приведена структура модульной стационарной САЭ, которая питается от внешней сети АС 35–110 кВ и через управляемый выпрямитель (В), нагруженный на биполярный кабель *DC*, питает внутреннюю систему энергоснабжения (ВСЭ), которая может быть как наземной, так и подземной (подводной). Наряду с основным в составе ВСЭ имеется резервное энергоснабжение в виде модульной микрогазотурбинной электростанции (МГТЭС) либо модульной дизельной электростанции (МДЭС), которые через преобразователи *AC/DC* подключены к биполярному кабелю наряду с НЭЭ в виде аккумуляторной батареи и обеспечивают питание нагрузок при нарушении питания от внешней сети и источников ВСЭ. В состав САЭ могут также входить мобильные модульные САЭ, питаемые от источников ВИЭ (ВЭС, ФЭС) или традиционных источников (МГТЭС или МДЭС). МГТЭС в силу компактности лучше подходят для



Рисунок 7 – Контейнерное исполнение на примере СТК 35 кВ [14].

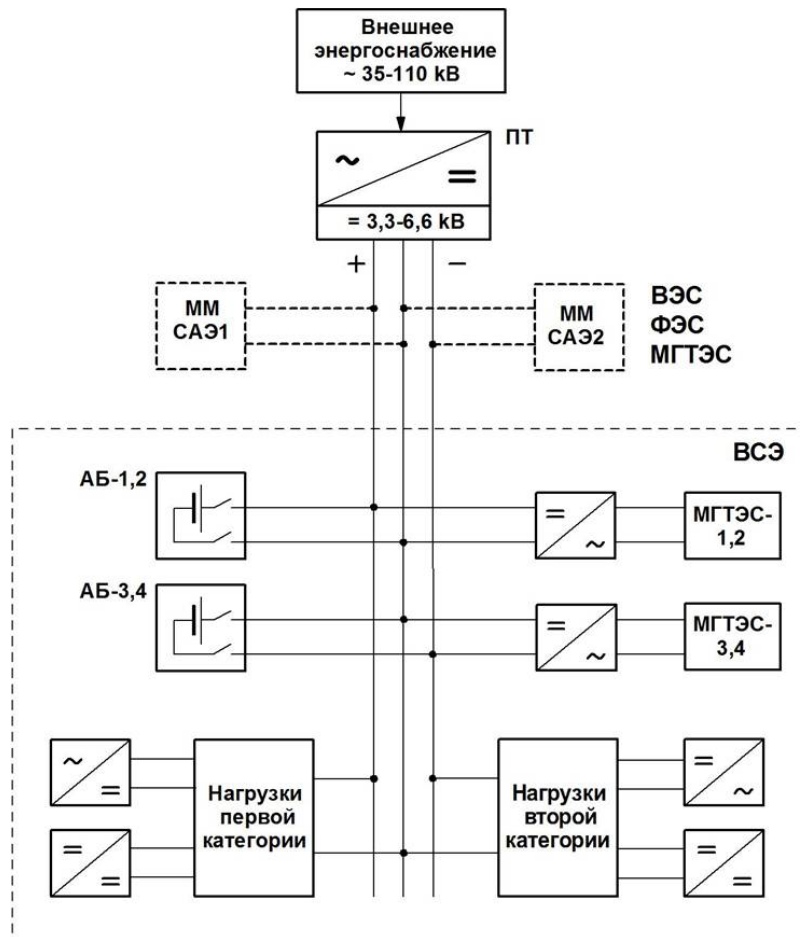


Рисунок 8 – Структура модульной стационарной САЭ для Арктики.
 Обозначения: ММ – мобильный модуль;
 ВЭС – ветровая электростанция; ФЭС – фотоэлектрическая станция;
 МГТЭС – микрогазотурбинная электростанция;
 АБ – аккумуляторная батарея;
 ВСЭ – внутренняя система электроснабжения;
 ПТ – управляемый выпрямитель постоянного тока.

мобильных САЭ, однако повышенный расход топлива зачастую ограничивает их применение. Использование системы *DC* позволяет снизить потери в кабелях, длина которых может быть любой, а главное, обеспечивает гарантированное питание нагрузок, так как при пропадании одного из полюсов другой полюс форсируется по току, сохраняя бесперебойное энергоснабжение. Нагрузки ВСЭ, в свою очередь, могут подключаться либо через преобразователи *DC/AC* (инверторы) и преобразователи *DC/DC*, что позволяет упростить схемы собственных нужд и оперативного питания ВСЭ.

На рисунке 9 в компактной форме приведены характеристики живучести, помехоустойчивости и мобильности САЭ на основе ЦМП *DC*, которые позволяют, несмотря на большие затраты сравнительно с ЦМП *AC*, обеспечить практически бесперебойное и качественное энергоснаб-

жение потребителей.

На рисунке 10 показаны фотографии преобразователей частоты (ПЧ), напряжения и тока в приборах *IGBT*, а также акустические характеристики ПЧ мощностью 212 кВт, позволяющих существенно снизить шумы в мобильных модулях, что важно в гражданских и военных приложениях.

На рисунке 11 применительно к водородному топливному элементу (ТЭ), который может использоваться в качестве НЭЭ, приведены: а) внешний вид; б) структурная схема. Применение ТЭ оправдано высоким КПД на уровне 50%, отсутствием вредных выбросов, возможностью работы при низких температурах, быстрым стартом, однако недостатки связаны с высокой степенью очистки водорода от примесей, ограниченным ресурсом мембраны в твердополимерном ТЭ [15].

Живучесть	Помехоустойчивость	Мобильность
Разнесение ММ САЭ от ВСЭ на большое удаление (1–10 км) и отключение внешнего энергоснабжения при его отказе	Кабели подземные (подводные) экранированные и заземленные	Все элементы – контейнеры на колесах или на платформах
При коротком замыкании одного полюса его отключение и форсировка по току другого полюса	Отключение любого источника в одном из полюсов или целого полюса, компенсируется форсировкой по току другого полюса	Разнесение наземных (надводных), подземных (подводных) объектов
При электромагнитном импульсе, ядерном взрыве и др. перевод ВСЭ на внутреннее питание и отключение внешнего энергоснабжения		Связь по ВОЛС (вмонтирована в силовой кабель) дублируется другими радиоканалами
Мониторинг состояния разнесенных объектов по ВОЛС		Кабели стыкуются герметичными разъемами

Рисунок 9 – Характеристики живучести, мобильности и помехоустойчивости САЭ.

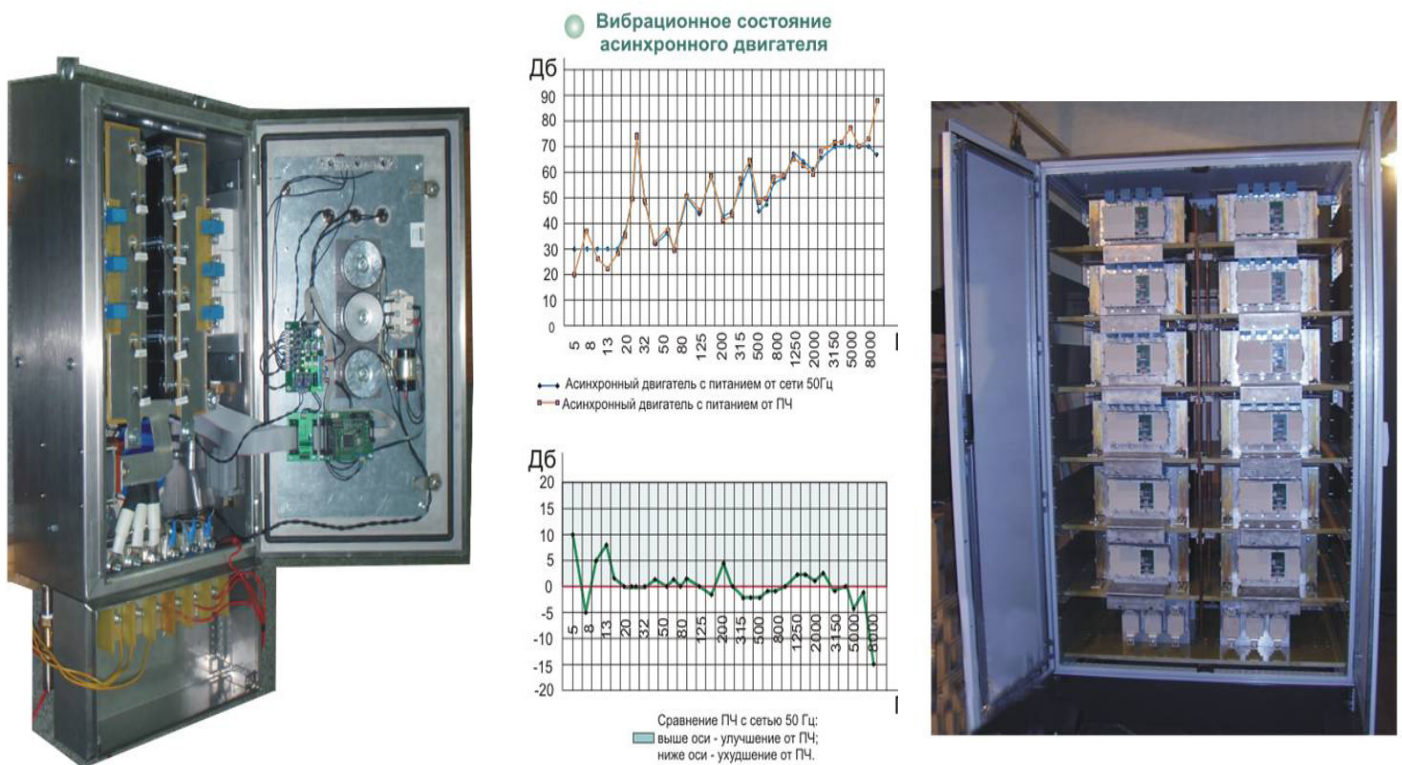


Рисунок 10 – Образцы преобразователей напряжения, тока и частоты (ПЧ) разной мощности, а также акустические характеристики асинхронных двигателей с учетом ПЧ 212 кВт.

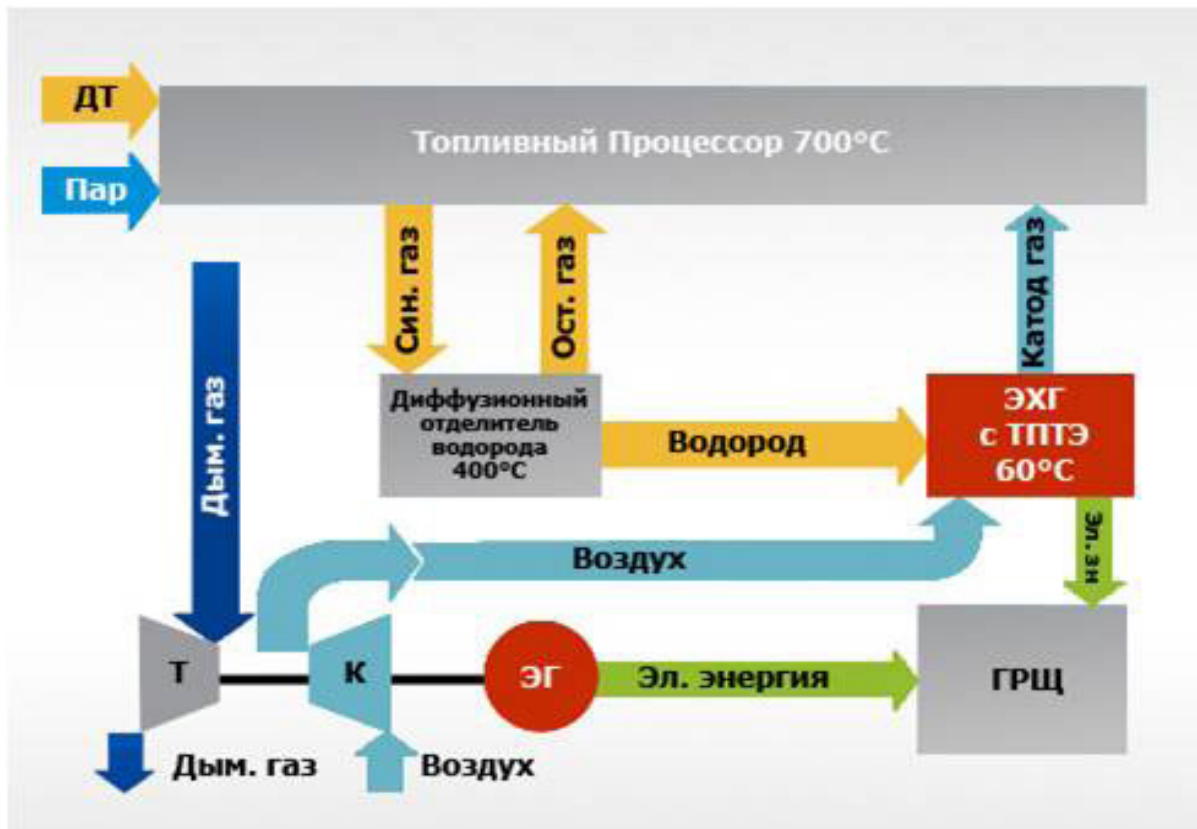


Рисунок 11 – Образец водородного ТЭ в качестве НЭЭ:
 а) внешний вид; б) структура ТЭ (разработка НИЦ СЭТ [15])

Обозначения: ДТ – дизельное топливо;

Т – турбина;

К – компрессор;

ЭГ – электрогенератор;

ГРЩ – групповой распределительный щит;

ЭХГ – электрохимический генератор;

ТПТЭ – твердополимерный топливный элемент

На рисунке 12 приведена структурная схема контейнерного НЭЭ на основе литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) мощностью 1 МВт энергоемкостью 3 МВт·ч, которые обеспечивают гарантированное энергоснабжение САЭ при исчезновении питания. Основными элементами являются модули ЛИА-1 мощностью 200 кВт, которые контролируются и управляются с помощью блоков СКУ (2). Согласование напряжений шины питания и модулей ЛИА (1) осуществляется с помощью преобразователей *DC-DC* (3), выход которых связан с входом инвертора *DC-AC* (4). Измерители (5) контролируют выдаваемую мощность, напряжение и ток НЭЭ, который через трансформатор (6) связан

с нагрузкой переменного тока. Если НЭЭ работает по схеме, где инвертор и трансформатор отсутствуют, то это существенно упрощает и удешевляет НЭЭ.

Важной проблемой повышения надежности разрабатываемого электротехнического оборудования является проведение испытаний, диагностика и мониторинг, которым посвящены публикации [17-20].

Области применения ЦМП *АС* и ЦМП *DC* характеризуются областями, показанными на рис. 13. Они зависят от наличия рынка комплектующих и заказчиков. При этом важное значение приобретают вопросы цифровизации, создания цифровых двойников, унификации и стандартизации, наличия испытательной базы и др.

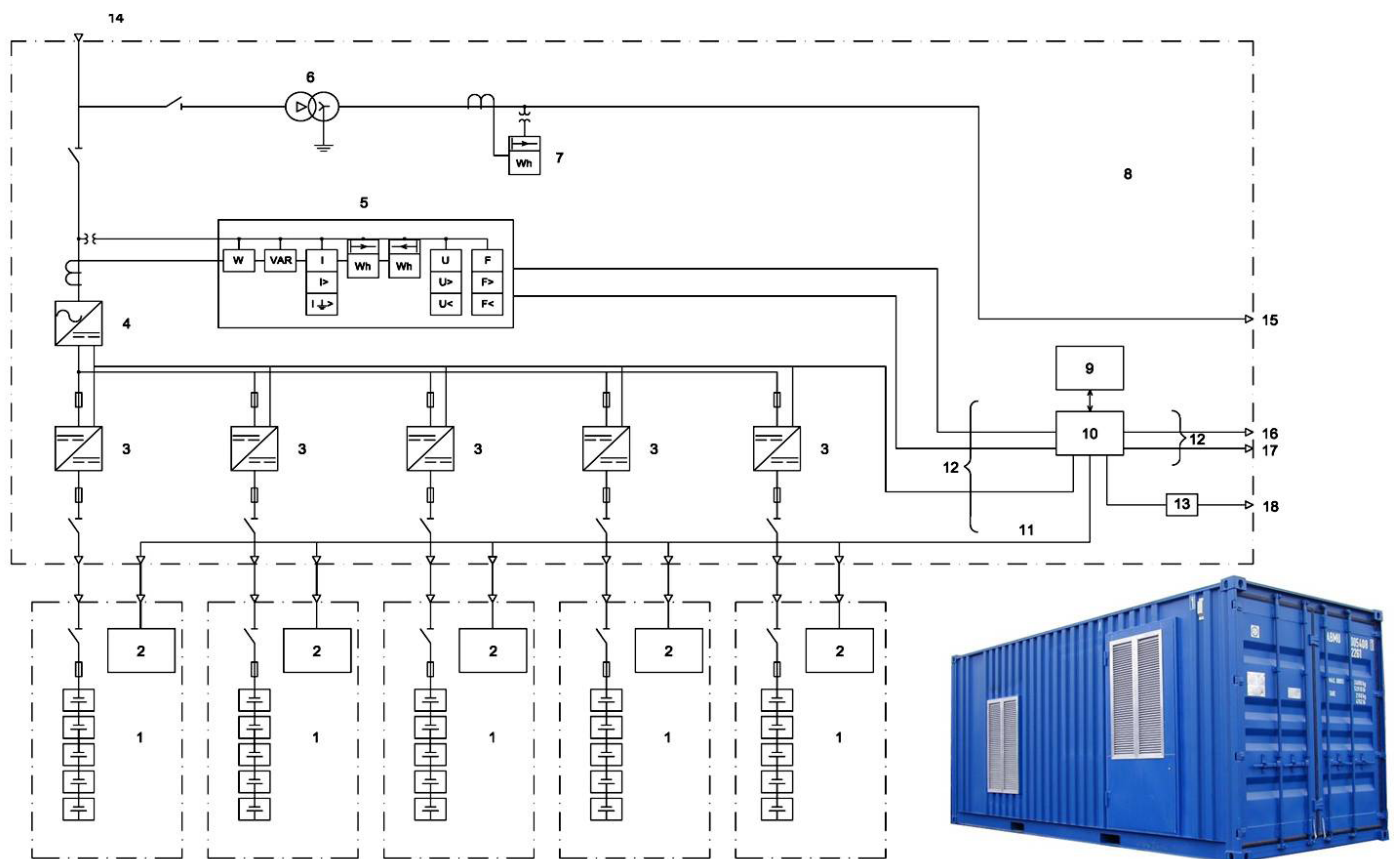


Рисунок 12 – Структурная схема контейнерного НЭЭ на основе ЛИА

Обозначения: 1 – модуль ЛИА;

2 – система контроля и управления СКУ-модуля;

3 – преобразователь *DC-DC*;

4 – преобразователь *DC-AC*;

5 – измерители;

6 – трансформатор; 7 – счетчик;

8 – контейнер;

9 – уставка;

10 – контроллер; 11, 12 – кабели;

13 – защита;

14-18 – внешние присоединения.



Рисунок 13 – Области применения ЦМП АС и ЦМП DC.

Выводы

1. Предлагается универсальная энергетическая платформа мощностью 10–100 МВт, напряжением 10–110 кВ на базе ЦМП DC с внедрением в системы внутреннего и внешнего энергоснабжения гражданского и военного применения для Арктики.
2. Использование ЦМП DC позволяет в два раза повысить надежность энергоснабжения, пропускную способность, управляемость и устойчивость по сравнению с ЦМП АС.
3. Применение ЦМП DC позволяет осуществить мобильное исполнение и реализовать САЭ повышенной устойчивости, применительно к природным и техногенным воздействиям, а также к электромагнитному импульсу.
4. Тиражирование ЦМП DC воздушного, надводного и наземного исполнения для разной мощности и разного напряжения позволит существенно удешевить производство и эксплуатацию за счет унификации и стандартизации комплектующих.
5. ЦМП DC обеспечит повышенную живучесть, помехоустойчивость, мобильность.
6. ЦМП DC позволит создать единую энергетическую платформу наземного, водного и воздушного базирования, в том числе арктического исполнения.

Список литературы:

1. Перминов В.М., Тягунов М.Г. К вопросу о структуре энергетики будущего // Энергия единой сети. 2019, № 5(48), с.10–28.
2. Рогалев Н.Д., Молодюк В.В. Проблемы развития электроэнергетики России и пути их решения // XXVIII Международная научно-техническая конференция ТРАВЭК «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования». Москва, 7–8 ноября 2018 г.
3. Шульга Р.Н., Путилова И.В. Мультиагентные системы постоянного тока с использованием ВИЭ и водородных топливных элементов // Альтернативная электроэнергетика и экология (ISJAEE), 2019, № 4–6, с. 65–82.
4. Kappenman J.G. Space weather and vulnerability of electric power grids. – Effect of space weather on technology infrastructure, 2004.
5. Шульга Р.Н. Распределенная генерация с использованием ВИЭ в составе мультиагентных систем постоянного тока // Энергосбережение и водоподготовка, 2017, № 5 (109), с. 58–69.
6. Pirjola R., Vilijanen A., Pulkkinen A., Kilpua S., Amm O. Space weather effects on electric power transmission grids and pipelines. GeoForschungsZentrum Potsdam. D-14473, Germany. – Effect of space weather on technology infrastructure, 2004.
7. Дорофеев В.В., Моржин Ю.И. Разработка концепции «Цифровая подстанция». М., 2010, с. 238.
8. Мокеев А.В., Ульянов Д.Н., Бовыкин Б.Н., Хромцов Е.И. Многофункциональные устройства для цифровых подстанций // Энергия единой сети, 2019, № 6 (49), с. 8–16.
9. Шаров Ю.В. и др. Цифровизация контроля текущего состояния и предиктивной диагностики турбогенераторов на электростанциях // Энергия единой сети, 2019, № 6 (49), с. 18–30.
10. Шульга Р.Н., Змиева К.А., Должиков Е.Ю., Тимофеев Е.М. Датчики тока и напряжения для цифровых подстанций нового поколения // Электро, 2012, № 5, с. 33–36.
11. Каталог Preset распределительных устройств среднего напряжения. URL: <http://www.se.com.ru> (дата обращения 20.02.2020).
12. Шульга Р.Н., Шульга А.Р., Ковалев Д.И., Хренов С.Н. Разработка концепции систем управления и мониторинга комплектных распределительных устройств среднего напряжения с твердой изоляцией // Электротехника, 2017, № 8, с. 39–45.
13. Шульга Р.Н., Шульга А.Р., Ковалев Д.И., Мирзабемян Г.З., Вариводов В.Н. Некоторые особенности применения твердой изоляции из сшитого полиэтилена на постоянном и переменном токе // Электротехника, 2016, № 8, с. 39–45.
14. Аксенов В.В., Чуприков В.С. Устройства симметрирования напряжения в электрических сетях // Энергоэксперт, 2019, № 3, с. 40–45.
15. Опыт создания энергоустановки с топливными элементами. URL: http://www.sozvezdye-forum.ru/assets/files/Presentation_2016/Session%202/Alekseev.pdf (дата обращения 20.02.2020).
16. Ефимов В.Б., Селиванов В.Н. Комплексные исследования внешних воздействий на электрические сети Кольской энергосистемы. – Труды Кольского научного центра РАН. – Энергетика, 2015, Вып. 10, № 2(28).
17. Khrennikov A. Yu., Kuvshinov A.A., Shkuropat I.A. Providing Reliable Operation of Electric Networks. New York: Nova Publishers, 2019. 308 p.
18. Хренников А.Ю. Высоковольтное оборудование в электротехнических системах: диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг. Учеб. пособие. М.: ИНФРА-М, 2019. 186 с.
19. Хренников А.Ю., Александров Н.М. Оценка механического состояния обмоток силовых трансформаторов // Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем». Чебоксары, 7 июня 2019 г., с. 378–382.
20. Ефимов В., Сахаров Я., Селиванов В. Геомагнитные штормы. Исследование воздействий на энергосистему Карелии и Кольского полуострова. – Новости Электротехники, 2013, №2(80)

References:

1. Perminov V.M., Tyagunov M.G. On the structure of the energy of the future // Energy of a unified network. 2019. No. 5 (48), pp.10–28.
2. Rogalev N.D., Molodyuk V.V. Problems of the development of the electric power industry in Russia and ways to solve them // XXVIII International Scientific and Technical Conference TRAVEK «Prospects for the development of the electric power industry and high-voltage electrical equipment». Moscow, 2018, November 7–8.
3. Shulga R.N., Putilova I.V. Multiagent DC systems using renewable energy and hydrogen fuel cells // Alternative Power and Ecology (ISJAEE), 2019, № 4–6, p. 65–82.
4. Kappenman J.G. Space weather and vulnerability of electric power grids. – Effect of space weather on technology infrastructure, 2004.
5. Shulga R.N. Distributed generation using renewable energy as part of multiagent DC systems // Energy Saving and Water Treatment, 2017, № 5 (109), p. 58–69.
6. Pirjola R., Vilijanen A., Pulkkinen A., Kilpua S., Amm O. Space weather effects on electric power transmission grids and pipelines. GeoForschungsZentrum Potsdam. D-14473, Germany. – Effect of space weather on technology infrastructure, 2004.
7. S Dorofeev V.V., Morzhin Yu.I. Development of the

- concept of «Digital substation». M., 2010, p. 238.
8. Mokeev A.V., Ulyanov D.N., Bovykin B.N., Khromtsov E.I. Multifunction devices for digital substations // Energy of a unified network, 2019, № 6 (49), pp. 8–16.
 9. Sharov Yu. V. et al. Digitalization of monitoring the current state and predictive diagnostics of turbogenerators in power plants // Energy of a unified network, 2019, № 6 (49), p. 18–30.
 10. Shulga R.N., Zmieva K.A., Dolzhikov E. Yu., Timofeev E.M. Current and voltage sensors for new generation digital substations // Electro, 2012, № 5, pp. 33–36.
 11. Preset catalog of medium voltage switchgears. URL: <http://www.se.com.ru> (access date 02/20/2020).
 12. Shulga R.N., Shulga A.R., Kovalev D.I., Khrenov S.N. Development of the concept of control systems and monitoring of medium-sized switchboards with solid insulation // Electrical Engineering, 2017, № 8, pp. 39–45.
 13. Shulga R.N., Shulga A.R., Kovalev D.I., Mirzabekyan G.Z., Varivodov V.N. Some features of the use of solid insulation made of cross-linked polyethylene at direct and alternating current // Electrical Engineering, 2016, № 8, pp. 39–45.
 14. Aksenov V.V., Chuprikov V.S. Voltage Balancing Devices in Electric Networks // Energoekspert, 2019, № 3, pp. 40–45.
 15. The experience of creating a power plant with fuel cells. URL: http://www.sozvezdye-forum.ru/assets/files/Presentation_2016/Session%202/Alekseev.pdf (accessed 02/20/2020).
 16. Efimov V.B., Selivanov V.N., Comprehensive studies of external influences on the electrical networks of the Kola energy system. - Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. - Energy, 2015, Issue. 10, no. 2 (28). (In Russian).
 17. Khrennikov A. Yu., Kuvshinov A.A., Shkuropat I.A. Providing Reliable Operation of Electric Networks. New York: Nova Publishers, 2019. 308 p.
 18. Khrennikov A. Yu. High-Voltage equipment in electrical systems: diagnostics, defects, damage, monitoring. Textbook. Moscow: INFRA-M, 2019. 186 p.
 19. Khrennikov A. Yu., Alexandrov N. M. Evaluation of the mechanical state of power transformer windings // Materials of the XIII all-Russian scientific and technical conference "Dynamics of nonlinear discrete electrical and electronic systems". Cheboksary, June 7, 2019, pp. 378-382.
 20. Efimov B., Sakharov Ya., Selivanov V. Geomagnetic storms. Study of impacts on the energy system of Karelia and the Kola Peninsula. - News of Electrical Engineering, 2013, No. 2 (80).