



МОБИЛЬНЫЕ МОДУЛЬНЫЕ ПОДСТАНЦИИ ДЛЯ АПК*

Р.Н. Шульга¹, И.В. Путилова², Т.С. Смирнова³

¹Филиал ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ»

д. 12, ул. Красноказарменная, Москва, 111250, Россия

тел.: +7(903)248-20-56; e-mail: rnsulga@vei.ru

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

д. 14, ул. Красноказарменная, Москва, 111250, Россия

тел./факс: +7(495)362-79-12; e-mail: putilovaiv@ecopower.ru

³Филиал ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ»

д. 12, ул. Красноказарменная, Москва, 111250, Россия

doi: 10.15518/isjaee.2019.19-21.070-083

Заключение совета рецензентов: 25.06.19

Заключение совета экспертов: 03.07.19

Принято к публикации: 09.07.19



Стратегия развития сельских территорий до 2030 г. определяется распоряжением Правительства РФ и существенно зависит от уровня энергоснабжения АПК. Для сельхозпроизводителей в среднем цена 1 кВт·ч выше, чем в городе, что обусловлено низкой плотностью нагрузок (на порядок ниже, чем в городе), низкой плотностью и изношенностью электросетей, большой длиной сетей низкого напряжения с большими потерями и высокими затратами на их эксплуатацию. Другими причинами являются устаревшие технологии, дополнительные потребности, отличные от городских, низкая электровооруженность сельского быта и более высокая нагрузка на семейные бюджеты. В результате сельская энергетика требует разработки специальных энергетических технологий в части генерации, передачи, распределения и потребления.

В статье проведен анализ требований по энергетическому снабжению и перевооружению АПК с учетом роста тарифов, вызванного ухудшением состояния изношенных длинных (свыше 1 млн км) сетей 6–10 кВ. Проблема энергоснабжения села в значительной мере может быть решена за счет разработки и применения систем автономного энергоснабжения (САЭ), которые могут работать как на переменном токе, так и на постоянном токе на линейку мощностей 0,1 МВт, 1 МВт, 10 МВт напряжением 0,4 кВ, 1 кВ и 6–10 кВ соответственно. Учитывая наиболее перспективные решения с использованием ВИЭ, предпочтительными становятся САЭ на постоянном токе с накопителями электроэнергии. Рассмотрены различные варианты реализации САЭ с использованием нетрадиционных энергомодулей криогенного (КрЭУ), водородного на топливных элементах или биореакторов, а также энергомодулей традиционного типа в виде дизель-генераторов, газотурбинных и газопоршневых установок. Проведено сопоставление различных сред по энергоэффективности и показаны преимущества водорода в топливных элементах, а затем жидкого азота в составе КрЭУ перед электрохимическими накопителями (литий-ионные аккумуляторы). Установлено, что для применения на объектах АПК постоянного тока целесообразно использовать мобильные модульные подстанции (ММП), соединенные кабельными линиями вместо прокладки воздушных линий не только в силу большей пропускной способности, надежности, но и в силу их большей устойчивости к техногенным и природным воздействиям, мобильности контейнерных подстанций и улучшения экологии. Описана структура ММП в виде мобильных комплексов жизнеобеспечения, которые позволят обеспечить потребителей не только электричеством, но и теплом, холодом, технической и питьевой водой, а для круглогодичного выращивания плодовоовощных культур – воздухоподготовкой и регулируемым спектром освещения.

Ключевые слова: мобильная модульная подстанция; агропромышленный комплекс; энергоснабжение; традиционный и нетрадиционный энергомодули; постоянный ток.

*Шульга Р.Н., Путилова И.В., Смирнова Т.С. Мобильные модульные подстанции для АПК // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;19-21:70-83.



MOBILE MODULAR SUBSTATION FOR AGROINDUSTRIAL COMPLEX

R.N. Shulga¹, I.V. Putilova², T.S. Smirnova³

¹Филиал FSUE "RFNC – VNIITF"

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

²Research Department – Scientific-Educational Center "Ecology in Power Engineering" of MPEI

14 Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russia
tel./fax: +7 (495) 362 79 12, e-mail: putilovaiv@ecopower.ru

³Филиал FSUE "RFNC – VNIITF"

12 Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russia

doi: 10.15518/isjaee.2019.19-21.070-083

Referred 25 June 2019 Received in revised form 3 July 2019 Accepted 9 July 2019

The strategy for the development of rural areas until 2030 is determined by the decree of the RF Government and significantly depends on the level of energy supply to agriculture. For agricultural producers, the average price of 1 kWh is higher than in the city and is about 10 cents per kWh. This increase is due to the low density of loads (an order of magnitude lower than in the city), low density of worn-out power grids, long low-voltage networks with large losses and high operating costs. In terms of energy consumption, the specifics are due to the use of outdated technologies in rural areas, the presence of additional needs other than urban ones, low electric power of rural life and a higher burden on family budgets. As a result, rural energy requires the development of special energy technologies in terms of generation, transmission, distribution and consumption. The requirements for energy supply and re-equipment of agriculture are estimated taking into account the growth of energy tariffs caused by the deterioration of long worn (over 1 million km) rural networks of 6-10 kV. The solution to the problem of power supply to the village can be largely solved by the development and application of autonomous power supply systems (APPS) which can be both alternating current and direct current and a line of capacities of 0.1; 1; 10 MW, respectively, voltage of 0.4 kV, 1 kV and 6-10 kV. Taking into account the most promising solutions using RES, APPS on DC with the use of electricity storage devices are preferred. Various options for the implementation of APPS using unconventional cryogenic energy modules (CrEM), hydrogen (on fuel cells) types or bioreactors, as well as the traditional type in the form of diesel generators, gas turbine and gas piston plants are considered. A comparison of the energy efficiency of different media and shows the advantages of using hydrogen in the fuel cells, and then liquid nitrogen in the composition of the CrEM before the electrochemical accumulators in the composition of LIA. For use DC in objects of APK, it is advisable to use mobile modular substation (MMS), united KL instead of the strip VL is not only because of the greater bandwidth, reliability, but also because of the greater resistance to technogenic, natural influences, improve the environment and mobility of container substations. The article describes the structure of MMS in the form of mobile life-support complexes which allows to provide consumers not only with electricity, but also with heat, cold, technical and drinking water, and for year-round cultivation of fruit and vegetable crops with air flow and adjustable lighting spectrum.

Keywords: mobile modular substation; agro-industrial complex; power supply; traditional and non-traditional power modules; direct current.



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; xio РИНЦ: 5; Researcher ID: A-9321-2014; Scopus Author ID: 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.





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 энергетике; 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.
ORCID id: <https://orcid.org/0000-0002-2494-4685>
Scopus Author ID: 6505929717

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.



Татьяна Сергеевна
Смирнова
Tatyana Smirnova

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

Образование: НИУ ВО МЭИ (2013 г.)

Область научных интересов: ТВН; моделирование режимов; электрические аппараты; экология.

Публикации: более 5.

Information about the author: Leading Researcher, VEI – the branch of FSUE “RFNC – VNIITF”.

Education: NIU, MEI, 2013.

Research interests: high voltage equipment; mode modeling; electrical devices; ecology.

Publications: more than 5.

1. Введение

Сельское хозяйство может и уже становится одной из важнейших точек роста отечественной экономики и обеспечения валютной выручки, превышающей даже поставку за рубеж военной техники. В связи с этим энергоснабжение и перевооружение агропромышленного комплекса (АПК), которые определяются распоряжением Правительства РФ [1], становятся все более актуальными задачами.

На селе уровень и условия жизни ниже, чем в городе [2, 3]. Если численность населения России за XX век выросла с 70 млн до 145 млн человек, то есть вдвое, то численность сельского населения снизилась в полтора раза – с 60 млн до 40 млн человек и продолжает медленно снижаться. Сокращение сельского населения ведет к опустыниванию больших территорий, лишает их перспектив развития, создает угрозу безопасности страны и потери национальной идентичности. Данные проблемы требуют скорейшего решения.

В [2] прогнозируется рост спроса на электроэнергию для АПК примерно в 1,5 раза за период с 2019 г. до 2035 г. (с 18,2 млрд до 26,9 млрд кВт·ч в год), что, однако, составит только 40 % от уровня потребления 1991 г. (70,5 млрд кВт·ч). Необходимо отметить, что преимуществами экспортируемой РФ сельскохозяйственной продукции является ее экологичность и пока низкая стоимость – в 3–5 раз ниже импортруемой (для Бразилии – в 1,5 раза, для США – в 2 раза, для Германии и Испании – в 5 раз).

Доля затрат на передачу и сбыт электроэнергии для АПК составляет около 80 %, и цена намного выше, чем для промышленности и города. Следует отметить, что неудавшееся реформирование энергокомплекса в России привело к существенным перекосам энергоснабжения, в результате которого стоимость 1 кВт·ч электроэнергии выросла в 2 раза по сравнению с США и в 1,5 раза по сравнению с Европой (соответственно 8 центов, 4 цента и 6 центов). Для сельхозпроизводителей стоимость 1 кВт·ч в среднем составляет 10 центов (6–7 руб.). Высокая



стоимость обусловлена низкой плотностью нагрузок (на порядок ниже, чем в городе), низкой плотностью и изношенностью электросетей, большой длиной сетей низкого напряжения с большими потерями и высокими затратами на их эксплуатацию. Проблемы энергопотребления связаны с устаревшими технологиями, наличием дополнительных потребностей, отличных от городских, низкой электровооруженностью сельского быта и более высокой нагрузкой на семейные бюджеты.

Таким образом, сельская энергетика требует разработки специальных энергетических технологий в части генерации, передачи, распределения и потребления. Эти требования включают: необслуживаемость, дистанционное управление и мониторинг оборудования, повышенную надежность и высокую эффективность с учетом использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

В [4] отмечается, что энергоёмкость производства сельхозпродукции в РФ в 2÷2,5 раза выше, чем в передовых странах, при этом централизованное энергоснабжение гораздо хуже. Так, потери в сельских электросетях 0,4÷10 кВ достигают 14,5 % (за рубежом 8,9 %), продолжительность отключений электроэнергии в среднем на объект составляет более 90 ч/г (за рубежом до 10 ч/г), частота отключений – от 19 до 23 на 100 км в год. Применяемые в 95 % радиальные схемы линий при отсутствии секционирования и резервирования в сетях 0,4 кВ не обеспечивают надежного энергоснабжения, 16 % действующих линий электропередач (ЛЭП) 6–10 кВ находятся в неудовлетворительном состоянии. Отсутствуют эффективные средства обеспечения совместной работы традиционных сетей и источников малой и распределенной генерации.

Нетрадиционные источники в энергобалансе АПК составляют всего 1,5 %, в то время как за рубежом – 10÷15 %. К 2030 г. доля нетрадиционных энергоресурсов в энергетике АПК должна составить

20÷25 %. Доля энергозатрат в себестоимости сельхозпродукции достигла максимума в 28 % в 2017 г. и к 2030 г. ожидается снижение до 26 % [4].

Указанные показатели подтверждают необходимость расширения применения распределенной генерации в АПК, которая по ряду данных позволяет на 30÷40 % снизить затраты сравнительно с централизованным энергоснабжением [5].

Можно наметить ряд перспективных технологий развития и модернизации энергетике АПК, к которым по степени приоритета относятся:

- создание автономных систем энергоснабжения с использованием ВИЭ;
- разработка новых технологий переработки биомассы и других ресурсов для получения тепла и электроэнергии;
- разработка оборудования для преобразования электроэнергии с повышенным коэффициентом полезного действия (КПД) и сроком службы при снижении стоимости, например, для фото- и солнечных элементов КПД выше 25 %, а для ветроэнергетических установок (ВЭУ) выше 40 %.

Особое значение имеет разработка новых электрофизических методов воздействия на биообъекты с повышением их генетического потенциала и обеспечения высокой продуктивности. Эти технологии включают: разработку регулируемого спектра излучения для растений в зависимости от их фаз развития, модули СВЧ-конвективной сушки и обеззараживания зерна, ИК-УФ облучение молодняка. Для обеспечения новых технологий необходимо поднять электровооруженность труда АПК с 6 000 кВт·ч/чел. в 2017 г. до 9 000 кВт·ч/чел. в 2030 г.

В данной статье анализируется проблема создания автономных систем энергоснабжения с использованием ВИЭ и нетрадиционных источников генерации, передачи и распределения электроэнергии с учетом дополнительных условий водоподготовки, воздухоподготовки, переработки отходов.

Список обозначений

Буквы греческого алфавита

α	Угол отпирания
Δ	Фазовый угол
ω	Частота, рад/с

Буквы латинского алфавита

A	Работа, Дж
C_p	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
E	Электродвижущая сила, В
I	Сила тока, А
L	Индуктивность, мГн
k	Показатель адиабаты
M	Коэффициент модуляции
P	Давление, Па
R	Сопротивление, Ом
T	Температура, °С
U	Напряжение, В

Индексы нижние

d	Выпрямленное
t	Турбина



атм	Атмосфера
л	Линейное
н	Нагрузка
окр	Окружающая
п	Преобразователь
р, раб	Рабочее
<u>Аббревиатуры</u>	
АС	Переменный ток
АБ	Аккумуляторная батарея
АБП	Автономный бесперебойный блок питания
АПК	Агропромышленный комплекс
БР	Биореактор
В	Выключатель
ВИЭ	Возобновляемый источник электроэнергии
ВЛ	Воздушная линия электропередачи
ВНИИТФ	Всероссийский национальный исследовательский институт технической физики
ВП	Выпрямитель
ВПГ	Водоподготовка
ВЭИ	Всероссийский электротехнический институт
ВЭМ	Водородный энергомодуль
ВЭУ	Ветроэнергетическая установка
ВЭЭ	Водородная электроэнергетика
ГПА	Газопоршневой агрегат
ГТУ	Газотурбинная установка
ДВС	Двигатель внутреннего сгорания
ДГ	Дизель-генератор
ДЭС	Дизельная электростанция
ДС	Постоянный ток
И	Инвертор напряжения
ИК	Инфракрасный
КЗ	Короткое замыкание
КЛ	Кабельная линия
КПД	Коэффициент полезного действия
КПТ	Компенсированный преобразователь тока
КРТ	Криогенное рабочее тело
КрЭУ	Криогенная энергоустановка
ЛИА	Литий-ионный аккумулятор
ЛЭП	Линия электропередачи
МГД	Магнитно-гидродинамический
МГТЭС	Микрогазотурбинная электростанция
ММКЖ	Мобильный модульный комплекс жизнеобеспечения
ММП	Мобильная модульная подстанция
МН	Минерализатор
МСПТ	Микросеть постоянного тока
Нагр	Нагрузка
НЭЭ	Накопитель электроэнергии
ОЗ	Озонатор
ПИР	Перевод в инверторный режим
ПН	Преобразователь напряжения
ПО	Переработка отходов
ПС	Подстанция
ПТ	Преобразователь тока
Р	Разъединитель
РФЯЦ	Российский федеральный ядерный центр
САЭ	Система автономного энергоснабжения
СВЧ	Сверхвысокая частота
СК	Суперконденсатор
СПГ	Сжатый природный газ
СУ	Система управления
Т	Турбина
ТГ	Турбогенератор



ТДКА	Турбодетандер-компрессорный агрегат
ТК	Телеканал
ТОТЭ	Твердооксидный топливный элемент
ТПТЭ	Твердополимерный топливный элемент
ТЭ	Топливный элемент
УФ	Ультрафиолетовый
ФГУП	Федеральное государственное унитарное предприятие
ФЭУ	Фотоэлектрическая установка
ЭДС	Электродвижущая сила

2. Теория и практика. Варианты создания систем автономного энергоснабжения для АПК

Системы автономного энергоснабжения (САЭ) для АПК могут создаваться как на переменном токе, так и

на постоянном токе на линейку мощностей 0,1 МВт; 1 МВт; 10 МВт напряжением 0,4 кВ, 1 кВ и 6÷10 кВ соответственно. Если учитывать наиболее перспективные решения с использованием ВИЭ, то предпочтительной становится схема САЭ на постоянном токе (рис. 1).

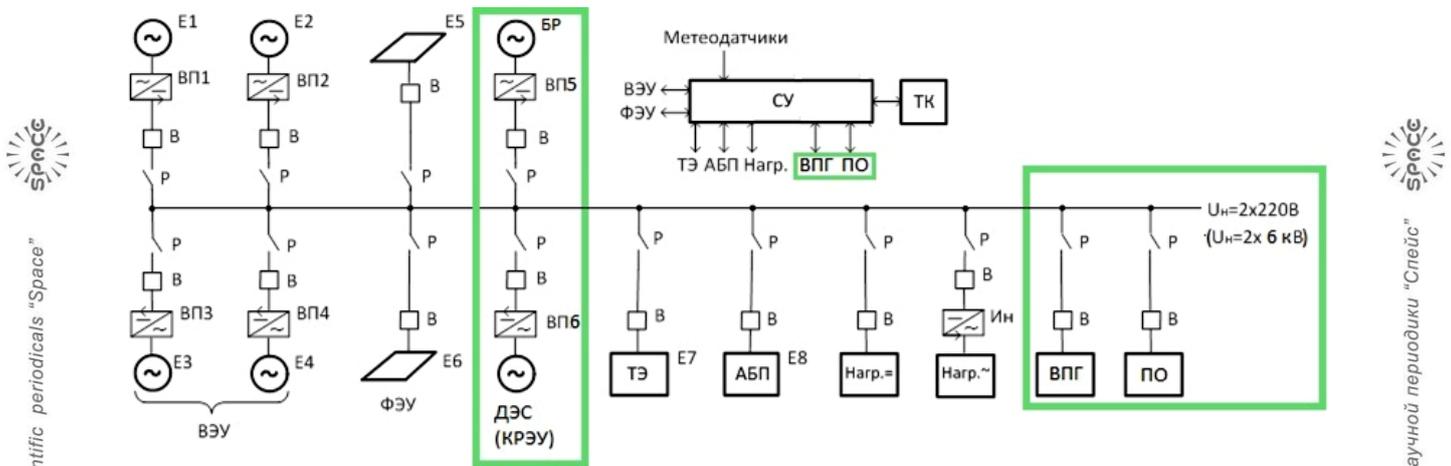


Рис. 1 – Схема САЭ на постоянном токе для АПК: Р – разъединители; В – выключатели; ВП – выпрямители; И – инверторы напряжения; ТЭ – топливные элементы; АБП – автономный бесперебойный блок питания; СУ – система управления; ТК – телеканал; E1-E4 – электродвижущая сила (ЭДС) четырех установок ВЭУ; E5-E6 – ЭДС двух установок ФЭУ; E7 – ЭДС ТЭ; E8 – ЭДС аккумуляторной батареи (АБ), входящей в комплект автономного бесперебойного блока питания (АБП); Нагр.= и Нагр.~ – нагрузки постоянного и переменного тока соответственно; ДЭС – дизель-электрическая станция; КрЭУ – криогенная энергоустановка; ВПГ – водоподготовка; ПО – переработка отходов
Fig. 1 – A diagram of the APPS on DC for agro-industrial complex: P – disconnectors; В – switches; ВП – rectifiers; И – inverters voltage; ТЭ – fuel cells; АБП – autonomous uninterruptable power supply unit; СУ – control system; ТК – channel; E1-E4 – EMF four installations of wind turbines, E5-E6 – EMF of the SEM; E7 – EMF of fuel cells; E8 – EMF of the battery АБ included in АБП; Нагр.= and Нагр.~ – load, DC and AC, respectively; ДЭС – diesel-electric power station; КрЭУ – cryogenic power plant; ВПГ – water treatment; ПО – waste treatment

Схема рис. 1 может являться стандартной для САЭ, и в [6] она приведена преимущественно для арктических условий, однако для АПК целесообразно применение дополнительных устройств: в части генерации – дизель-электрических станций (ДЭС) или микрогазотурбинных электростанций (МГТЭС), а также местных источников, например, биореакторов (БР); в части потребления – модулей водоподготовки (ВПГ) и переработки отходов (ПО). На схеме дополнительные устройства выделены зеленым цветом и могут быть объединены в триггерационную систему за счет криогенных энергоустановок (КрЭУ) или водородного энерго модуля (см. разделы 2.1. и 2.2.). Дополнительные потребители в части ВПГ и ПО необходимы для засушливых южных регионов (Крым, Калмыкия), а также для Севера при наличии тепличного хозяйства. Повышение мощности САЭ обеспечивается переводом

питания нагрузок на напряжение 6 кВ. Постоянный ток для АПК предпочтителен из-за разнотипных и разнесенных источников и нагрузок, а также повышения надежности и снижения стоимости эксплуатации и потерь.

ВЭУ и фотоэлектрическая установка (ФЭУ) выдают энергию стохастически, поэтому их применение возможно только при аккумулировании электроэнергии. Следует учитывать, что топливные элементы (ТЭ) наряду с использованием баллонной и металлгидридной системы накопления водорода обеспечивают долговременное хранение (недели и месяцы), а гелиевые или литий-ионные аккумуляторные батареи (АБ) и даже суперконденсаторы (СК) в составе автономного бесперебойного блока питания (АБП) обеспечивают кратковременное хранение суточного диапазона с возможностью покрытия пиков нагрузки.

Центральным модулем САЭ является система управления (СУ), через спутник или телеканал ТК связанная с центральным диспетчерским и сервисным пунктом и обеспечивающая управление, регулирование, защиту, автоматику, мониторинг.

При возникновении короткого замыкания (КЗ) в одной из шин придется отключать всю систему, в то время как при биполярной ошиновке в САЭ постоянного тока система продолжает работать путем отключения аварийного полюса и форсировки неповрежденного полюса. Указанные факторы делают САЭ постоянного тока предпочтительными для АПК, особенно при большой длине кабелей или ЛЭП, большом числе ФЭУ. Следует также учитывать, что потери в кабелях постоянного тока меньше, чем на переменном токе, и их сечение может быть снижено. Кроме того, в САЭ (см. рис. 1) не требуется использовать устройства синхронизации и синфазирования как на переменном токе, что существенно упрощает систему и снижает ее стоимость.

САЭ постоянного тока позволяет создать «умную» сеть, минимизируя число датчиков, их тип и упрощая алгоритмы управления. Сверхтоки при КЗ за счет регулятора тока в СУ практически отсутствуют, уровень перенапряжений при коммутациях не превышает двукратных значений от уровня номинального напряжения.

Базисным источником в схеме (см. рис. 1) является пока еще относительно дорогой водородный ТЭ с ориентировочной ценой 4 тыс. долл./кВт. Для АПК целесообразно использовать гибридную схему, включив вместо ТЭ более дешевые ДЭС или МГТЭС (примерно от 500 долл./кВт до 1 тыс. долл./кВт) через дополнительный выпрямитель ВП5. Наличие АБП позволяет использовать ВЭУ и ФЭУ в качестве базисной нагрузки, экономя топливо ДЭС, которая считается резервным источником. А наличие БР на основе местных биоресурсов и применение ВПГ и ПО обеспечивает экономию топлива, комплексное использование ресурсов, улучшение экологических показателей.

Применение сжатого природного газа (СПГ) вместо жидкого топлива для традиционных источников, какими являются ДЭС и МГТЭС, позволит заметно улучшить экологические показатели, а затем, по мере расширения и снижения стоимости водородной инфраструктуры, заменить эти источники на прямое преобразование электроэнергии с помощью водородного ТЭ. КПД такого ТЭ (примерно 70 %) вдвое выше, чем у МГТЭС и ДЭС (соответственно 30 % и 40 %), а выброс двуокси углерода несопоставимо ниже [17].

2.1. Тригенерация с криогенным энергомодулем

Для АПК весьма перспективно использовать, наряду с ТЭ и АБ, КрЭУ, генерирующие электричество, тепло и холод. Водородные, воздушные и химические аккумуляторы частично рассматривались в [7–9], криогенные энергоустановки для транспорта описаны в [10]. В КрЭУ для АПК воздух из атмосферы закачивается с помощью компрессора, в охладителе охлаждается до температуры $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, причем полученная жидкая смесь азота и кислорода закачивается турбодетандер-компрессорным агрегатом (ТДКА) в закрытое хранилище-термос криогенного рабочего тела (КРТ), где с минимальными потерями ($0,5\div 1\%$) и при атмосферном давлении может храниться неделями. При необходимости выдачи энергии потребителю осуществляется разряд указанного хранилища с помощью насоса, прокачивающего через теплообменник КРТ, которое испаряясь и расширяясь более чем в 700 раз, раскручивает турбину и турбогенератор. Совершивший работу ледяной воздух практически полностью возвращается в рабочий цикл. В КрЭУ не требуется сжигания топлива, отсутствуют выхлопные газы, а экологическая обстановка улучшается за счет фильтрации и осушения воздуха.

Техническое оборудование установки в составе фильтров, компрессора-турбогенератора, сосуда Дьюара, турбогенератора является стандартным промышленным оборудованием, изделия которого могут собираться в виде блочно-модульной энергоустановки, показанной на рис. 2.

На первом этапе заряда атмосферный воздух, нагнетаемый компрессором, подвергается в фильтре очистке от пыли и примесей, а влага, углеводороды и их окислы отделяются при помощи двухслойного адсорбера из алюмогеля и синтетических цеолитов. Для очистки адсорберов периодически сбрасывается давление, производится их нагрев и охлаждение.

Подготовленный и сжатый до 40 атм сухой и горячий воздух проходит через двухступенчатый турбодетандер – холодильную машину (охладитель), где дважды расширяется, теряя свою тепловую энергию, и охлаждается, превращаясь в светло-серую текучую жидкость с температурой $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, которая поступает и хранится неделями в двух и более стандартных 10-тонных криогенных емкостях.

Применение жидкого азота для выработки и хранения электроэнергии довольно интересно, так как КрЭУ поглощают энергию из окружающей среды путем испарения и нагрева теплоносителя КРТ, что позволяет повысить давление в установке (например, в изохорном процессе). Пары КРТ подаются в турбину, где энергия пара превращается в механическую, а затем электроэнергию на выходе турбогенератора. Накопителем электроэнергии является КРТ, а энергия преобразования не создает вредных выбросов, используя повторно, и даже немного очищает окружающую среду.



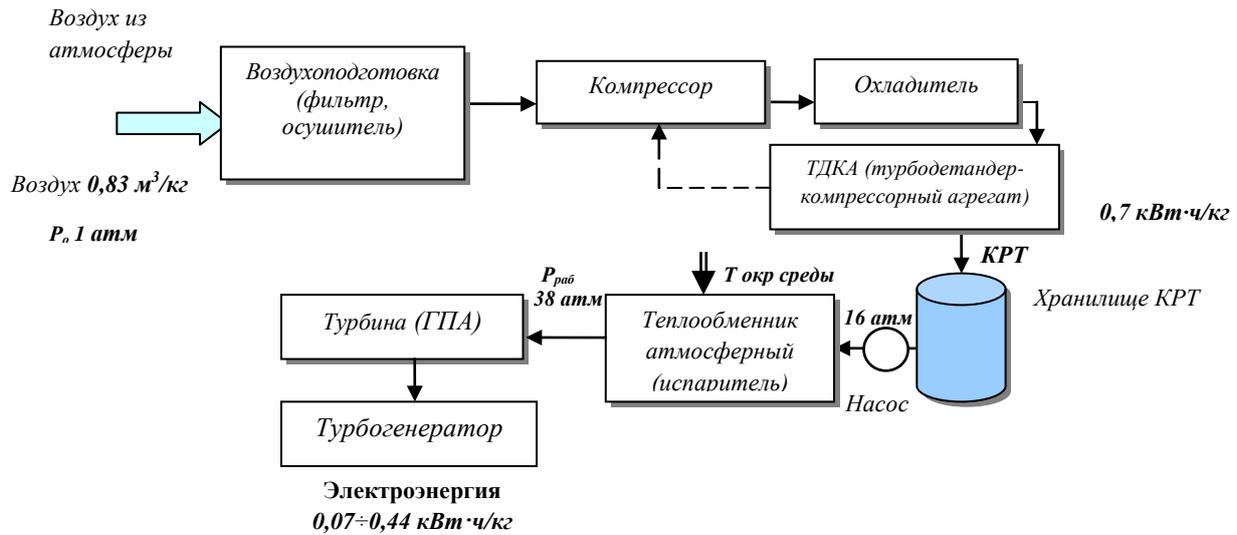


Рис. 2 – Блочно-модульная криогенная энергоустановка
 Fig. 2 – Block-modular cryogenic power plant

Преимущества использования в качестве КРТ жидкого азота определяется следующими показателями:

- большой удельный вес (примерно 0,8 г/см³, не ниже бензина);
- взрывобезопасность;
- неограниченный и восстанавливаемый источник сырья из атмосферы;
- развитое промышленное производство на металлургических и химических заводах;

– высокая температура кипения (примерно 80 К) и низкие потери хранения (примерно 2 % в сутки, у бензина 1 % в сутки);

– низкая стоимость производства (0,5 кВт·ч/кг).

Указанные преимущества позволяют рассматривать КрЭУ в качестве альтернативы широко применяемым двигателям внутреннего сгорания (ДВС) в энергетике и на транспорте. В табл. 1 приведены сопоставительные характеристики (на 1 кг) различных энергоносителей и аккумуляторов по данным [10].

Таблица 1

Сопоставительные характеристики энергоносителей и аккумуляторов

Table 1

Comparative characteristics of energy carriers and batteries

	Бензин	Водород (газ)	ЛИА	Жидкий азот
Энергоемкость, кВт·ч/кг	12,2	39,4	0,15	0,214
Затраты на производство, кВт·ч/кг	5	65	3,44	0,42
Полезная работа, кВт·ч/кг	1,83	5,9	0,12	0,117
Масса емкости для хранения 1 кг энергоносителя, кг	0,1	20	1	0,2
Общая масса емкости и энергоносителя, кг	1,1	21	1	1,2
Дальность, км	6,6	21,3	0,432	0,42
Условная цена, кВт·ч/кг	0,75	3	8	1,05

Примечание: Наилучшие показатели выделены жирным

Показатели (см. табл. 1) приведены на основе следующих оценок:

– условная стоимость 1 кг бензина составляет 1 долл. США при затрате на его производство 5 кВт·ч/кг [11];

– цена 1 кг лития в ЛИА принимается равной 700 долл. США, при КПД 0,5, числе перезарядов 500, условной стоимости 3,44 кВт·ч/кг.

Анализ данных табл. 1 показывает, что наиболее экономичным энергоносителем является бензин, а

затем с небольшим отрывом жидкий азот. Перспективы применения КрЭУ на транспорте весьма обещающие. Стоимость энергоустановки мало отличается от ДВС – вес и габариты примерно одинаковы. Относительно большой бак компенсируется отсутствием систем охлаждения, смазки, трансмиссии. Эксплуатационные расходы также незначительно отличаются.

Если в настоящее время мощность криогенных установок достигает 10 МВт, то в будущем модуль-



ные КрЭУ обеспечат мощность 10÷40 МВт с числом циклов разряда более 13 тыс., что покрывает весь диапазон сетей любого назначения, особенно с использованием ВЭУ и ФЭУ. Особенно перспективно применение криогенной энергоустановки контейнерного типа мощностью 1 МВт с десяти-

тонной емкостью в качестве автономного стационарного или мобильного источника, эксплуатация которого вдвое дешевле по сравнению с дизельным электроагрегатом.

На рис. 3 приведен общий вид криогенной энергоустановки мощностью 350 кВт [11].



Рис. 3 – Общий вид КрЭУ мощностью 350 кВт [11]
Fig. 3 – General view of the cryogenic power plant with a capacity of 350 kW [11]

Термос-хранилище жидкой смеси азота и кислорода объемом 10 т имеет минимальные потери 0,5 % в сутки и при атмосферном давлении хранит смесь неделями. Контейнерное размещение оборудования позволяет обеспечить заводской монтаж, быструю сборку и возможность реализации мобильной энергоустановки.

2.2. Тригенерация с водородным энергомодулем

Водородная электроэнергетика (ВЭЭ) в значительной мере использует наработки профессора Т.Н. Везироглу (США) [12], а также совокупность водородных источников и накопителей, приведенных в [13]. Следует отметить, что именно ВЭЭ является предпочтительной для АПК исходя из высокой энергоэффективности производства и минимизации выбросов диоксида углерода, соединений серы и других загрязняющих веществ. На качественной структурной схеме безотходной водородной энергогенерации (рис. 4) [14] показана циркуляция различных сред для получения и выработки электричества, тепла, воды и переработки твердых отходов [15]. Исходный природный газ (СПГ), который на 95 % состоит из метана CH_4 , при подаче воды H_2O в элементах ТОТЭ разлагается на водород и кислород при

нагреве до $500 \div 1\ 000$ °С. На выходе получают электричество и тепло с минимумом уходящих газов, которые также используются для подогрева исходного метана и воды и повышения КПД электрогенерации до 75 %, что недостижимо при тепловой электрогенерации. На вход ТОТЭ, в соответствии с [14], поступают воздух, метан, вода (техническая). На выходе ТОТЭ вырабатывается постоянный электрический ток с КПД до 50 %, который за счет работы теплообменника и магнитно-гидродинамического (МГД) генератора суммируется с постоянным током для повышения КПД до 75 %. Если необходимо получить переменный ток, то в канал уходящих газов к выходу ТОТЭ присоединяют турбогенератор (ТГ), ток которого суммируется с переменным 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 идет на обогрев помещений, а в случае необходимости – на переработку опасных и твердых отходов (через пиролизную камеру с температурой $500 \div 800$ °С, а затем с прокаливанием при $900 \div 1\ 000$ °С и дожиганием дымовых газов при $1\ 200 \div 1\ 250$ °С).



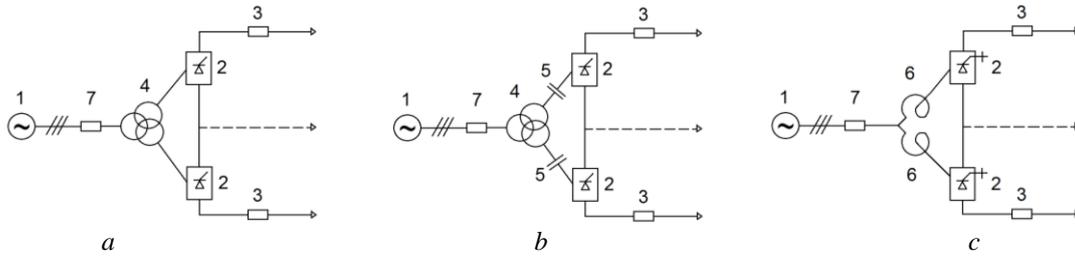


Рис. 4 – Однолинейная принципиальная схема управляемого выпрямителя 4, указанного на рис. 5: 1 – генератор водородного энерго модуля; 2 – преобразователь тока на тиристорах (или преобразователь напряжения на приборах IGBT или IGCT); 3 – однополюсный выключатель постоянного тока; 4 – трансформатор; 5 – конденсатор; 6 – реактор; 7 – трехполюсный выключатель переменного тока

Fig. 4 – Single-line schematic diagram of the controlled rectifier 4 shown in Fig. 5: 1 – generator of a hydrogen energy module; 2 – thyristor current converter (or voltage converter on IGBT or IGCT devices); 3 – single pole DC switch; 4 – transformer; 5 – capacitor; 6 – reactor; 7 – three-pole AC switch

Недостатком ТОТЭ является разложение воздуха за счет высокой температуры с образованием оксидов азота. Мероприятиям по сокращению выбросов оксидов азота посвящено значительное число работ и справочных материалов [16]. Применяются два основных подхода: технологический (с целью затормозить образование оксидов азота в топке) и очистка дымовых газов.

Известно, что образование оксида азота подавляется введением в зону конца пламени частиц углеводородов [16]. На самом деле имеет место не подавление образования оксидов азота, а их восстановление в присутствии метана. В топке ТОТЭ устанавливаются дополнительные горелки, в которые подается часть топлива с недостатком воздуха и создается зона с восстановительной средой. Еще выше располагают сопла для ввода третичного воздуха, необходимого для завершения сгорания. Опыт показывает, что в промышленных установках за счет ввода дожигающего топлива можно снизить концентрацию оксида азота в дымовых газах до $120 \div 210 \text{ мг/м}^3$ (н.у.) в зависимости от вида угля [17]. Этот метод активно исследовался энергетиками Японии, Германии и США.

В мире разработано более 50 разновидностей сухой и мокрой очистки дымовых газов. К основным методам очистки отходящих газов от оксидов азота относятся абсорбционный, адсорбционный, радиационный, озонирование, окисление и восстановление в газовой фазе [17]. Сорбционные методы рекомендуются при различных концентрациях токсичных веществ. Чем больше концентрация вредных веществ, тем рентабельней метод. Однако адсорбционный метод утилизации оксидов азота не решает полностью проблему ликвидации вредных выбросов в атмосферу.

Наиболее радикальным и хорошо освоенным промышленностью является метод каталитической очистки. Концентрация оксидов азота может колебаться в зависимости от источника от 0,1 %об. до 0,35 %об. и максимальна в выбросах производства азотной кислоты. Многие газовые выбросы, кроме

оксидов азота, содержат значительное количество кислорода (от 1 % до 20 %) и оксидов серы. Это создает определенные трудности для очистки методом каталитического восстановления из-за отравления катализаторов и необходимости применения значительного объема газа-восстановителя (CH_4 , H_2 , CO) для улавливания избытка O_2 . Более экономично, по сравнению с другими каталитическими способами, восстановление оксидов азота с применением аммиака, что можно использовать в ТОТЭ.

Более прогрессивными в техническом и коммерческом отношении сравнительно с ТОТЭ являются твердополимерные топливные элементы (ТПТЭ), обладающие высоким КПД ($50 \div 60 \%$), высокой нагрузкой (от 40 тыс. час. до 80 тыс. час.), приемлемой удельной стоимостью (до 250 долл./кг), работающие при температуре до 100°C практически без выбросов оксидов азота.

3. Традиционные источники электроэнергии и накопители

Показатели и характеристики источников, накопителей и статических преобразователей достаточно широко освещены в литературе [например, 6–14]. В качестве традиционных источников на СПГ целесообразно использовать газотурбинные (ГТУ), дизель- и газопоршневые установки, которые наиболее востребованы в регионах с развитой инфраструктурой СПГ и жидких углеводородов, в основном в Европейской части России, при обеспечении двухкомпонентными видами топлива. Для восточной части России ввиду затрудненной логистики и отсутствия углеводородных источников лучшим вариантом будет сочетание традиционных источников (см. рис. 1) и накопителей электроэнергии, особенно с ВИЭ. Накопители электроэнергии (НЭЭ) от 10 % до 20 % мощности нагрузки могут быть в виде литий-ионных АБ или ТЭ: твердополимерных или твердооксидных, – применение которых необходимо для питания, резервирования в процессе колебаний нагрузки и изменения выработки электроэнергии с помощью ВИЭ.

4. Мобильные подстанции для АПК с постоянным током

Для применения на объектах АПК постоянного тока целесообразно использовать мобильные модульные подстанции (ММП), соединенные КЛ взамен ВЛ, не только в силу большей пропускной способности, надежности, но и силу большей устойчивости к техногенным и природным воздействиям, мобильности контейнерных подстанций и улучшения экологии. Разработанный проект «Мобильный модульный комплекс жизнеобеспечения» (ММКЖ) [18] может обеспечить потребителей не только электричеством, но и теплом, холодом, технической и питьевой водой (для круглогодичного выращивания плодово-овощных культур, воздухоподготовки и регулируемого спектра освещения), а также позволяет перерабатывать отходы с целью получения биоудобрений. Для выращивания плодовоовощных культур необходимо с помощью гидропоники обеспечить питание корневой системы, поддерживать необходимые температуру и влажность воздуха, регулировать освещенность для фотосинтеза. Структурная схема ММКЖ из [14] приведена на рис. 5. Сдвоенными линиями показаны водяные и воздушные трубопроводы. Управляемый выпрямитель 4 присоединяется к выходу турбогенератора. Специфичным для АПК является модуль 8 переработки отходов для биоаккумулятора и биоудобрений, выделенных зеленым цветом.

Основными модулями ММКЖ являются управляемый выпрямитель 4 и модуль преобразования, накопления и распределения 2. На рис. 4 и 6 соответственно приведены однолинейные принципиальные

схемы модулей 4 и 2, причем модуль 4 встраивается в водородный энергомодуль 1 для передачи питания на модуль 2 биполярным силовым и оптическим кабелем 6.

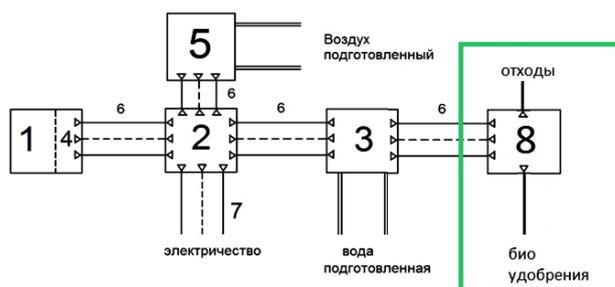


Рис. 5 – Структурная схема ММКЖ для АПК: 1 – водородный энергетический модуль (или биоаккумулятор) с турбогенератором; 2 – модуль преобразования, накопления и распределения электроэнергии; 3 – модуль водоподготовки; 4 – управляемый выпрямитель; 5 – модуль воздухоподготовки; 6 – биполярный кабель постоянного тока; 7 – трехфазный кабель переменного тока (или биполярный кабель постоянного тока); с дополнительным модулем 8 – переработка отходов
Fig. 5 – Structural diagram of the mobile modular life support system for agro-industrial complex: 1 – hydrogen energy module (or bioreactor) with a turbogenerator; 2 – power conversion, storage and distribution module; 3 – water treatment module; 4 – controlled rectifier; 5 – air treatment module; 6 – DC bipolar cable; 7 – three-phase AC cable, or a bipolar DC cable, with optional module; 8 – waste treatment

На рис. 6 приведена однолинейная принципиальная схема модуля преобразования, накопления и распределения 2, указанного на рис. 5.

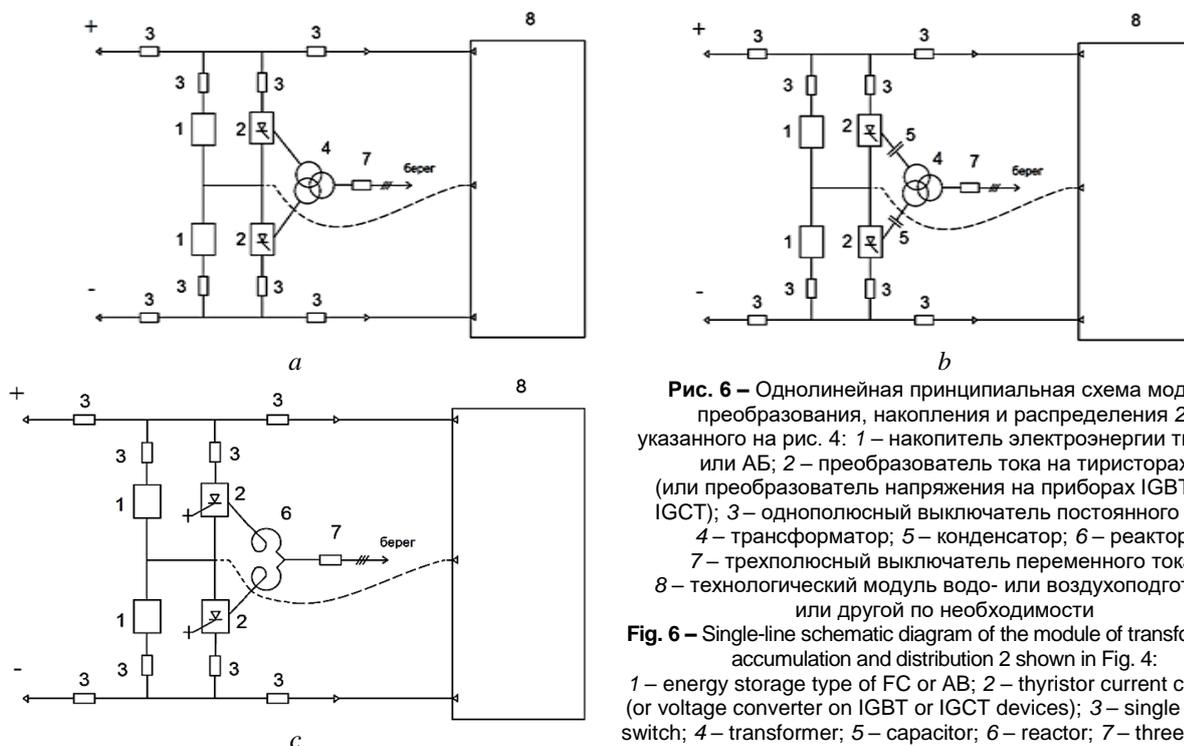


Рис. 6 – Однолинейная принципиальная схема модуля преобразования, накопления и распределения 2, указанного на рис. 4: 1 – накопитель электроэнергии типа ТЭ или АБ; 2 – преобразователь тока на тиристорах (или преобразователь напряжения на приборах IGBT или IGCT); 3 – однополюсный выключатель постоянного тока; 4 – трансформатор; 5 – конденсатор; 6 – реактор; 7 – трехполюсный выключатель переменного тока; 8 – технологический модуль водо- или воздухоподготовки или другой по необходимости
Fig. 6 – Single-line schematic diagram of the module of transformation, accumulation and distribution 2 shown in Fig. 4: 1 – energy storage type of FC or AB; 2 – thyristor current converter (or voltage converter on IGBT or IGCT devices); 3 – single pole DC switch; 4 – transformer; 5 – capacitor; 6 – reactor; 7 – three-pole AC switch; 8 – technological module for water or air treatment, or other as necessary

На рис. 4 схема *a* соответствует некомпенсированному преобразователю тока (ПТ) и в основном применяется для работы с синхронным генератором *I*; схема *b* – компенсированному преобразователю тока (КПТ) и приспособлена для работы с генератором *I* на постоянных магнитах с целью регулирования напряжения преобразователя напряжения (ПН) на шинах генератора; схема *c* – преобразователю напряжения и дает возможность работать с любым типом генератора *I*. Наличие трансформатора позволяет осуществлять гальваническую развязку и согласовывать по напряжению генератор и преобразователь. Применение ПН позволяет отказаться от трансформатора, но это примерно на 30 % дороже ПТ.

Схемы рис. 6 аналогичны рис. 4, но работают в инверторном режиме с большим потреблением реактивной мощности и отличаются установкой накопителей *I* вместо генераторов *I* на рис. 4. Если удаленные потребители используют переменный ток (например, при модернизации электроснабжения), то применяются схемы рис. 6. Если система электроснабжения создается вновь, то удаленные потребители могут получать постоянный ток непосредственно от шин накопителей *I* при отказе от инверторов 2, показанных на рис. 6. При наличии источников ВИЭ потребители могут подключаться к шинам накопителей *I* непосредственно через выключатели 3.

Для преобразователя тока (схема рис. 4, *ба*):

Выпрямленное DC-напряжение

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha \pm R_n I_d,$$

где U_{d0} – постоянное выпрямленное напряжение при холостом ходе; α – угол отпираания; R_n – сопротивление преобразователя тока; I_d – DC-ток; \pm – для инвертора и выпрямителя соответственно.

$$U_{d0} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} E_n,$$

где E_n – линейное напряжение,

$$R_n = \frac{3}{\pi} \omega L_n,$$

где L_n – индуктивность рассеяния трансформатора преобразователя тока; ω – частота.

Для преобразователя напряжения (схемы рис. 4, *bc*):

Выпрямленное напряжение

$$U_d = \frac{\sqrt{6}}{\pi} m E_n e^{-j\delta},$$

где m – коэффициент модуляции; δ – фазовый угол между напряжением преобразователя напряжения и переменным напряжением; E_n – линейное напряжение.

Биполярный кабель *b*, соединяющий водородный энергомодуль *1* (с модулем 4) и удаленный на любую длину без ограничения модуль 2 (см. рис. 5), должен иметь третий провод (показан пунктиром), который существенно повышает надежность энергоснабжения и обеспечивает безопасность при возникновении КЗ. Наличие биполярного кабеля постоянного тока *b* на выходе выпрямителя 4 позволяет минимизировать емкость конденсаторов на выходе выпрямителя и повысить надежность электроснабжения при аварии одного полюса выпрямителя или кабеля.

5. Заключение

Решение проблемы энергоснабжения села в значительной мере может быть решено путем разработки и применения систем автономного энергоснабжения (САЭ), которые могут работать как на переменном токе, так и на постоянном токе на линейку мощностей 0,1 МВт; 1 МВт; 10 МВт напряжением 0,4 кВ, 1 кВ и 6÷10 кВ соответственно. Если учитывать наиболее перспективные решения с использованием ВИЭ, то предпочтительными становятся САЭ на постоянном токе с накопителями электроэнергии. Применение постоянного тока оправдано повышением надежности электроснабжения, снижением потерь, прямой стыковкой потребителей с накопителями и ВИЭ, что для АПК важно из-за роста тарифов централизованного электроснабжения.

Рассмотрены различные варианты реализации САЭ с использованием нетрадиционных энергомодулей криогенного, водородного типов или биореакторов, а также традиционного типа в виде дизель-генераторов, газотурбинных и газопоршневых установок. Для АПК весьма перспективно применять КрЭУ, генерирующие электричество, тепло и холод, обладающие большим ресурсом, энергоэффективностью и относительно низкой стоимостью с использованием существующих комплектующих элементов. Сопоставление различных сред по энергоэффективности выявило преимущества использования водорода в ТЭ и жидкого азота в КрЭУ перед электрохимическими накопителями (ЛИА). Для применения на объектах АПК постоянного тока целесообразно применять ММП, соединенные КЛ взамен ВЛ. Структура ММП в виде мобильных комплексов жизнеобеспечения позволяет обеспечить потребителей не только электричеством, но и теплом, холодом, технической и питьевой водой, а для круглогодичного выращивания плодовоовощных культур – воздухоподготовкой и регулируемым спектром освещения.

Список литературы

[1] Об утверждении Стратегии устойчивого развития сельских территорий Российской Федерации на период до 2030 г.: распоряжение Правительства РФ от 2 февраля 2015 г. №151-р [Электронный ресурс]. – Ре-



жим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/420251273> – (Дата обращения: 12.06.2019).

[2] Филиппов, С.П. Потребление энергии сельскими территориями: сложившиеся тенденции и прогнозы: доклад академика РАН, директора ИНЭИ РАН от 21.03.19 / С.П. Филиппов // Заседание Совета по приоритету «Энергетика». – Москва, 2019. – С. 14.

[3] Лачуга, Ю.Ф. Проблемы энергетического обеспечения АПК: доклад академика РАН, академика-секретаря Отделения сельскохозяйственных наук РАН от 21.03.19. / Ю.Ф. Лачуга // Заседание Совета по приоритету «Энергетика». – Москва, 2019. – С. 10.

[4] Тихомиров, Д.А. Перспективные направления развития энергетической базы сельского хозяйства, роль и место распределенной энергетики в системе АПК: доклад член-корреспондента РАН, главного научного сотрудника от 21.03.19 / Д.А. Тихомиров // Заседание Совета по приоритету «Энергетика». – Москва, 2019. – С. 22.

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

[6] Шульга, Р.Н. Мультиагентные системы постоянного тока с использованием ВИЭ и водородных топливных элементов / Р.Н. Шульга, И.В. Путилова // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2019. – № 04–06. – С. 65–82.

[7] Водород – свойства, получение, хранение, транспортирование: Справочник // под ред. Д.К. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. – М.: Химия, 1989. – 672 с.

[8] Хрусталева, Д.А. Аккумуляторы / Д.А. Хрусталева. – М.: Изумруд, 2003. – 224 с.

[9] Кудрявцев, И.Н. Эффективное использование пневмодвигателя в автомобиле / И.Н. Кудрявцев [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2005. – № 2. – С. 82–90.

[10] Кутенев, В.Ф. Некоторые вопросы создания экологически чистого транспортного средства с криогенной силовой установкой / В.Ф. Кутенев [и др.] // Труды МАМИ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mospolytech.ru>. – С. 152–159. – (Дата обращения: 10.04.2019).

[11] Санников В. Продавцы воздуха [Электронный ресурс] / В. Санников // Популярная механика. – 2012. – № 116. – Режим доступа: <http://popmech.ru> (Дата обращения: 10.04.2019).

[12] Везируглу, Т.Н. Энергетическая система на основе термоядерного синтеза водорода [Электронный ресурс] / Т.Н. Везируглу // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 16–18. – С. 16–29. – Режим доступа: <https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.16-18.016-029>. – (Дата обращения: 10.04.2019).

[13] 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.

[14] Шульга, Р.Н. Арктика: экология и водородная электроэнергетика / Р.Н. Шульга, И.В. Путилова, А.Ю. Петров // Международный научный журнал «Альтернативная электроэнергетика и экология» (ISJAEE). – 2019. – № 04–06. – С. 65–82.

[15] Термическое обезвреживание отходов по гибридной технологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://enviro.su/tech/termicheskoe-obezvrezhivanie-othodov/>. – (Дата обращения: 10.04.2019).

[16] Енякин, В.П., Котлер В.Р. Технологический метод сокращения выбросов оксидов азота [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://leg.co.ug/arhiv/>. – (Дата обращения: 10.04.2019).

[17] Шамигулов, И.И. Перспективные мероприятия по сокращению выбросов оксидов азота в атмосферу от энергетических установок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://scienceforum.ru>. – (Дата обращения: 10.04.2019).

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

References

[1] Approving the Strategy for sustainable development of rural territories of the Russian Federation for the period till 2030: the decree of the Government of the Russian Federation of 2 February 2015. No. 151-p (Ob utverzhdenii Strategii ustoichivogo razvitiya sel'skikh territorii Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 g.: rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 2 fevralya 2015 g. no. 151-r) [E-resource]. Available on: <http://docs.cntd.ru/document/420251273> (06.12.2019).

[2] Filippov S.P. Energy consumption in rural areas: current trends and forecasts (Potreblenie energii sel'skimi territoriyami: slozhivshiesya tendentsii i prognozy). Meeting of the Council on priority “Energy”, Moscow, March 21, 2019; p. 14. (in Russ.).



- [3] Lachuga Yu.F. Problems of energy supply of agriculture (Problemy energeticheskogo obespecheniya APK). Meeting of the Council on priority "Energy", Moscow, March 21, 2019; p. 10. (in Russ.).
- [4] Tikhomirov D.A. Perspective directions of development of the energy base of agriculture, the role and location of distributed generation in the agricultural sector (Perspektivnye napravleniya razvitiya energeticheskoi bazy sel'skogo khozyaistva, rol' i mesto raspredelennoi energetiki v sisteme APK). Meeting of the Council for the priority "Energy", Moscow, March 21, 2019; p. 22. (in Russ.).
- [5] Rogalev N.D., Molodyuk V.V. Problems of developing the Russian electric power industry and ways to address them (Problemy razvitiya elektroenergetiki Rossii i puti ikh resheniya). XXVIII International Scientific and Technical Conference TRAVEK "Prospects for the development of electric power industry and high-voltage electrical equipment", November 7–8, 2018, Moscow (in Russ.).
- [6] Shulga R.N., Putilova I.V. Multi-agent direct current systems using renewable energy sources and hydrogen fuel cells (Mul'tiagentnye sistemy postoyannogo toka s ispol'zovaniem VIE i vodorodnykh toplivnykh elementov). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2019;(2):65–82 (in Russ.).
- [7] Hydrogen – properties, production, storage, transportation (Vodorod – svoistva, poluchenie, khranenie, transportirovanie). Handbook. Ed. D.K. Hamburg, N.F. Dubovkina. Moscow: Chemistry Publ., 1989; 672 p. (in Russ.).
- [8] Khrustalev D.A. Accumulators (Akkumulyatory). Moscow: Emerald Publ., 2003; 224 p. (in Russ.).
- [9] Kudryavtsev I.N. *et. al.* Effective use of the pneumatic motor in the car (Effektivnoe ispol'zovanie pnevmodvigatelya v avtomobile). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2005;2(22):82–90 (in Russ.).
- [10] 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 (Nekotorye voprosy sozdaniya ekologicheskogo transportnogo sredstva s kriogennoi silovoi ustanovkoi). *Works of MAMI*, pp. 152–159 [E-resource]. Available on: <http://mospolytech.ru> (04.10.2019).
- [11] Sannikov V. Sellers of air (Prodavtsy vozdukh). *Popular mechanics*, 2012;(116) [E-resource]. Available on: <http://popmech.ru> (04.10.2019).
- [12] Veziroglu T.N. Energy system based on thermonuclear synthesis of hydrogen (Energeticheskaya sistema na osnove termoyadernogo sinteza vodoroda). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2017;(16–18):16–29 (in Russ.).
- [13] 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.
- [14] Shulga R.N., Putilova I.V., Petrov A.Yu. The Arctic: ecology and hydrogen power engineering (Arktika: ekologiya i vodorodnaya elektroenergetika). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2019;(04–06):65–82 (in Russ.).
- [15] Thermal waste disposal by hybrid technology (Termicheskoe obezvrezhivanie otkhodov po gibridnoi tekhnologii) [E-resource]. Available on: <https://enviro.su/tech/termicheskoe-obezvrezhivanie-otkhodov/> (04.10.2019) (in Russ.).
- [16] Enyakin V.P., Kotler V.R. The Technological method of reducing emissions of nitrogen oxides [E-resource]. Available on: <http://leg.co.ug/arhiv/> (04.10.2019) (in Russ.).
- [17] Shamigulov I.I. Promising measures to reduce nitrogen oxide emissions into the atmosphere from power plants [E-resource]. Available on: <http://scienceforum.ru/> (04.10.2009) (in Russ.).
- [18] Shul'ga R.N., Stalkov P.M., Kokurkin M.P., Lavrinovich V.A. Mobile modular complex life support (Mobil'nyi modul'nyi kompleks zhizneobespecheniya). Application in Rospatent no. 2019101084 (01.10.2019) (in Russ.).

Транслитерация по BSI

