

ISSN 2413-5526

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Т. 6 № 3

**Севастополь
2020**

**Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь:
ФГАОУ ВО СевГУ, 2020. – Т. 6. - № 3. – 100 с.: ил.**

В научный журнал «Энергетические установки и технологии», включены статьи, посвященные актуальным вопросам современной энергетики. Журнал состоит из разделов: тепловые и ядерные энергетические установки, электротехнические комплексы и системы, экологическая безопасность, химические технологии атомных станций, информационные технологии в энергетике, моделирование физических процессов, физика в ядерной энергетике, автоматизация процессов контроля и управления, судовые энергетические установки, холодильные установки, гидравлические энергоустановки, компьютерная инженерия и техническая диагностика.

Предназначен для научных работников, инженеров и специалистов, работающих на предприятиях и в организациях энергетики, аспирантов и студентов технических вузов. Журнал выходит 4 раза в год.

Редакционная коллегия:

Качур С.А. (главный редактор), д.т.н., доцент;
Омельчук Ю.А. (заместитель главного редактора), к.х.н., доцент;
Черкашина Н.И. (ответственный секретарь), к.т.н., доцент;
Сафонов В.А., д.т.н., профессор; *Пухлий В.А.*, д.т.н., профессор;
Пучков В.Н., д.т.н., профессор; *Акимов А.М.*, д.т.н., профессор;
Федоровский К.Ю., д.т.н., профессор; *Олейников А.М.*, д.т.н., профессор;
Тимошенко А.И., д.т.н., профессор; *Карницкий А.Б.*, д.т.н., профессор;
Высоцкий В.Е., д.т.н., профессор; *Краснодубец Л.А.*, д.т.н., профессор;
Прибатурин Н.А., д.т.н., профессор; *Кирияченко И.А.*, к.т.н., профессор;
Магдыч Е.А., к.т.н., доцент; *Федорова С.А.*, к.пед.н., доцент;
Мирошниченко С.Т., к.т.н., доцент; *Свириденко И.И.*, к.т.н., доцент;
Матузаев К.Б., к.т.н., доцент; *Скидан А.А.*, к.т.н., доцент;
Углов А.В., к.т.н., доцент; *Шайтор Н.М.*, к.т.н., доцент;
Ерофеев В.А., к.т.н., доцент; *Ожиганова М.И.*, к.т.н., доцент;
Гусева Е.В., к.т.н., доцент; *Щекатурина Т.Л.*, д.х.н., доцент

Учредитель и издатель:

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».
ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053, Российская Федерация

Рекомендован к печати Ученым советом ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Тепловые и ядерные энергетические установки	5
<i>Зацаринная Т.Г., Аникевич К.П., Мацкевич Д.С.</i> Цифровое регулирование уровня конденсата греющего пара в подогревателе высокого давления	5
<i>Качур С.А.</i> Локализация внутриреакторных аномалий на основе анализа изменения формы энерговыделения для реактора типа ВВЭР	12
<i>Качур С.А.</i> Прогнозирование энерговыделения активной зоны на основе анализа процесса кипения в каналах ядерного реактора типа ВВЭР	18
Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии	23
<i>Гурьев В.В., Какушина Е.Г., Небесный В.В., Найдук М.Р., Асанов А.Б.</i> Оценка потенциала развития возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме Республики Крым и г. Севастополя	23
<i>Зайченко В.М., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Жиганов И.Г., Ильин А.А.</i> Проблемы развития биоэнергетики в России	30
<i>Кочетов И.А., Старченко М.А., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Калиев Р.Г.</i> Применение фотоэлектрических панелей нового поколения для увеличения эффективности работы солнечных установок	35
<i>Майорова Ю.А., Михайленко Е.А., Путилин К.П., Смокталь Н.Н.</i> Обзор гибридных фотоэлектрических и ветровых энергетических систем	40
<i>Майорова Ю.А., Путилин К.П., Рендова В.С., Смокталь Н.Н.</i> Интеллектуальные способы увеличения эффективности фотоэлектрических и ветровых электростанций	50
Электротехнические комплексы и системы	60
<i>Завирюха В.И., Ставиного С.В., Кувшинов В.В., Решетникова Т.В., Соломоненко А.В.</i> Использование модулей Пельтье в солнечной энергетике	60
<i>Канов Л.Н.</i> Оптимизация режима асинхронного валогенератора в судовой электроэнергетической системе	64
<i>Смирнов В.В., Скидан А.А., Джемилев Э.Р.</i> Применение резонансного метода передачи электроэнергии	71
<i>Туленков С.С., Кочетов И.А., Тунда В.А., Кувшинов В.В., Пивень Ю.Я.</i> Оценка состояния и перспективы развития солнечной энергетики в Республике Крым	76
Химические технологии	82
<i>Зайченко В.М., Жиганов И.Г., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Найдук М.Р.</i> Использование гелиоустановок для сушки биомассы в процессе получения синтез-газа	82
<i>Корнеева Н.К., Пичугова Л.Н., Скрыбина Е.В., Глушкова Е.В., Ядров А.В.</i> Основы технической теории упругопластичного изгиба балок, выполненных из материалов, по-разному реагирующих на растяжение и сжатие	88
<i>Черкашина Н.И.</i> Определение оптимальных условий использования радиационно-защитного материала композита на основе WC	93

CONTENTS

Thermal and nuclear power plant	5
<i>Zatsarinnaya T.G., Anikevich K.P., Matskevich D.S.</i> Digital level governor of steam condensate in the high pressure exchanger	5
<i>Kachur S.A.</i> Localization of intra-reactor anomalies based on the analysis of changes in the form of energy release for a VVER-type reactor	12
<i>Kachur S.A.</i> Prognostication of active zone release based on the analysis of the boiling process in the channels of a VVER type nuclear reactor	18
Alternative and renewable energy sources	23
<i>Guryev V.V., Kakyshina E.G., Nebesnii V.V., Nayduk M.R., Asanov A.B.</i> Assessment of the potential for development of renewable energy sources in the energy system of the Republic of Crimea and Sevastopol	23
<i>Zaychenko V.M., Kuvshinov V.V., Kakyshina E.G., Zhiganov I.G., Ilyin A.A.</i> Problems of bioenergy development in Russia	30
<i>Kochetov I.A., Starchenko M.A., Kuvshinov V.V., Kakyshina E.G., Kaliev R.G.</i> The use of new generation solar panels to improve the environmental situation	35
<i>Majorova Ju.A., Mihajlenko E.A., Putilin K.P., Smoktal N.N.</i> Overview of hybrid photovoltaic and wind power systems	40
<i>Majorova Ju.A., Putilin K.P., Rendova V.S., N.N. Smoktal V.S.</i> Smart ways to increase the effectiveness of photovoltaic and wind power plants	50
Electrotechnical complexes and systems	60
<i>Zaviryukha V.I., Stavinoga S.V., Kuvshinov V.V., Reshetnikova T.V., Solomonenko A.V.</i> Using Peltier module in solar power	60
<i>Kanov L.N.</i> Optimization of the regime of Asynchronous shaftgenerator in the Ship electroenergy system	64
<i>Smirnov V.V., Skidan A.A., Dzhemilev E.R.</i> Application of the resonance method of electric power transmission	71
<i>Tulenkov S.S., Kochetov I.A., Tunda V.A., Kuvshinov V.V., Piven U.Y.</i> Assessment of the state and prospects of solar energy development in the Republic of Crimea	76
Chemical technology of nuclear power plants	82
<i>Zaychenko V.M., Zhiganov I.G., Kuvshinov V.V., Kakyshina E.G., Nayduk M.R.</i> Use of solar installations for drying biomass in the process of synthesis gas production	82
<i>Korneeva N.K., Pichugova L.N., Skryabina E.V., Glushkova E.V., Yadrov A.V.</i> Fundamentals of the technical theory of elastic plastic bending of beams made of materials that react differently to tension and compression	88
<i>Cherkashina N.I.</i> Determination of optimal conditions for the use of radiation-protective composite material based on	93

ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК 621.184.4

Цифровое регулирование уровня конденсата греющего пара в подогревателе высокого давления

Т.Г.Зацаринная, К.П. Аникевич, Д.С. Мацкевич

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, biochip@mail.ru, anikonst@mail.ru, dmatsk@gmail.com

Статья поступила 31.08.2020 г.; после доработки 03.09.2020 г.

Аннотация

Развитие атомной энергетики потребовало создания реакторных установок с повышенными характеристиками безопасности, высокими значениями КПД и тепловой мощности. Повысить КПД реакторной установки возможно при использовании регенеративного подогрева питательной воды, осуществляемого в подогревателях высокого и низкого давления. Основной тип регенеративных подогревателей высокого давления (ПВД), применяемых на АЭС с реактором ВВЭР 1000 – это поверхностные теплообменники. ПВД является сложным многомерным и многосвязным объектом, для регулирования параметров которого применяются автоматические регуляторы, выполненные на различных технических средствах автоматизации. В данной статье рассматривается цифровое регулирование уровня конденсата греющего пара в ПВД, реализованное на базе выносного локального регулятора.

Ключевые слова: реакторная установка, регенеративный подогреватель, уровень, конденсат, поверхность нагрева, регулятор, микроконтроллер.

Digital level governor of steam condensate in the high pressure exchanger

T.G.Zatsarinnaya, K.P. Anikevich, D.S. Matskevich

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, biochip@mail.ru, anikonst@mail.ru, dmatsk@gmail.com

Received 31.08.2020 y.; received in final form 03.09.2020 y.

Abstract

The creation of reactor plants with increased safety features, high values of efficiency and thermal power were required by the development of nuclear power. It is possible to increase efficiency of the reactor plant using regenerative heating of feed water which carrying out inside of high and low pressure exchangers. Usually the surface heat exchangers used in the NPP with WWPR 1000. The high pressure exchanger is considered to be a complex multidimensional and multi-connected control object in which control parameters carrying out by automatic governor. Such governors are built on base of various automation technical facilities. The digital level governor of steam condensate in the high pressure exchanger built on base of portable local governor is presented in this article as an example.

Keywords: reactor plant, regenerative heater, level, condensate, heating surface, regulator, microcontroller.

Введение

В последние годы была поставлена задача – увеличить к 2020 году долю атомной генерации в энергобалансе страны до 22 % и более. Для ее

решения предусмотрено масштабное строительство АЭС третьего поколения на базе реакторов ВВЭР с повышенным уровнем безопасности.

Проведенные за эти годы исследования позволили создать реакторную установку ВВЭР-

1000 с повышенными характеристиками безопасности, высокими значениями КПД и тепловой мощности (до 3200 МВт) [1].

Значительное и легко достижимое увеличение термического КПД реакторной установки возможно при использовании регенеративного подогрева питательной воды, при этом, КПД будет возрастать с увеличением числа ступеней регенерации, что подтверждено результатами исследований, приведенных в источнике [2].

В современных турбинных установках общее число регенеративных подогревателей составляет 4...8. Обычно число подогревателей низкого давления (ПНД) - не более пяти, а число подогревателей высокого давления - не более трех. Это связано с тем, что дальнейшее увеличение их количества не способствует улучшению тепловой экономичности, а капиталовложения возрастают при этом линейно.

Основной тип регенеративных подогревателей высокого давления – это поверхностные теплообменники. В настоящее время выработан ряд требований к регенеративным подогревателям поверхностного типа. Во-первых, это герметичность, но в тоже время, должна быть обеспечена возможность доступа к отдельным узлам для технического обслуживания подогревателя. Во-вторых, давление греющего пара в ПВД должно быть ниже давления питательной воды для предотвращения вскипания нагреваемой среды и гидравлических ударов в поверхностях нагрева. В-третьих, конструкция подогревателей должна обеспечивать компенсацию температурных изменений всех элементов и максимальную скорость их прогрева. Должны быть обеспечены также возможность дренирования всех полостей подогревателя и условия максимального использования теплоты греющего пара. В дополнение к вышесказанному, ПВД должен быть оборудован системой автоматического поддержания уровня конденсата греющего пара в его корпусе и системой защиты.

Регулирование уровня конденсата греющего пара (КГП) в ПВД имеет большое значение, поскольку превышение его уровня в корпусе подогревателя выше номинального значения нежелательно по многим причинам. Прежде всего, при повышении уровня уменьшается поверхность конденсации пара, и, следовательно, эффективность подогрева питательной воды снижается. Кроме того, уровень конденсата может подняться до места отсоса паровоздушной среды из подогревателя, что нарушит интенсивность отсоса, приведет к повышению парциального

давления воздуха, уменьшению коэффициента теплопередачи. Наличие большого количества КГП в корпусе подогревателя может вызвать его вскипание и аварийный заброс пароводяной смеси в проточную часть турбины при аварийной разгрузке турбогенератора, из-за резкого снижения давления в отборах и недостаточно быстром закрытии клапана на паропроводе отборов.

При снижении уровня конденсата возможен проскок пара вместе с конденсатом греющего пара, что в итоге сказывается на экономичности энергоблока. Поэтому задача регулирования уровня в ПВД является актуальной и решение ее рассматривается в данной статье.

Регулирование поверхностного теплообменника.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема ПВД поверхностного типа.

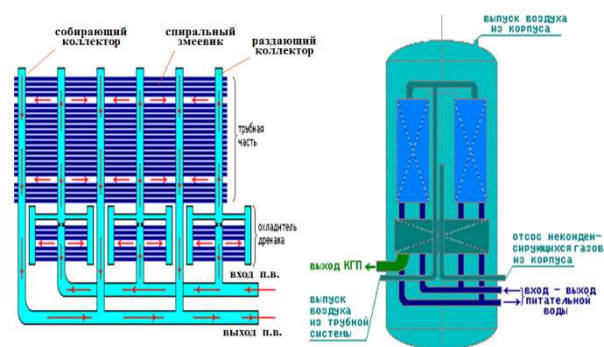


Рис. 1. Принципиальная схема теплообменника.

Основными узлами подогревателя являются корпус и трубная система. Поверхность нагрева подогревателя условно делится на зону конденсации пара (спирали зоны конденсации пара) и зону охлаждения его конденсата (спирали охладителя дренажа), которые являются участками общей трубной системы теплообменника. Спирали расположены горизонтально и собраны в шесть вертикальных колонн. Концы спиралей приварены к трем раздающим и собирающим вертикальным коллекторным трубам [3].

Питательная вода поступает в подогреватель снизу через трубу и с помощью спирального тройника подводится к раздающим коллекторным трубам, в которых установлены диафрагмы, разделяющие основной поток питательной воды на два.

Один поток идет по спиральям зоны охлаждения конденсата и потом встречается со вторым потоком, который прошел через отверстия в

диафрагмах.

Далее оба потока питательной воды проходят по спиральным зонам конденсации греющего пара и поступают в собирающие коллекторные трубы, откуда через спиральный тройник поступают в выходной патрубок подогревателя.

Греющий пар подводится в верхнюю часть корпуса подогревателя через трубу и поступает к поверхности нагрева зоны конденсации, распределяясь по всей ее высоте.

В зоне конденсации греющего пара через ряд плоскостей спиральных труб установлены конденсатоотводящие устройства, являющиеся одновременно направляющими листами для организации движения потока пара в этой зоне.

Конденсат греющего пара, стекающий со спиральных труб, направляется от центра к периферии, то есть в сторону корпуса и далее в его нижнюю часть, где расположена зона охлаждения конденсата.

Поверхность зоны охлаждения конденсата располагается в специальном кожухе, в котором с помощью системы промежуточных перегородок в межтрубном пространстве создается организованное движение потока конденсата. Слив конденсата греющего пара осуществляется с помощью трубы.

Для выпуска воздуха при заполнении трубной системы подогревателя в одной из коллекторных труб установлена труба, которая выводится за пределы корпуса подогревателя через выходной патрубок подогревателя.

Учитывая конструктивные особенности ПВД, принимаем, что температура жидкой и паровой фаз в ПВД одинакова [4, 5].

Все существенные факторы, влияющие на процесс теплообмена в ПВД, разбиваются на следующие группы:

- основные возмущающие воздействия: расход питательной воды; температура питательной воды; давление пара отборов; уровень конденсата;
- регулирующее воздействие - расход конденсата F_k ;
- неконтролируемые возмущения - потери в окружающую среду, зависящие от температуры наружного воздуха Δv .

Регулирование уровня КГП в ПВД осуществляется по трем каналам: расхода конденсата, уровня конденсата и давления пара (рис. 2).

Передаточные функции линейного регуля-

тора уровня по трем каналам описываются уравнениями вида:

$$W_K = K_K \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{II} \cdot S}\right)$$

$$W_L = K_L \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{II} \cdot S}\right)$$

$$W_P = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{II} \cdot S}\right)$$

где K_K, K_L, K_P – коэффициенты по усилению регулятора по каналам регулирования соответственно расхода конденсата, уровня конденсата и давления пара;

T_{II} – постоянная времени интегрирования.

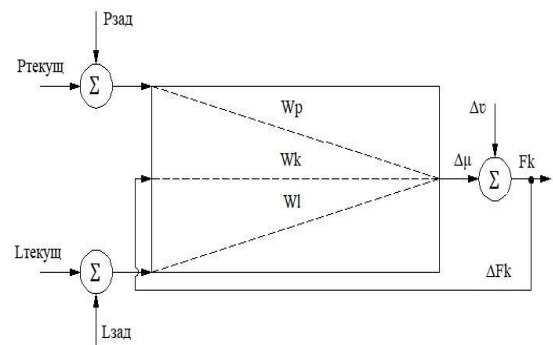


Рис. 2. Параметрическая схема ПВД.

Отклонение расхода конденсата ΔF_k представляет собой алгебраическую сумму регулирующего и возмущающих воздействий и определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta F_k = & W_p (P_{текущ} - P_{зад}) + \\ & + W_L (L_{текущ} - L_{зад}) + \\ & + W_k (F_{текущ} - F_{зад}) + \Delta v \end{aligned}$$

где $P_{текущ}, P_{зад}$ – текущее и заданные значения давлений греющего пара;

$L_{текущ}, L_{зад}$ – текущее и заданные значения уровня КГП в ПВД;

$F_{текущ}, F_{зад}$ – текущее и заданные значения расхода КГП из ПВД.

Поддержание заданного значения уровня КГП в корпусе ПВД действующих АЭС осуществляется автоматически, реализация авторегулятора уровня возможна на различных технических средствах автоматизации (ТСА). Так,

двигателем может осуществляться дистанционно (переключатель БУ-21 в положении «Р») воздействием на кнопки «больше» или «меньше» блока управления. Управляющим сигналом в данном режиме является напряжение 24 В, формируемое в блоке У23.

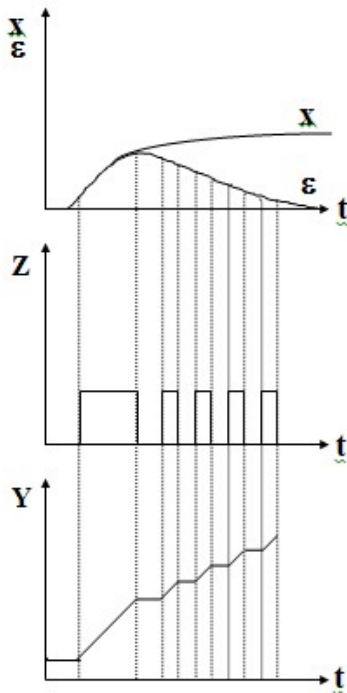


Рис. 4. Импульсное управление электродвигателем в соответствии с П-законом регулирования.

В положениях выходного вала электропривода, соответствующих полностью открытому или полностью закрытому состоянию регулирующего органа, цепи управляющих сигналов блокируются соответствующими концевыми выключателями.

Информация по положению вала ИМ формируется блоком сигнализации положения (БП10, БД10) в виде сигнала значением от 0 до 5 мА, который через устройства защиты от разрыва цепи токового сигнала (ВО1) поступает на индикатор положения (блок В12 со шкалой, отградуированной от 0 до 100 %) и, при необходимости, на вход регулирующего устройства.

Регулятор уровня, реализованный на аппаратуре «Каскад 2» для современных реалий производства является устаревшим оборудованием, как альтернатива данному аналоговому регулятору - цифровые регуляторы (ЦР), разработанные на базе таких технических средств как ТСА 2002М, ТПТС [6].

Контур регулирования уровня КГП в ПВД,

может быть реализован на базе выносного локального регулятора (ВЛР), в дополнение к которому в него входят также датчик уровня, задающее устройство; пускатель бесконтактный реверсивный; блок сигнализации положения токовый; блок питания; указатель положения и механизм электрический однооборотный.

Выносной локальный регулятор обладает гибкой концепцией программного обеспечения, что позволяет конфигурировать цепи регулирования без изменения аппаратных средств регулятора.

Архитектура цифрового регулятора уровня КГП в ПВД

Цифровые регуляторы уровня КГП в корпусе ПВД, реализованные на базе ВЛР (рис. 5), поддерживают номинальный уровень конденсата греющего пара в корпусе ПВД, обеспечивают номинальную производительность системы подогрева питательной воды, не допуская излишнего затопления поверхности трубчатки подогревателей, воздействуя на клапан на линии стока конденсата соответствующего ПВД [7].

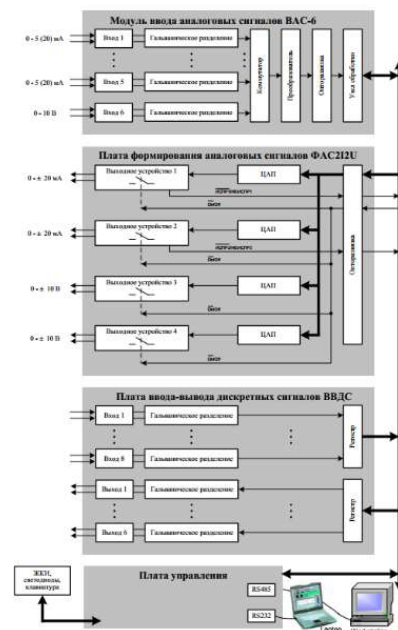


Рис. 5. Структурная схема цифрового регулятора.

Основными конструктивными элементами ВЛР являются: модуль ввода аналоговых сигналов (ВАС-6); плата формирования аналоговых сигналов ФАС212U; плата ввода-вывода дискретных сигналов ВВДС, плата управления.

Основные функциональные узлы модуля

ВАС-6 находятся под управлением микроконтроллера (МК). После включения питания МК начинает работу по программе, записанной во внутреннем постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ). Изначально МК переходит к выполнению программ начального тестирования и начальной калибровки. Если тест не пройден, что выясняется при получении калибровочных значений напряжений источника опорных напряжений, выходящих за пределы допустимых значений, МК не выходит из состояния самотестирования и формируется признак неисправности модуля.

При корректном тестировании и калибровке по величине измеренных значений калибровочных сигналов опорного напряжения МК вычисляет коэффициент передачи аналоговой части модуля (аддитивную и мультипликативную погрешность, приведенную к выходу ПНЧ). Этот коэффициент в дальнейшем используется для вычисления истинного значения входных сигналов.

Правильность выполнения программ обработки данных в режиме измерения проверяется программно-аппаратным путем. Раз в семь циклов измерения МК формирует сигнал подтверждения работоспособности модуля ВАС-6 и посылает его в узел контроля работоспособности. При отсутствии этого сигнала в течение определенного времени, узел контроля аппаратно (с помощью сигнала "RESET") переводит МК на программу начального тестирования.

Следующая конструктивная единица в составе ВЛР - плата формирования аналоговых сигналов ФАС2I2U, предназначена для независимого формирования по каждому каналу сигналов постоянного тока в диапазоне от 0 до ± 20 мА на нагрузке с сопротивлением не более 500 Ом (каналы I1 и I2) и сигналов напряжения постоянного тока в диапазоне от 0 до ± 10 В на сопротивлении нагрузки не менее 2 кОм (каналы U1 и U2). Плата формирует сигналы на регистрирующие и/или показывающие устройства для регистрации и/или контроля заданных параметров процесса регулирования. Все каналы платы гальванически отделены от остальных цепей регулятора, а каналы I1, I2 гальванически отделены друг от друга и от каналов U1, U2. Во всех каналах используются двенадцатиразрядные цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), один разряд которых отведен под знак.

Сигналы от датчиков с беспотенциальными контактами, шунтированными резисторами, вводятся в плату ВВДС, кроме того, плата используется для формирования дискретных сигналов по

сигналам управления с межплатного интерфейса.

Плата управления является своеобразным «пунктом управления» ВЛР, поскольку в своем составе содержит узлы связи с клавиатурой, резервным регулятором, портами, жидкокристаллическим индикатором (ЖКИ), межплатным интерфейсом. МК данной платы выполняет алгоритмы работы регулятора и алгоритмы работы с клавиатурой ЖКИ, обеспечивает процессы обмена информацией по межплатным интерфейсам.

Работа регулятора возможна в автоматическом, дистанционном режиме управления, а также в режиме технического обслуживания и обеспечивается базовым и прикладным программным обеспечением (БПО и ППО). БПО объединяет компоненты, слабо зависящие от конфигурации регулятора, и обеспечивает конфигурирование, настройку и контроль исправности регулятора. ППО содержит программно-алгоритмические модули, реализующие алгоритмы функционирования регулятора.

Заключение

Применяемые на АЭС ПВД - поверхностные теплообменники являются сложными многомерными и многосвязными объектами. Уровень конденсата греющего пара, есть единственная регулируемая величина в корпусе ПВД и заданное значение этого параметра поддерживается автоматически. Регулирование уровня КГП в ПВД осуществляется по трем каналам: расхода конденсата, уровня конденсата и давления пара. В данной статье представлены два варианта регуляторов уровня в ПВД, в аналоговом и цифровом исполнении. Цифровой регулятор уровня КГП в ПВД реализован на базе выносного локального регулятора, обладающего гибкой концепцией программного обеспечения, что позволяет конфигурировать цепи регулирования без изменения аппаратных средств регулятора. В связи с этим, он может быть использован как средство автоматизации различных промышленных объектов, а также при модернизации устаревшего или отработавшего свой ресурс оборудования.

Список литературы

1. Андрущечко С.А. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта / С.А.Андрущечко, А.М. Афров, Б.Ю. Васильев и др. - М.: Логос, 2010. - 604 с.
2. Маргулова Т. Х. Атомные электрические станции / Т. Маргулова. - 2-е изд. - М.: Мир, 1983. -

479 с.

3. Марушкин В.М. Подогреватели высокого давления ТЭС и АЭС/ В.М. Марушкин С.С. Иващенко, Б.Ф. Вакуленко. – М.: Энергоиздат, 1983. -135 с.
4. Демченко В.О. Автоматизация та моделювання технологічних процесів АЕС та ТЕС. — Одеса: Астроприн. — 2001. — 308 с.
5. Атрошенко Ю.К. Автоматизированные системы управления АЭС/ Ю.К. Атрошенко, Е.В. Иванова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 81 с.
6. ИЭ. Системы автоматического регулирования и дистанционного управления.
7. Аникевич К.П. Автоматическое регулирование технологических параметров. — Севастополь: СНУЯЭиП. — 2008. — 336 с.
8. Руководство по эксплуатации. Выносной локальный регулятор. АВБП.421243.017.
9. ГОСТ 29075-91 Системы ядерного приборостроения для атомных станций. Общие требования.

References

1. Andrushechko S.A., Afrov B. Yu. *AES s reaktorom tipa VVER-10000. Ot fizicheskikh osnov ekspluatatsii do evolutsii proekta.* [NPP with a WWER-1000. From the physical foundations of operation to the evolution of a project]. Moscow, Logos, 2010, 604 p.
2. Marguova T. Kh. *Atomnye elektricheskie stanstii.* [Nuclear power plants.]. Moscow, Mir, 1983, 479 p.
3. Marushkin V.M., Ivashchenko S.S., Vakulenko B.F. *Podogrevateli vysokogo davleniya TES i AES.* [High pressure exchangers of TPP and NPP]. Moscow, Energoizdat, 1983, 135 p.
4. Demchenko V.O. *Avtomatizatsiya i modelirovanie tekhnologicheskikh protsesov AES i TES.* [Automation and modeling of technological processes of NPP and TPP]. Odessa, Astroprin, 2001, 308 p.
5. Atroshenko Yu.K., Ivanova E.V. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya AES.* [Automatic control systems of NPP.]. Tomsk, Tomskiy politekhnicheskii universitet, 2014, 81 p.
6. IE. *Sistemi avtomaticheskogo regulironaniya i distantcionnogo upravleniya.* [M. The system automatic control and remote control.]
7. Anikevich K.P. *Avtomaticheskoe regulirovanie tekhnologicheskikh parametrov.* [Automatic control of technological parameters]. Sevastopol, SNUYE and P, 2008, 336 p.
8. *Rukovodstvo po ekspluatatsii. Vinosnoy lokalniy regulyator.* AVBP. 421243.017. [Manual. Portable local governor. AVBP. 421243.017].
9. *GOST 29075-91 Sisemi yadernogo priborostroeniya dlya atomnich stanstii. Obshchie trebovaniya.* [State Standart 29075-91 The system of nuclear instrument making for nuclear power stations. General requirements.]

УДК 621.039.56

Локализация внутриреакторных аномалий на основе анализа изменения формы энерговыделения для реактора типа ВВЭР

С.А. Качур

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, kachur_62@mail.ru

Статья поступила 02.09.2020 г.; после доработки 04.09.2020 г.

Аннотация

Предложенные методы выявления несоответствия формы энергораспределения эталонному в радиальном и аксиальном направлениях. Рассмотрено применение критерия Стьюдента для проверки эквивалентности формы распределения температуры и тепловой мощности в аксиальном направлении с целью выявления запаривания каналов активной зоны.

Ключевые слова: ядерный реактор, форма энерговыделения, дисперсионный анализ, критерий Стьюдента, внутриреакторные аномалии, локализация.

Localization of intra-reactor anomalies based on the analysis of changes in the form of energy release for a VVER-type reactor

S.A. Kachur

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru

Received 02.09.2020 y.; received in final form 04.09.2020 y.

Abstract

The proposed methods for identifying the discrepancy between the form of energy distribution and the reference one in the radial and axial directions. The application of the Student criterion to check the equivalence of the form of temperature and heat power distribution in the axial direction in order to identify the steaming of the core channels is considered.

Keywords: nuclear reactor, form of energy release, dispersion analysis, Student criterion, intra-reactor anomalies, localization

Введение

Теория безопасности АЭС является краеугольным камнем развития атомной энергетики. Если ее общие понятия известны давно, то вопросы анализа и синтеза безопасности по различным критериям, методы прогнозирования, локализации и предотвращения аварийных ситуаций, обобщение знаний о конкретных авариях еще формируются [1, 2].

Несмотря на все предусмотренные меры, направленные на предотвращение аварий, во время эксплуатации АЭС не исключена вероятность их возникновения [1-3]. По этой причине

проектом АЭС предусмотрены специальные средства и системы, позволяющие прекратить развитие аварий или уменьшить их последствия.

Наиболее опасной аварией для РУ АЭС является авария с выходом радиоактивных веществ.

В ядерном реакторе имеется возможность возникновения условий, при которых происходят превышения установленного уровня мощности или превышения скорости разгона. Опасность кризиса теплообмена общеизвестна – пережог защитной оболочки вследствие резкого увеличения температуры поверхности нагрева

оболочки твэла с последующим выходом продуктов деления в контур [1].

Для реакторов типа ВВЭР представляет опасность кризис теплообмена первого рода, который обусловлен переходом пузырькового кипения в пленочное и наблюдается, как правило, при довольно высоких удельных тепловых потоках. Характерной величиной в данном случае является критический тепловой поток, определение которого при различных условиях представляет практический интерес [1].

В динамике проявление кризиса первого рода наиболее вероятно в ситуациях, связанных с превышением локального либо интегрального энерговыделения по активной зоне реактора. Проявление кризиса первого рода возможно также в случае снижения расхода теплоносителя.

В общем случае необходимые сигналы и уставки срабатывания АЗ обосновываются расчетными и экспериментальными исследованиями и зависят от типа реактора. Часто параметры, определяющие безопасность реакторной установки, невозможно прямо измерить.

К таким параметрам относятся: температура топлива и оболочек, положение наиболее «горячей» точки, место закипания и т.д. В этом случае необходимо на основании физических и теплотехнических расчетов определить безопасные области изменения измеряемых параметров, а также уставки АЗ для каждого из этих параметров.

Решение проблемы безопасности управления сложными объектами, в том числе и атомными энергетическими установками (АЭУ), возможно лишь на основе всего многообразия подходов и методов анализа и синтеза, которые предоставляет общая теория систем [4].

В статье предлагается использовать дисперсионный анализ для проверки соответствия формы энергораспределения описанию функцией косинуса в радиальном направлении и функцией синуса в аксиальном направлении.

Кроме того, определена возможность локализации «горячих» точек по объему активной зоны при помощи критерия Стьюдента. Рассматривается применение критерия для проверки статистической гипотезы о равенстве средних значений для сравнения формы распределения температуры и тепловой мощности в активной зоне реактора в аксиальном направлении. Таким образом может быть решена задача локализации каналов, в которых начинается процесс поверхностного

кипения [5].

Цель и задачи исследования

Цель исследования – локализация внутриреакторных аномалий на основе анализа форм распределения энерговыделения как радиальном, так и аксиальном направлениях с использованием методов прикладной статистики.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести анализ методик расчета мощности и распределения энерговыделения;
- 2) исследовать возможности статистического анализа для решения задачи контроля формы энергораспределения;
- 3) разработать методы локализации внутриреакторных аномалий.

Анализ методик расчета мощности и распределения энерговыделения

Исходными данными для дисперсионного анализа будет являться информация, полученная от СВРК. В статье рассматривается использование однофакторного дисперсионного анализа для определения отклонения формы энергораспределения и выявления возможных аномалий процесса теплообмена как радиальном, так и аксиальном направлениях. В первом случае предполагается использование расчета мощности через энтальпии теплоносителя, во втором – по сигналам ДПЗ.

Приведем соответствующие формулы расчета.

Тепловая мощность реактора по параметрам I контура определяется формулой

$$N_I = \sum_{j=1}^4 D_j G_j (i_{Ij} - i_{xj}) + N_0^I, \quad (1)$$

$$i_j = i_0 [1 + b_1 (T_j - T_0) + b_2 (T_j - T_0)^2],$$

где N_0^I , D_j – постоянные коэффициенты, которые служат для учета систематических погрешностей при расчете тепловой мощности; G_j – расход теплоносителя через j -ю петлю первого контура; i_{Ij} и i_{xj} – энтальпии теплоносителя в горячей и холодной нитке j -й петли первого контура; i_0 , b_1 , b_2 , T_0 – постоянные коэффициенты; T_j – температура теплоносителя в горячей или холодной нитке петли I контура

Тепловая мощность реактора по сигналам

ДПЗ определяется по формуле

$$N_{\text{ДПЗ}} = A^{\text{ДПЗ}} \frac{\sum_{i=1}^{64} \sum_{j=1}^7 q_{ij}}{448 - m}, \quad (2)$$

где m – число отбракованных ДПЗ, для которых q_{ij} принято равным нулю; $A^{\text{ДПЗ}}$ – постоянный коэффициент, который периодически пересчитывается в вычислительном комплексе.

Ход энерговыделения по пространству большого энергетического реактора представляет собой неоднородное случайное распределение с изменяющимся математическим ожиданием, которое определяется:

- общим ходом энерговыделения,
 - случайными отклонениями.
- Общий ход энерговыделения, обусловлен:
- размерами реактора,
 - усредненным распределением топливной загрузки,
 - распределением органов регулирования.
- Случайные отклонения, связанные с:
- разбросом технологических параметров плотителей и тепловыделяющих элементов,
 - квазислучайными отклонениями, которые вызваны различными местными неоднородностями.

В связи с этим контролировать подобное распределение энерговыделения реактора дискретной системой внутриреакторных детекторов по так называемой релейной системе контроля можно лишь в частных случаях.

В настоящее время для расчета распределения энерговыделения используются методики, которые базируются на интерполяции значений реперных точек с последующим введением соответствующих поправок. Имеются две методики дискретного контроля распределения энерговыделения: эмпирическая и расчетно-экспериментальная. Первая основана на использовании эмпирических соотношений, полученных экспериментально, вторая использует результаты физического расчета и дискретных измерений.

В процессе работы ядерной установки наблюдаются старение, износ и усталостные разрушения элементов активной зоны и оборудования, которые приводят к снижению эксплуатационной надежности и уменьшению запасов прочности, в связи с чем, могут появиться отказы, обусловленные разрушениями напряженных элементов. Кроме того, при пуске реактора не исключены различные отклонения от проектных

и конструкционных параметров, что может привести также к нарушению целостности контура.

Исследование возможностей статистического анализа для решения задачи контроля формы энергораспределения

В работе для решения поставленных задач предлагается использовать однофакторный дисперсионный анализ и критерий Стьюдента проверки статистических гипотез для двух выборок.

Рассмотрим возможности этих методов.

При проведении однофакторного дисперсионного анализа часто необходимо оценить влияние на целевую функцию y качественного фактора x .

Модель зависимости целевой функции от уровней факторов можно представить в следующем виде

$$y_{jk} = \mu + \alpha_j + \varepsilon_{jk}, (j = 1, 2, \dots, u; k = 1, 2, \dots, m_j), \quad (3)$$

где μ – общее среднее, α_j – отклонение от общего среднего для j -го уровня фактора, ε_{jk} – случайная составляющая.

Оценивание значимости влияния фактора x выполняется по F -критерию Фишера, для чего формируется следующее F -отношение:

$$F = \frac{s_x^2 \{y\}}{s_\varepsilon^2 \{y\}}. \quad (4)$$

где $s_x^2 \{y\}$ – оценка дисперсии «между группами», определяемыми уровнями x_j ; $s_\varepsilon^2 \{y\}$ – выборочная оценка дисперсии «внутри групп», вычисляемая как средняя оценка по всем u группам.

Фактор x признается незначимым, если соответствующее F -отношение оказывается меньше критического, выбранного из таблиц для принятого уровня значимости α и числа степеней свободы сравниваемых дисперсий.

Рассмотрим использование критерия Стьюдента (t -критерия) для проверки гипотезы однородности выборочных средних для двух выборок

$$H_0: a_1 = a_2$$

$$1) x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n_1}$$

$$2) x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n_2}$$

с оценками параметров $\bar{x}_1(n_1)$, $\bar{x}_2(n_2)$ – средними арифметическими наблюдений соответственно первой и второй выборки, $\bar{s}^2(n_1)$, $\bar{s}^2(n_2)$ –

выборочными дисперсиями соответственно первой и второй выборки.

Критерий основан на критической статистике

$$\hat{t}(n_1 + n_2 - 2) = \frac{\bar{x}_1(n_1) - \bar{x}_2(n_2)}{\bar{s} \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}}, \quad (5)$$

$$\bar{x}_i(n_i) = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} \quad (i=1,2), \quad (6)$$

$$\bar{s}^2(n_i) = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i(n_i))^2 \quad (i=1,2), \quad (7)$$

$$\bar{s}^2 = \frac{1}{n_1 + n_2 - 2} (n_1 \cdot \bar{s}^2(n_1) + n_2 \cdot \bar{s}^2(n_2)), \quad (8)$$

$\bar{s}^2$ – сводная оценка дисперсии по совокупности двух выборок.

По таблице значений t -распределения по заданному значению уровня значимости α находится $100 \cdot \left(\frac{\alpha}{2}\right)\%$ -я точка $t_{\alpha/2}(n_1 + n_2 - 2)$ распределения Стьюдента.

Если $|\hat{t}(n_1 + n_2 - 2)| \leq t_{\alpha/2}(n_1 + n_2 - 2)$, то гипотеза H_0 принимается, иначе отвергается.

Методы локализации внутриреакторных аномалий

В статье предлагается три взаимосвязанных метода выявления отклонений в процессе тепловыделения.

Прежде, чем перейти к их изложению, определим зависимости, которые будем использовать в дальнейшем.

Из уравнения теплового баланса, произведя несложные преобразования, и, принимая $\frac{\Delta G}{G} = \frac{\Delta \alpha}{1 - \alpha}$, получим следующие соотношения

$$\Delta q = CG \cdot \Delta T \Rightarrow \frac{\Delta q}{\Delta T} = CG \equiv B, \quad (9)$$

$$\Delta q = \Delta G \cdot CT \Rightarrow \frac{\Delta q}{T} = \Delta G \cdot C = \frac{\Delta G}{G} GC = \frac{\Delta \alpha}{1 - \alpha} B$$

где q – удельная плотность теплового потока; T – температуры теплоносителя на выходе канала; G – массовый расход теплоносителя; C – удельная теплоемкость; α – объемное паросодержание; $\Delta \alpha$ – изменение объемного паросодержания, вызывающее изменение массового расхода теплоносителя ΔG .

Исходными данными для методов анализа будут удельная плотность теплового потока и температуры теплоносителя на выходе каналах,

тепловая мощность по показаниям ДПЗ по высоте канала.

Первый метод.

Локализация внутриреакторных аномалий на основе анализа формы энерговыведения в радиальном направлении.

Этапы метода.

1. Рассматриваем выборку объемом L p -мерных векторов (p – количество рассматриваемых каналов активной зоны) значений тепловой мощности каналов с элементами $Q_i^{(l)}$ ($i = \overline{1, p}$, $l = \overline{1, L}$). Определяем минимальное и максимальное значения для каждого вектора

$$Q_{\min}^{(l)} = \min_i Q_i^{(l)}, \quad Q_{\max}^{(l)} = \max_i Q_i^{(l)}.$$

2. Определяем для l -го наблюдения отклонение от идеальной формы распределения, описываемой функцией косинуса, и выделяем постоянную составляющую.

$$Q_i'^{(l)} = Q_i^{(l)} - \Delta Q^{(l)} \cos(\pi r_i / R),$$

$$\Delta Q^{(l)} = Q_{\max}^{(l)} - Q_{\min}^{(l)},$$

где r_i – расстояние от центра активной зоны до i -го канала; R – радиус активной зоны.

3. Применение однофакторного дисперсионного анализа для проверки гипотезы о не влиянии фактора I (номера канала) на среднее значение $Q_i'^{(l)}$ ($l = \overline{1, L}$) для каждого канала i ($i = \overline{1, p}$).

4. Если в результате выполнения дисперсионного анализа гипотеза о не влиянии фактора подтверждается, то переходим к п.6, иначе находим S номер канала, для которого среднее значение $Q_i'^{(l)}$ ($l = \overline{1, L}$) максимально,

$$S = \arg \max_i \bar{Q}_i',$$

$$\bar{Q}_i' = \frac{\sum_{l=1}^L Q_i'^{(l)}}{p}.$$

Выдаем сообщение о возможном нарушении процесса энерговыведения в канале с номером S .

5. Удаляем канал с номером S из множества рассматриваемых каналов. Переходим к п.1.

6. Возможные аномалии выявлены или их отсутствие подтверждено.

Второй метод.

Локализация внутриреакторных аномалий на основе анализа формы энерговыведения в аксиальном направлении для канала с номером S ,

который определен первым методом.

Этапы метода.

1. Рассматриваем выборку объемом L n -мерных векторов (n – количество рассматриваемых ДПЗ в выбранном канале с номером S активной зоны) значений тепловой мощности уровней канала с элементами $N_j^{(l)}$ ($j = \overline{1, n}$, $l = \overline{1, L}$). Определяем минимальное и максимальное значения для каждого вектора

$$N_{\min}^{(l)} = \min_j N_j^{(l)}, \quad N_{\max}^{(l)} = \max_j N_j^{(l)}.$$

2. Определяем для l -го наблюдения отклонение от идеальной формы распределения, описываемой функцией синуса, и выделяем постоянную составляющую.

$$N_j'^{(l)} = N_j^{(l)} - \Delta N^{(l)} \sin(\pi(j-1)/(n-1)),$$

$$\Delta N^{(l)} = N_{\max}^{(l)} - N_{\min}^{(l)},$$

где j – номер уровня рассматриваемого канала, определяемый положением ДПЗ; n – количество уровней в канале.

3. Применение однофакторного дисперсионного анализа для проверки гипотезы о не влиянии фактора J (номера уровня в канале) на среднее значение $N_j^{(l)}$ ($l = \overline{1, L}$) для каждого уровня j ($j = \overline{1, n}$).

4. Если в результате выполнения дисперсионного анализа гипотеза о не влиянии фактора подтверждается, то переходим к п.5, иначе находим Z номер уровня, для которого среднее значение $N_j^{(l)}$ ($l = \overline{1, L}$) максимально,

$$Z = \arg \max_j \bar{N}_j',$$

$$\bar{N}_j' = \frac{\sum_{l=1}^L N_j'^{(l)}}{n}.$$

Выдаем сообщение о возможном нарушении процесса энерговыделения на уровне Z в канале с номером S .

5. Возможные аномалии выявлены или их отсутствие подтверждено.

В соответствии с (9) изменение массового расхода теплоносителя G может привести к резкому изменению температуры теплоносителя на выходе канала при незначительном изменении тепловой мощности. Такую ситуацию выявить ни первым, ни вторым методом не удастся. Необходимо сопоставлять форму энерговыделения с формой поля температур по радиусу активной

зоны. Для этой цели предлагается третий метод.

Третий метод.

Определение каналов, в которых возможно запаривание.

Этапы метода.

1. Рассматриваем две выборки объемом L значений тепловой мощности $Q_i^{(l)}$ ($l = \overline{1, L}$) канала с номером i и значений температуры теплоносителя на выходе этого же канала $T_i^{(l)}$ ($l = \overline{1, L}$). Определяем минимальное и максимальное значения для каждого вектора по двум выборкам

$$Q_{\min}^{(l)} = \min_i Q_i^{(l)}, \quad Q_{\max}^{(l)} = \max_i Q_i^{(l)},$$

$$T_{\min}^{(l)} = \min_i T_i^{(l)}, \quad T_{\max}^{(l)} = \max_i T_i^{(l)}.$$

2. Определяем для l -го наблюдения отклонения от идеальной формы распределения, как температуры, так и мощности, описываемые функцией косинуса, и выделяем постоянные составляющие.

$$Q_i'^{(l)} = Q_i^{(l)} - \Delta Q^{(l)} \cos(\pi r_i / R),$$

$$\Delta Q^{(l)} = Q_{\max}^{(l)} - Q_{\min}^{(l)},$$

$$T_i'^{(l)} = T_i^{(l)} - \Delta T^{(l)} \cos(\pi r_i / R),$$

$$\Delta T^{(l)} = T_{\max}^{(l)} - T_{\min}^{(l)},$$

где r_i – расстояние от центра активной зоны до i -го канала; R – радиус активной зоны.

3. Идеальную форму распределения температуры и мощности можно описать следующим образом

$$T_i''^{(l)} = T_{\max}^{(l)} \cos(\pi r_i / R) + T_{\min}^{(l)} (1 - \cos(\pi r_i / R))$$

,

$$Q_i''^{(l)} = Q_{\max}^{(l)} \cos(\pi r_i / R) + Q_{\min}^{(l)} (1 - \cos(\pi r_i / R))$$

.

4. Создаем две новые выборки объемом L с элементами $Q_i^{(l)} / T_i^{(l)}$ и $Q_i''^{(l)} / T_i''^{(l)}$.

5. Выполняем проверку гипотезы о равенстве средних значений для выборок, полученных в п.1, по критерию Стьюдента.

6. Если в результате статистической проверки гипотеза подтверждается, то можно говорить, что запаривание канала отсутствует, иначе выдаем сообщение о возможном нарушении процесса энерговыделения в рассматриваемом канале.

7. Выполняем п.1-6 пока не будут рассмотрены

все каналы активной зоны реактора.

Заключение

Предложенные методы позволяют использовать дисперсионный анализ для проверки соответствия формы энергораспределения описанию функцией косинуса в радиальном направлении и функцией синуса в аксиальном направлении. Рассмотрено применение критерия Стьюдента для проверки эквивалентности формы распределения температуры и тепловой мощности в аксиальном направлении.

Разработанные методы позволяют локализовать внутриреакторные аномалии, определить каналы, в которых возможен процесс поверхностного кипения. Созданные методы обработки и получения данных о состоянии активной зоны позволяют повысить быстродействие, что способствует предупреждению кризиса теплообмена.

Результаты исследования могут быть использованы для модификации СВРК ЯЭУ.

Список литературы

1. Емельянов И.Я., Ефанов А.И., Константинов Л.В. Научно-технические основы управления ядерными реакторами. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360с.
2. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынов А.М. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. – М.: Энергоиздат, 1988. – 136с.
3. Крамер Э.У. Ядерные реакторы с кипящей водой. – М.: Из-во иностр. лит-ры, 1960. – 509с.
4. Качур С.А. Идентификации формы поля тепловыделения в камере смешения ядерного реактора/ С.А. Качур // Пром. теплотехника. – Т.33, №4, 2011. – С.70-76.
5. Качур С.А. Прогнозирующая графоаналитическая модель процесса поверхностного кипения в активной зоне ВВЭР // Севастополь: Сб.науч.тр.СНУЯЭ иП. – 2009. – Вып.2(30). – С.18-25.

References

1. Emelyanov I.Ya., Efanov A.I., Konstantsnov L.V. *Nauchno-tehnicheskie osnovi upravleniya yadernimi reaktorami* [Scientific and technical control bases by nuclear reactors]. Moscow, Energoizdat, 1981, 360 p.
2. Bahmetev A.M., Samoylov O.B., Usinov A.M. *Metodi ochenki i obespecheniya bezopastnosti YaEU* [Methods of estimation and providing of the NPE safety]. Moscow, Energoizdat, 1988, 136 p.
3. Kramer E. Y. *Yadernie reaktori s kipyashey vodoy* [Nuclear reactors with boiling water]. Moscow, Iz-vo inostr. lit-ri, 1960, 509 p.
4. Kachur S.A. Control by nuclear reactor by means of

external electromagnetic radiation. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2011, Vol. 33, No. 4, pp. 70-76.

5. Kachur S.A. Forecasting graphic-analytical model of process of the superficial boiling in the active zone. PWR. *Sevastopol: Sb.nauch.tr. SNUYaEP*, 2009, No 2(30), pp. 18-25.

УДК 621.039.56

Прогнозирование энерговыделения активной зоны на основе анализа процесса кипения в каналах ядерного реактора типа ВВЭР

С.А. Качур

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, kachur_62@mail.ru

Статья поступила 04.09.2020 г.; после доработки 07.09.2020 г.

Аннотация

Предложен метод, позволяющий использовать возможности модели запаривания канала активной зоны и регрессионного анализа для определения поля энерговыделения с целью прогнозирования неустойчивости распределения мощности.

Ключевые слова: ядерный реактор, активная зона, форма энерговыделения, регрессионный анализ, процесс кипения.

Prognostication of active zone release based on the analysis of the boiling process in the channels of a VVER type nuclear reactor

S.A. Kachur

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru

Received 04.09.2020 y.; received in final form 07.09.2020 y.

Abstract

A method is proposed that allows using the capabilities of the core channel steaming model and regression analysis to determine the energy release field in order to predict power distribution instability.

Keywords: nuclear reactor, active zone, the shape of the energy deposition, regression analysis, the process of boiling.

Введение

Современные тенденции в проектировании и эксплуатации АЭУ с ВВЭР можно кратко охарактеризовать направлениями, связанными с продлением ресурса, повышения экономичности и безопасности [1-4].

Решение поставленных задач можно связать с ростом интенсивности переноса тепла от ТВЭЛ к теплоносителю путем увеличения энергоемкости энергоносителя в единице объема.

Во многих задачах, когда модель полностью не может быть задана, возникает необходимость идентификации системы по информации, заключенной в известных входной и выходной последовательностях. Выделим три этапа идентифика-

ции системы: определение структуры, идентификация параметров и проверка модели. На втором этапе должен быть решен вопрос об идентифицируемости параметров при выбранной структуре системы.

В способе идентификации структуры модели поверхностного кипения теплоносителя процессы изучаются на основе физических законов, и требуется определить входной сигнал и состав измерителей, которые позволили бы идентифицировать неизвестные параметры системы. В этом случае возникает непростая задача идентифицируемости при заданном входном сигнале и предлагаемом составе измерителей. Представляется целесообразным применение

методов прикладной статистики для исследования состояния объекта.

В статье предлагается на основе модели запаривания канала активной зоны с применением метода, базирующегося на использовании регрессионного анализа, произвести идентификацию процесса кипения в каналах, что позволит прогноз формы поля энергораспределения.

Цель и задачи исследования

Цель исследования – прогнозирование формы энерговыведения на основе идентификации процесса поверхностного кипения теплоносителя в каналах ядерного реактора типа ВВЭР.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести анализ моделей парогенерирующих каналов;
- 2) исследовать возможности применения регрессионного анализа для определения формы энерговыведения;
- 3) разработать метод определения формы энерговыведения на основе модели запаривания канала.

Модель запаривания канала ядерного реактора

Реализация задачи прогнозирования связана с идентификацией процессов кипения в ядерном реакторе и охватывает полный диапазон измерения структуры потока от поверхностного кипения до кризисного.

На рис. 1 показан парогенерирующий канал, в котором теплоноситель (вода) по ходу своего движения и под действием теплового потока сначала нагревается до температуры насыщения, а затем претерпевает фазовые превращения [5].

Теплоноситель, охлаждающий ТВЭЛ и нагреваемый за счет теплового потока, изменяет теплофизические характеристики в виде: температуры потока, паросодержания, вязкости и т.д.

Как следует из схемы рис. 1, на ней представлены четыре режима течения теплоносителя. На начальном участке (область I) течение имеет конвективный характер, свойственный для функционирования каналов активной зоны реакторов типа ВВЭР.

Область II представляет собой режим поверхностного кипения, характеризующийся следующими термодинамическими условиями: $T_{ж} < T_s$, $\theta_{ст} \geq T_s$. На этом участке паровые пузырьки образуются на поверхности нагрева, проникают в поток и конденсируются в его ядре. Истинное

объемное паросодержание (кривая AC) лежит в области отрицательных энтальпий X . Дальнейшее движение теплоносителя по его течению приводит к объемному кипению, которое имеет место при термодинамических условиях $T_{ж} = T_s$, $\theta_{ст} > T_s$ (область III). Этот режим характерен для ядерных реакторов кипящего типа на испарительном участке активной зоны. Четвертая область кипения (область IV) представляет собой кризисный участок кипения, на котором установлены термодинамические условия $T_{ж} = T_s$, $\theta_{ст} \gg T_s$. Эта область и соответствующий ей режим является недопустимым для нормальной эксплуатации ядерного реактора.

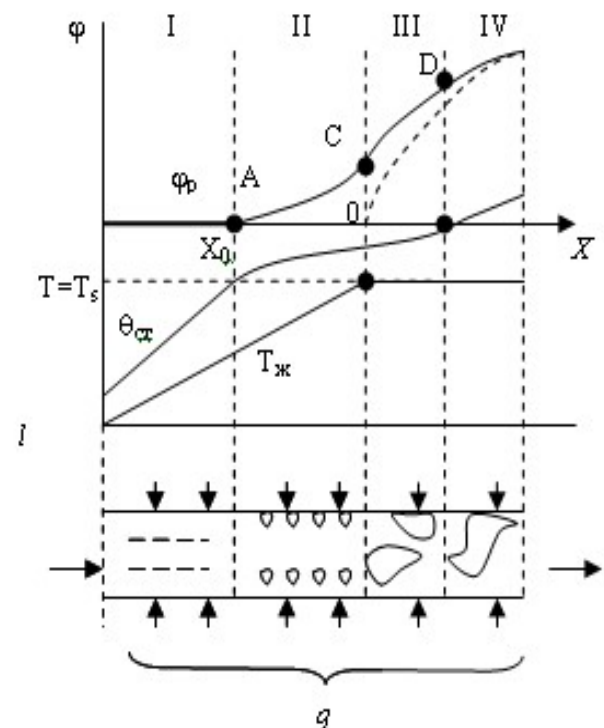


Рис. 1. Парогенерирующий канал. Параметры: $T_{ж}$ – температура жидкости; T_s – температура кипения при данном давлении; $\theta_{ст}$ – температура стенки ТВЭЛ; φ – истинное паросодержание; X – массовое паросодержание (относительная энтальпия); q – удельный тепловой поток; l – длина канала.

Наличие процесса кипения может привести к запариванию каналов активной зоны, которое связано с радиально-азимутальными колебаниями. При возникновении в реакторе температурной неустойчивости будет возникать и ксеноновая неустойчивость, ксеноновые колебания могут принимать расходящийся характер.

Развитие радиально-азимутальных колебаний в цилиндрическом реакторе иллюстрируется

рис. 2, где показано наложение высоких гармоник на форму основного распределения потока нейтронов в реакторе [1]. Области возрастания потока нейтронов обозначены знаком «+», области уменьшения знаком «-».

В правой части рис. 2 дано схематическое изображение развития деформаций распределения потока нейтронов. Возникающие колебания распределения мощности непрерывны.

Чтобы погасить, например, гармонику f_{01} необходимо перемещать регулирующие стержни в противоположных направлениях в обеих половинах реактора.

Необходимо упростить процесс идентификации состояния реактора с точки зрения характеристики гармоник, определяющих форму энерговыделения в текущий момент времени и прогноз развития ситуации.

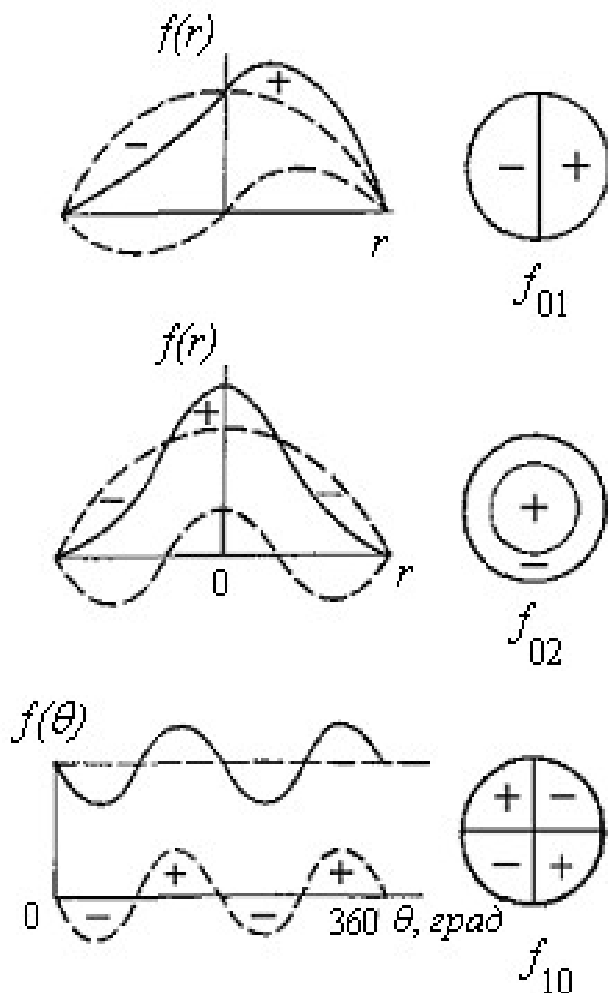


Рис. 2. Форма пространственных ксеноновых колебаний в цилиндрическом реакторе

Предлагается идентифицировать деформацию поля энерговыделения, исследуя процесс

запаривания в каналах реактора.

В качестве основы модели процесса выберем $T-s$ диаграмму, как наиболее полно отражающую термодинамический процесс преобразования энергии.

Изменение процесса кипения может быть описано рабочей прямой на $T-s$ диаграмме [6]. Рабочая прямая определяется двумя точками: точкой начала кипения (точка A , рис. 3) и точкой перехода в состояние перенасыщенного пара (точка D , рис. 3).

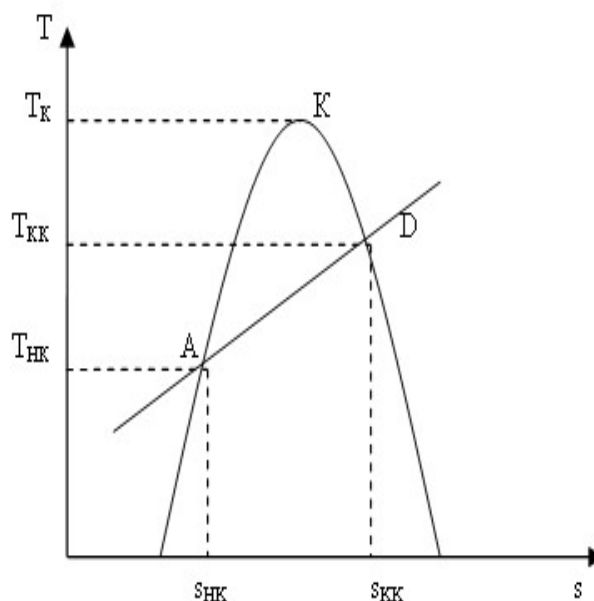


Рис. 3. Построение рабочей прямой на $T-s$ диаграмме.

Изменение положения рабочей прямой для рабочей точки P при наличии случайных внешних воздействий, способных привести к кризису теплообмена, следующие: а) резкое понижение давления в первом контуре; б) резкое повышение температуры (ΔT); в) резкое повышение давления (ΔP) и мощности (ΔQ).

Физический смысл рабочей прямой на $T-s$ диаграмме может быть определен следующим образом. Для газов процесс подвода теплоты может быть приближен к изотермическому, если он будет состоять из чередующихся процессов изобарического подвода тепла с последующим адиабатическим расширением в небольшом интервале давлений (рис. 4а) [7].

Чем больше таких ступеней и чем меньше расширение в каждой из ступеней, тем ближе кривая процесса, представляющая собой пилообразную линию, к изотерме. Для активной зоны реактора в случае неконтролируемого подвода тепла (несвоевременном отводе пара и газов) в

нештатных ситуациях процесс может быть представлен рис. 4б.

Величины коэффициентов наклона рабочих прямых для всех каналов реактора определяют форму энергораспределения в активной зоне. Они не зависят от текущего уровня мощности реактора и связаны со скоростью появлением соответствующей гармоники в спектре пространственных колебаний энерговыделения зоны, т.е. со скоростью изменения реактивности.

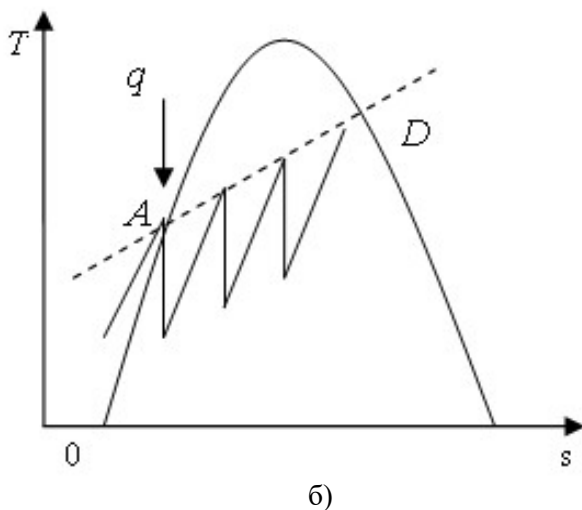
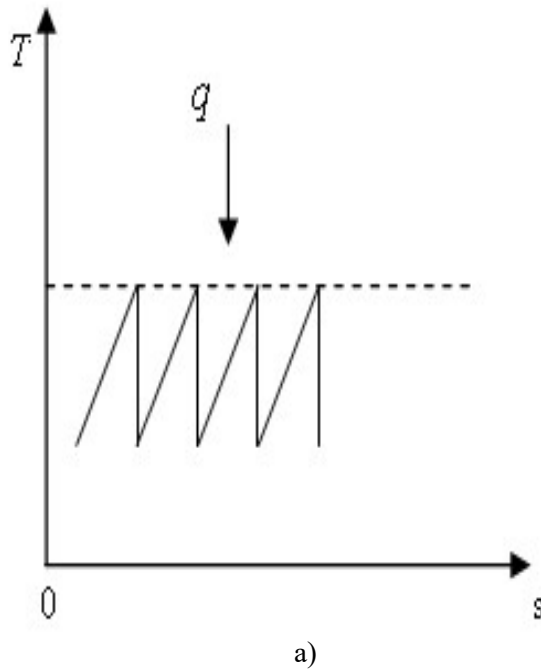


Рис. 4. Термодинамический процесс подвода тепла для теплового двигателя или ядерного реактора в проектном режиме (а) и ядерного реактора в нестандартных ситуациях (б).

Метод определения формы поля энерговыделения на основе модели запаривания канала

Предлагаемый метод основывается на использовании однофакторного регрессионного анализа для исследования процесса изменения энергораспределения.

Определим минимальную возможную температуру теплоносителя на выходе T_{min} как температуру, при которой $\Delta q = 0$.

Тогда уравнение рабочей прямой на $T-s$ диаграмме будет иметь вид

$$T = T_{min} + k \frac{\Delta q}{T}. \quad (1)$$

Преобразовав (1) к следующему виду

$$\Delta q = \frac{1}{k} T(T - T_{min}),$$

Приняв

$$a = \frac{1}{k}, \quad r = T(T - T_{min}),$$

получим запись, удобную для применения однофакторного регрессионного анализа,

$$\Delta q = ar. \quad (2)$$

Этапы метода.

1. Построить регрессионную зависимость вида (2) для i -о канала ($i=1, 2, \dots, N$).
2. Определить k_i ($i=1, 2, \dots, N$).
3. Построить функцию $k_i = f(x_i, y_i)$, где (x_i, y_i) – координаты i -о канала.
4. Полученную в п.3 форму энергораспределения сравнить с эталонными, характерными для случаев, представленных на рис.1.

Сделать вывод о возможном развитии ситуации, появлении соответствующих гармоник пространственных колебаний в активной зоне реактора.

Исходную для метода информацию удобно представить в форме таблицы, в которой процесс кипения в каждом канале описан выборкой объемом n , упорядоченной по возрастанию температуры. Предполагается, что шаг квантования по времени позволяет не рассматривать переходные процессы.

Таблица. Представление исходной информации для метода определения формы энерговыделения.

№ канала	q	Δq	T
1	$q_1^{(1)}$	$q_1^{(2)} -$	$T_1^{(1)}$
	$q_1^{(2)}$	$q_1^{(1)}$	$T_1^{(2)}$
	$\vdots$	$q_1^{(3)} -$	$\vdots$
	$q_1^{(n)}$	$q_1^{(2)}$	$T_1^{(n)}$
		$\vdots$	
...	...	...	...
N	$q_N^{(1)}$	$q_N^{(2)} -$	$T_N^{(1)}$
	$q_N^{(2)}$	$q_N^{(1)}$	$T_N^{(2)}$
	$\vdots$	$q_N^{(3)} -$	$\vdots$
	$q_N^{(n)}$	$q_N^{(2)}$	$T_N^{(n)}$
		$\vdots$	

Заключение

Предложен метод, позволяющий использовать возможности модели запаривания канала активной зоны и регрессионного анализа для определения поля энерговыделения с целью прогнозирования неустойчивости распределения мощности, которая определяется низшими гармониками пространственного распределения.

Разработанный метод обработки и получения данных о состоянии активной зоны позволяет повысить быстродействие, что способствует предупреждению кризиса теплообмена.

Результаты исследования могут быть использованы для модификации СВРК ЯЭУ.

Список литературы

1. Емельянов И.Я., Ефанов А.И., Константинов Л.В. Научно-технические основы управления ядерными реакторами. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360с.
2. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынов А.М. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. – М.: Энергоиздат, 1988. – 136с.
3. Крамер Э.У. Ядерные реакторы с кипящей водой. – М.: Из-во иностр. лит-ры, 1960. – 509с.
4. Качур С.А. Идентификация формы поля тепловыделения в камере смешения ядерного реактора/ С.А. Качур // Пром. теплотехника. – Т.33, №4, 2011. – С.70-76.
5. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360с.
6. Качур С.А. Прогнозирующая графоаналитическая модель процесса поверхностного кипения в

активной зоне ВВЭР // Севастополь: Сб.науч.тр.СНУЯЭ иП. – 2009. – Вып.2(30). – С.18-25.

7. Новиков И.И., Воскресенский К.Д. Прикладная термодинамика и теплопередача – М.: Атомиздат, 1977. – 352с.

References

1. Emelyanov I.Ya., Efanov A.I., Konstantsnov L.V. *Nauchno-tehnicheskie osnovi upravleniya yadernimi reaktorami* [Scientific and technical control bases by nuclear reactors]. Moscow, Energoizdat, 1981, 360 p.
2. Bahmetev A.M., Samoylov O.B., Usinov A.M. *Metodi ochenki i obespecheniya bezopasnosti YaEU* [Methods of estimation and providing of the NPE safety]. Moscow, Energoizdat, 1988, 136 p.
3. Kramer E. Y. *Yadernie reaktori s kipyashey vodoi* [Nuclear reactors with boiling water]. Moscow, Izvo inostr. lit-ri, 1960, 509 p.
4. Kachur S.A. Control by nuclear reactor by means of external electromagnetic radiation. *Promyshlennaya teploekhnika*, 2011, Vol. 33, No. 4, pp. 70-76.
5. Kirilov P.L., Yur'ev Yu.L., Bobkov V.P. *Spravochnik po teplogidravlicheskim raschyotam* [Reference book upon heat-hydraulic accounts]. Moscow, Energoizdat, 1990, 360p. (in Russian)
6. Kachur S.A. Forecasting graphic-analytical model of process of the superficial boiling in the active zone. PWR. *Sevastopol: Sb.nauch.tr. SNUYaEiP*, 2009, No 2(30), pp. 18-25.
7. Novikov I.I., Voskresenskij K.D. *Prikladnaya termodinamika i teploperedacha* [Applied thermodynamics and heat] Moscow, Atomizdat, 1977, 352p. (in Russian)

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 620.92

Оценка потенциала развития возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме Республики Крым и г. СевастополяВ.В. Гурьев¹, Е.Г. Какушина², В.В. Небесный³, М.Р. Найдук⁴, А.Б. Асанов⁵*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹guryev-vv@tavrida.so-ups.ru, ²little@mail.ru, ³nebesnii@bk.ru,
⁴MRNaydukk@sevsu.ru, ⁵asanov@gmail.com*

Статья поступила 31.08.2020 г.; после доработки 02.09.2020 г.

Аннотация

В статье представлен комплекс предложений и мероприятий по развитию возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме Республики Крым и г. Севастополя в целях повышения устойчивости энергосистемы и снижения дефицита электропотребления региональной экономики в Республике Крым и г. Севастополь. Обосновано приоритетное использование альтернативных источников электроэнергии: солнечной радиации и энергии ветра. В работе раскрыты возможности расширения ветроэнергетики на Крымском полуострове. Представлены методологические основы построения моделей внедрения возобновляемых источников энергии для обеспечения экономической модернизации и устойчивого развития энергосистемы.

Ключевые слова: возобновляемые источники электроэнергии (ВИЭ), ветроэлектрические станции (ВЭС), режимы работы энергосистемы, эксплуатация ВИЭ, солнечные электрические станции (СЭС), общее первичное регулирование частоты

Assessment of the potential for development of renewable energy sources in the energy system of the Republic of Crimea and SevastopolV.V. Guryev¹, E.G. Kakyshina², V.V. Nebesnii³, M.R. Nayduk⁴, A.B. Asanov⁵*Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.**¹guryev-vv@tavrida.so-ups.ru, ²little@mail.ru, ³nebesnii@bk.ru, ⁴MRNaydukk@sevsu.ru, ⁵asanov@gmail.com*

Received 31.08.2020 y.; received in final form 02.09.2020 y.

Abstract

The article presents a set of proposals and measures for development of renewable sources of electric energy in the power system of the Republic of Crimea and Sevastopol in order to increase stability and reduce shortage of power consumption of the regional economy in the Republic of Crimea and Sevastopol. Priority use of alternative sources of electricity, such as solar radiation and wind energy, is justified. The paper reveals the possibilities of expanding wind power on the Crimean Peninsula. The methodological basis for building models for the introduction of renewable energy sources to ensure economic modernization and sustainable development of the energy system is presented.

Keywords: renewable energy sources (RES), wind power stations (WPP), operating modes of the energy system, operation of RES, solar power stations (SES), General primary frequency control.

Введение

Во время перебоев с энергоснабжением в

2015-2016 годах работоспособность энергосистемы Республики Крым и г. Севастополя удавалось поддерживать во многом благодаря работе

возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ).

Суммарная выработка ВИЭ составляла порядка 200 МВт, что в свою очередь позволяло обеспечить минимальные потребности в электроэнергии потребителей [1].

Развитие возобновляемой энергетики в различных регионах Российской Федерации на данный момент имеет приоритетный характер над другими энергетическими системами, связанными с традиционными источниками энергии.

Однако при работе параллельно с сетью некоторых типов генерирующих мощностей на основе (ВИЭ), например, солнечных и ветровых электрических установок (ВЭУ) и ветроэлектрических станций (ВЭС), имеются некоторые проблемы связанные с неравномерностью выработки электрической энергии. Из-за этого происходит процесс торможения внедрения установок на основе ВИЭ в энергетическую систему. Устранение этих недостатков будет способствовать быстрейшему развитию возобновляемой энергетики в России [2].

При рассмотрении ветроэнергетических установок можно сказать, что мощность генератора ветроэнергетической установки зависит от двух основных факторов: высоты башни над землей и размера лопастей ВЭС. С увеличением количества лопастей также увеличивается генерируемая мощность, но также увеличивается шумовое загрязнение, поэтому более целесообразно строить эти генерирующие установки в прибрежной зоне или на значительном расстоянии от жилых районов с дополнительными расходами, связанными с передачей энергии. Сегодня строительство ВЭС мощностью до 15 кВт, объединенных в так называемую «ветряную ферму», экономически целесообразно.

Однако создание такой «ветряной электростанции» требует большого количества конструкционных материалов, прежде всего алюминия, производство которого требует значительных финансовых затрат и является экологически небезопасным (шумовое загрязнение и вибрация) [3,5].

Развитие ВИЭ в Крымской энергосистеме невозможно без наличия в энергосистеме резервных базовых мощностей способных мгновенно загружаться и разгружаться в зависимости от потребления и режима работы энергосистемы. Если взглянуть на зарубежный опыт, то во многих странах Евросоюза успешно применяют технологии «Smart-grid» (умные сети) и их аналоги, но в России данные технологии не так сильно распространены поскольку отсутствуют меры

государственной поддержки [6,9].

Потенциал развития энергетической сферы Крымского полуострова имеет большие перспективы развития в области возобновляемой энергетики, для осуществления развития ВИЭ необходимо оказать поддержку производителям оборудования и инвесторов, осуществляющих деятельность в данной сфере [10].

Развитие технологий использования ВИЭ на Крымском полуострове позволит:

- развить отрасль на базе возобновляемых источников энергии на основе совершенствования методик планирования режимов работы энергосистемы, достичь наиболее оптимального выбора состава генерирующего оборудования на предстоящие сутки;
- произвести демонстрацию возможностей интеграции ВИЭ в энергосистему;
- заложить основу экологической безопасности региона;
- показать, что внедрение ВИЭ в энергосистему не окажет существенного влияния на устойчивость энергосистемы, улучшит экологическую ситуацию, будет способствовать снижению вероятности техногенных катастроф, созданию более благоприятного социального климата [11,12,13].

Постановка задачи исследования

Крымская область является одной из наиболее перспективных регионов России для развития ветроэнергетики и имеет один из наиболее высоких ветропотенциалов на юге страны [4].

Рассмотрим направления развития энергокомплекса республики Крым в области ветроэнергетики и связанные с этим проблемы и пути их решения [14].

Ветроэнергетика в Республике Крым представлена семью электростанциями: Донузлавская ВЭС (10,4 МВт), Судакская ВЭС (6,3 МВт), Сакская ВЭС (19 МВт), Пресноводненская ВЭС (6 МВт), Тарханкутская ВЭС (15,5 МВт), Восточно-Крымская ВЭС (5 МВт) и Останинская ВЭС (24,55 МВт) с суммарной установленной мощностью 88,563 МВт.

Расположение ветроэлектрических станций по территории республики Крым представлено на рис. 1.

На сегодняшний день существующие ВЭС установлены в Восточной, Западной и Юго-Западной части Крымского полуострова. В течение года в Республике Крым преобладают ветры Северо-Восточного, Юго-Западного и Северо-Западного направлений [7].



Рис.1. Месторасположение ВЭС на территории Республики Крым [5].

Исследования, проводимые по определению ветрового потенциала Крыма, способствуют более точному прогнозированию мест установки СЭВ и дальнейшему распределению ветропарков по территории полуострова [7].

Установка ВЭС экономически целесообразна в районах со среднегодовой скоростью ветра более 3 м/с. Показания средней скорости ветра на высоте 10-12 метров по данным метеостанций Республики Крым, рассчитанной за период с октября 2005 года по октябрь 2019 года, представлены на рисунке 2 [8].



Рис. 2. Средняя скорость ветра по данным метеостанций Республики Крым за период с октября 2005 года по октябрь 2019 года [5].

Как показано на рисунке 2, территории с наиболее высоким показателем ветроэнергетического потенциала полуострова располагаются в большей степени в прибрежной зоне: Северное, Северо-Западное, Восточное и Юго-Западное побережья.

Результаты исследований

Для изучения карты распространения ветрового потенциала по территории республики Крым необходимо исследовать многолетние данные по метеорологическим справочникам, данные по измерениям на метеостанциях Крымского региона за последние годы и данные результатов измерений, проводимых на работающих ветростанциях.

По результатам сравнения полученных характеристик преобладающих скоростей ветра можно делать прогнозы по размещению ветроэлектрических станций в том или ином регионе Крыма. При этом необходимо учитывать данные энергетиков по определению степени возможности увеличения доли генерирующих установок, но основе ВИЭ в общем энергобалансе полуострова. Также необходимо учитывать техническую пропускную возможность линий электропередач и распределительных сетей по возможности подключения новых источников генерации на основе ветроэлектрических и солнечных станций.

Изучение данных, приведенных на рисунке 2 о среднесуточных скоростях ветра территорий Республики Крым показало, что города: Армянск, Евпатория, Керчь, Саки, Судак, а также территории районов: Ленинского, Раздольненского, Сакского, Советского, Кировского, Черноморского и территория горной местности Ай-Петри имеют огромный потенциал, необходимый для работы ВЭУ.

В таблице 1 предоставлены данные по ВЭС, которые предположительно могут быть введены в эксплуатацию на территории Республики Крым в соответствии с «дополнительными вводами генерирующих объектов» проектом СиПР ЕЭС России на 2020–2026 гг.

Решение проблем, возникающих при увеличении влияния нестабильных ВИЭ на энергосистему.

Стоит отметить важную роль участия ВИЭ в структуре баланса потребления мощности в часы прохождения максимума в Крымской энергосистеме. Данная структура приведена на рисунке 3.

Увеличение доли ВИЭ обязывает разрабатывать нормативную документацию в части регулирования данной отрасли, в связи с чем Правительство Российской Федерации своим постановлением от 13 августа 2018 г. № 937 утвердило Правила технологического функционирования электроэнергетических систем (ПТФ ЭЭС) – комплексный документ, в котором сформулированы основные принципы и требования к работе

энергосистемы как единого технологически сложного объекта.

Таблица 1. Информация по возможным перспективным ВЭС на территории Республики Крым

Собствен-ники объ-екта гене-рации	Наиме-нование электро-станции	Уста-новленная мощность, МВт	Воз-можный срок выпол-нения меро-приятия
ОО О «Ветря-ной парк Степной»	Степ-ная ВЭС	1 этап 120 2 этап 60 3 этап 60 4 этап 42 Итого 282	2023 2024 2025 2026
ОО О «Ветря-ной парк Керчен-ский»	Во-сточная ВЭС	1 этап 25 2 этап 25 3 этап 25 4 этап 25 Итого 100	2022 2023 2024 2025
ОО О «Ветря-ной парк Приси-вашский»	Приси-вашская ВЭС	Итого 25	2021



Рис. 3. Структура участия ВИЭ в структуре баланса потребления мощности Крымской энергосистемы.

Так же выпущены регламентирующие документы в части показателей способности ВИЭ на оптовом рынке электроэнергии и мощности:

- Регламент определения объемов фактически поставленной на оптовый рынок мощности (Приложение № 13 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка) – разделы 2', 3', 5.6;
- Технические требования к генерирующему оборудованию участников оптового рынка (раздел 7);
- Порядок установления соответствия генерирующего оборудования участников опто-

вого рынка техническим требованиям (раздел 7).

Определена степень возможности увеличения доли ВИЭ (ввод в работу новых ВЭС мощностью 407 МВт) в энергосистеме Республики Крым и г. Севастополя [15].

С учетом строительства маневренной базовой генерации способной за несколько минут набирать или сбрасывать вырабатываемую мощность, маневренность энергосистемы увеличилась, а вместе с ней и увеличился запас мощности, на которую можно увеличить долю ВИЭ. По результатам расчетов выбрана самая мощная ПГУ энергосистемы, которой является ПГУ-1 Балаклавской ТЭС с установленной мощностью 251 МВт.

С учетом роста генерирующей мощности на полуострове и имеющегося запаса перетока мощности из Кубанской энергосистемы, возможен вывод в резерв полной мощности ПГУ-1 Балаклавской ТЭС для регулирования перепадов мощности в энергосистеме, либо работа ПГУ-1 Балаклавской ТЭС в минимальном режиме с запасом 50% от располагаемой мощности

На основании вышеизложенного необходимо учесть маневренные характеристики энергосистемы и возможность увеличения качества прогнозирования способного предугадывать количество вырабатываемой энергии на ВИЭ, можно сделать предварительный расчет по пределу увеличения доли ВИЭ в энергосистеме.

Важно отметить, что выделение более 2 энергоблоков на ПГУ не рентабельно и имеет отрицательную финансовую составляющую. В соответствии с данной информацией предоставлены результаты в таблице 2.

Можно сделать вывод, что на сегодняшний день сильное увеличение доли ВИЭ в энергосистеме невозможно без принятия значительных мер по компенсации влияния оказываемого на энергосистему. В данном случае установлено, что пределом является увеличение мощности ВИЭ не более чем на 400 МВт, с учетом выделенной в резерв ПГУ для компенсации влияния вырабатываемой мощности на энергосистему.

В результате, после введения Балаклавской ТЭС, Таврической ТЭС, ПГУ-120 Сакской ТЭЦ будет покрывать только текущие потребности. Так что дефицит в энергосистеме будет присутствовать. Другое дело, что после введения большой генерации, у которой технические показатели будут выше, чем у нынешней генерации появляется задел для развития ВИЭ в энергосистеме. Ввод ВИЭ обеспечит экологическую безопасность региона и с учетом взаимодействия с

базовой генерацией не окажет существенного влияния на режимы работы энергосистемы.

Таблица 2. Результаты анализа влияния вырабатываемой мощности ВИЭ с увеличения доли ВИЭ (ввод в работу новых ВЭС мощностью 407 МВт) в энергосистеме

На личие за- паса ма- неврен- ных гене- рирую- щих мощ- ностей (МГТЭС) , МВт	До ля ВИЭ на 01.01.202 0 год, МВт	Вл- ияние выра- ботки ВИЭ на энергосис- тему на 01.01.20 20 год	До ля ВИЭ на 01.01.202 6 год, МВт	Вли- яние выра- ботки ВИЭ на энергосис- тему на 01.01.2026 год
251	388	не суще- ственное	883	не суще- ственное
125	388	не суще- ственное	883	су- ществен- ное влия- ние
0	388	су- ществен- ное влия- ние	883	тре- бует сни- жение вы- работки ВИЭ, либо строитель- ство новых более ма- невренных станций для регу- лирования мощности в энергосис- теме

Об этом свидетельствуют не только многочисленные электростанции, которые успешно работают на территории страны, но и тот факт, что новые проекты по развитию энергетики полуострова постоянно разрабатываются и создаются при поддержке иностранных компаний. Конечно, у многих недоброжелателей есть альтернативная энергетика в Крыму и Севастополю. Некоторые говорят, что такие электростанции требуют больших площадей для размещения, другие - что ими трудно управлять. Атомная электростанция также сложна в управлении. А какой аргумент, скажем, о больших площадях? Ветряные турбины в Крыму можно расположить в неподходящих для сельского хозяйства районах, солончаках, песке и даже на мелководье. Гелиос и ветряные турбины не только не ухудшают условия для Крыма, но и улучшают их: они затевают почву, снижают скорость ветра - улучшается увлажнение, растет растительность. В этих районах можно пасти скот, выращивать и собирать сено. И самое главное, они не приведут к техногенной катастрофе. Это большой плюс в

будущем.

Выводы

Предложенные методы прогнозирования потенциала развития энергетических установок на основе возобновляемых источников позволяют обеспечить альтернативную генерацию на территории республики Крым и города Севастополя замещая использование традиционных источников энергии экологически частыми генерирующими мощностями. при этом значительно снижая вредные выбросы в атмосферу.

Установка генерирующих систем на основе ветроэлектрических и солнечных станций возможна в течении короткого времени (несколько лет). При этом, за столь короткий срок, возможно установить значительное количество мощностей, но всей территории Крыма и значительно поднять выработку электрической энергии не используя органическое топливо, которое также поставляется на полуостров с материка.

Использование ветровых и солнечных электростанций малой мощности с системами аккумуляирования энергии для обеспечения автономных потребителей полуострова способствует снижению потерь при передачи электрической энергии и значительно сокращает расходы на установку линий электропередач.

Все предложенные меры способствуют внедрению в энергетический комплекс Республики Крым и города Севастополя систем на основе альтернативной и возобновляемой энергетики, что особенно важно для курортно-рекреационной системы полуострова и сохранения экологически чистого лечебного воздуха.

Список литературы

1. Кувшинов В.В. Использование термо-фотоэлектрических установок для обеспечения тепловой и электрической энергией Севастополя / Е.Г. Какушина, А.Д. Васильев, А.А. Горецкий // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 51-57.
2. Кувшинов В.В. Возможности повышения мощностных характеристик солнечных установок при выработке тепловой и электрической энергии с одной приемной поверхности / Е.Г. Какушина // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 45-50.
3. Кувшинов В.В. Использование солнечных электростанций для обеспечения энергетической безопасности Крымского региона. / Ф. М. Аль-Руфай и другие// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том.

- 55, №. 4, С. 252–255.
4. Кувшинов В.В. Исследование сезонной работы промышленного фотоэлектрического модуля PS 250 / Е.Г. Какушина, Д.Д. Смирнова // Энергетические установки и технологии – 2017. Т. 3. № 1. С. 47-50.
5. Кувшинов В.В. Система хранения для солнечных станций. /Коломийченко В.П., Какушина Е.Г. и другие// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 3, С. 153–158.
6. Кувшинов В.В. Исследование характеристик фотоэлектрической решетки с изменением поверхностной освещенности решетки. / АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г., Крит, Б. Л., Морозова, Н. В., Кувшинова В. В.// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 4, С. 223–228.
7. Вологдин С.В. Анализ различных сценариев энергоснабжения Крыма с учетом режимов работы солнечной электростанции. /Якимович Б.А., Кувшинов В.В., АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г. и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том 55, № 4, С. 229–234.
8. Гурьев В.В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики Крым и г. Севастополя / Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Кувшинов В.В.//Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 90-93.
9. Кувшинов В.В. Экспериментальное исследование энергетических характеристик солнечных установок в районе Севастополя. /Какушина Е.Г., Кувшинова В.В., Аджиев О.У., Бердышев К.Ю.// Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 104-110.
10. Зайченко В.М. Направления развития энергетики. /Чернявский А.А., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Абейдулин С.А.//Энергетические установки и технологии. 2019 - Т. 5. № 3. С. 53-61.
11. Крит Б.Л. Изменение энергетических характеристик фотоэлектрических элементов путем модификации нанокластеров серебра приемной поверхности. / Федотикова М.В., Слепцов В.В., Кукушкин Д.Ю., Горожеев, М.Ю. Кувшинов В.В., Морозова Н.В.// Journal of Physics: Conference Series 1396(1),012024
12. Даус Ю.В. Снижение Затрат На Оплату Потребленной Электрической Энергии За Счет Утилизации Солнечной Энергии./ И.В. Юдаев, Г.В. Степанчук// Гелиотехника. 2017. №. 4, с. 51-56.
13. Какушина Е.Г. Техно-экономический анализ эффективности ветро-солнечных установок на основе теории сложности. /Соломенникова С.И., Якимович Б.А.// В книге: Системы контроля окружающей среды - 2019 Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. 2019. 74 с.
14. Кувшинов В.В. установка трекерных систем для повышения генерации электрической энергии солнечными батареями. / Какушина Е.Г., Каширин Д.А.//Энергетические установки и технологии. 2020. Т. 6. № 1. С. 71-76.
15. Тукфатуллин О.Ф. Выбор Оптимального Угла наклона фотоэлектрических панелей с однопозиционной фиксацией стационарных фотоэлектрических систем в зависимости от географической широты и инсоляции в течение года. Гелиотехника. 2016. № 4. С.17-20.

References

1. Kuvshinov V.V. The use of thermo-photovoltaic installations to provide thermal and electric energy to Sevastopol/ E.G. Kakushina, A.D. Vasiliev, A.A. Goretsky // Power plants and technologies - 2016. V. 2. No. 3. pp. 51-57.
2. Kuvshinov V.V. Possibilities of increasing the power characteristics of solar installations in the generation of heat and electric energy from one receiving surface / E.G. Kakushina // Power plants and technologies - 2016. V. 2. No. 3. pp. 45-50.
3. Kuvshinov V.V. The use of solar power plants to ensure energy security of the Crimean region. / F.M. Al-Rufai and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, no. 4, pp. 252–255.
4. Kuvshinov V.V. Study of the seasonal operation of the industrial photovoltaic module PS 250 / E.G. Kakushina, D.D. Smirnova // Power plants and technologies - 2017. T. 3. No. 1. pp. 47-50.
5. Kuvshinov V.V. Storage system for solar stations. / Kolomiychenko V.P., Kakushina E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, no. 3, pp. 153–158.
6. Kuvshinov V.V. Study of the characteristics of the photoelectric grating with a change in the surface illumination of the grating. / AbdAli L. M., Kakushina, E. G., Crete, B. L., Morozova, N.V., Kuvshinova V.V.// Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, no. 4, pp. 223–228.
7. Vologdin S.V. Analysis of various scenarios of Crimea's energy supply, taking into account the operating modes of the solar power station. / Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., AbdAli L.M., Kakushina, E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume 55, No. 4, pp. 229–234.
8. Guryev V.V. Development of renewable energy sources in the energy system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol / Kakushina E.G., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V.// Power plants and technologies - 2019.V. 5. No. 2. pp. 90-93.
9. Kuvshinov V.V. An experimental study of the energy characteristics of solar plants in the region of Sevastopol. / Kakushina E.G., Kuvshinova V.V., Adzhiev O.U., Berdyshev K.Y.// Power Plants and Technologies - 2019.V. 5. No. 2. pp. 104-110.
10. Zaichenko V.M. Directions of energy development. / Chernyavsky A.A., Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Abeydulin S.A.// Power plants and technologies. 2019 - T. 5. No. 3. pp. 53-61.
11. Crete B.L. Changing the energy characteristics of photovoltaic cells by modifying the receiving silver

- nanoclusters. / Fedotikova M.V., Sleptsov V.V., Kuvshinov D.Yu., Gorozheev, M.Yu. Kuvshinov V.V., Morozova N.V. // Journal of Physics: Conference Series 1396 (1), 012024
12. Daus Yu. V.. Reducing the Cost Of paying for Consumed Electric Energy By using Solar Energy. / I. V. Yudaev, G. V. Stepanchuk// Solar technology. 2017. No. 4, pp. 51-56.
 13. Kakushina EG Feasibility study of the efficiency of wind-solar installations based on the theory of complexity. / Solomennikova S.I., Yakimovich B.A. // In the book: Environmental Monitoring Systems - 2019 Abstracts of the International Scientific and Technical Conference. 2019. 74.p.
 14. Kuvshinov V. V. Installation of tracker systems for increasing the generation of electric energy by solar batteries. / Kakushina E. G., Kashirin D. A.//Energy and technology. 2020. Vol. 6. No. 1. pp. 71-76.
 15. Tukfatullin O. F. Choosing the Optimal angle of inclination of photovoltaic panels with single-position fixation of stationary photoelectric systems depending on the geographical latitude and insolation during the year. Solar technology. 2016. No. 4. pp. 17-20.

УДК 620.92

Проблемы развития биоэнергетики в России

В.М. Зайченко¹, В.В. Кувшинов², Е.Г. Какушина³, И.Г. Жиганов⁴, Ильин А.А.⁵

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412, Россия, ¹zaitch@oivtran.ru
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ²kuvshinov.vladimir@gmail.com, ³littie@mail.ru, ⁴jiganov@mail.ru, ⁵Ilyin@mail.ru

Статья поступила 22.07.2020 г.; после доработки 24.07.2020 г.

Аннотация

При разработке и внедрении энергокомплексов на основе возобновляемой энергетики все более активно используются биоэнергетические установки и биогазовые комплексы. Исследования по изучению эффективности этих систем были проведены авторами и представлены в предложенной работе. Внедрение биотехнологий в энергетических комплексах способствует значительному повышению эффективности их работы и положительно влияет на экологию окружающей среды.

Ключевые слова: биоэнергетика, синтез-газ, биоэнергетическая установка, воздействие на окружающую среду, возобновляемая энергетика

Problems of bioenergy development in Russia

V. M. Zaychenko¹, V.V. Kuvshinov², E.G. Kakyshina³, I. G. Zhiganov⁴, Ilyin A.A.⁵

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (OIVT RAS),
Moscow, 125412, Russia, ¹zaitch@oivtran.ru
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
²kuvshinov.vladimir@gmail.com, ³littie@mail.ru, ⁴jiganov@mail.ru, ⁵Ilyin@mail.ru

Received 22.07.2020 y.; received in final form 24.07.2020 y.

Abstract

Bioenergy installations and biogas complexes are increasingly used in the development and implementation of energy complexes based on renewable energy sources. The authors conducted research on the effectiveness of these systems and were presented in the proposed work. The introduction of biotechnology in energy systems significantly contributes to the efficiency of their work and has a positive impact on environmentalists.

Keywords: bioenergy, syngas, bioenergy plant, environmental impact, renewable energy

Введение

В современной энергетике существует два основных направления развития – это технологии, основанные на использовании традиционных органических ресурсов и технологии, основанные на источниках возобновляемой энергии. Второе направление условно можно разделить на несколько основных видов альтернативной энерге-

тики – это солнечная энергетика, гидроэнергетика, ветроэнергетика, геотермальная энергетика и биоэнергетика. При этом биоэнергетика является наиболее близкой к первому направлению, использующему традиционные энергоресурсы, а значит, биоэнергетические установки могут наиболее эффективно заменить традиционные энергоустановки. Развития биоэнергетики, также, как и других альтернативных технологий, требуют реалии современного мира. Это

необходимо потому, что состояние экологической безопасности современной Земли требует незамедлительного сокращения потребления ископаемых топлив, мировая энергетика сокращает потребление традиционных ресурсов за счет внедрения возобновляемых источников энергии, экономическая составляющая планеты требует активного использования новых видов энергетических установок с более высокой эффективностью работы. Все эти критерии учитываются при разработке перспективных энергетических технологий на основе возобновляемой энергетики.

В современной экономике можно выделить три перспективных направления развития технологий: информационные технологии, нанотехнологии и биотехнологии [7].

Развитие биотехнологической отрасли, выведение научных исследований и промышленного производства на глобальный уровень конкурентоспособности невозможны без реализации целенаправленной государственной политики. Речь идет не только о финансовой поддержке, но и о снятии имеющихся регулятивных барьеров, в том числе в области таможенного, а также технического регулирования, создании стимулов для формирования отрасли, построении необходимой технологической инфраструктуры, создании спроса на продукцию, координации усилий государства, научных организаций и участников рынка. Нужно понять, что масштабы и темпы необходимых перемен определяются не готовностью российской экономики, а скоростью, с которой эти перемены происходят в мире. Таким образом, необходимо принимать решения по широкому кругу вопросов в очень короткие сроки.

Решение перечисленных проблем явилось основной целью разработки и принятия Правительством Комплексной Программы развития биотехнологий в Российской Федерации [1].

Постановка задачи и цели исследования

В спектре вопросов развития биоэнергетики в России эти задачи решаются в настоящее время в рамках разработанной Минэнерго России государственной программы Российской Федерации "Энергоэффективность и развитие энергетики" [2]. Планируется разработка и осуществление следующих комплексов мероприятий.

Долгосрочной целью реализации Программы является выход в 2020 году на объем биоэкономики в России в размере около 1% ВВП, а в 2030 году - не менее 3% ВВП. Стратегической целью

Программы является выход России на лидирующие позиции в области разработки биотехнологий, в том числе по отдельным направлениям биомедицины, агробиотехнологий, промышленной биотехнологии и биоэнергетики, и создание глобально конкурентоспособного сектора биоэкономики, который наряду с наноиндустрией и информационными технологиями должен стать основой модернизации и построения эффективной экономики в России.

Для России биоэнергетика является одним из наиболее перспективных видов использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). И прежде всего – в области использования отходов аграрно-промышленного, деревообрабатывающего секторов, пищевой промышленности, а также бытовых отходов [8].

Основная доля тех немногих инвестиций, которые в РФ были направлены на развитие ВИЭ, также пришлось на биоэнергетику. Однако серьезных позиций в энергобалансе страны биоэнергетика по-прежнему не занимает.

Эксперты оценивают общий технический потенциал биомассы в РФ в 15-20 тысяч МВт (для сравнения: мощность всех АЭС России составляет около 24 тысяч МВт). Инвесторы уже обращают внимание на потенциал биоэнергетического сектора в России. Так, по данным аналитической компании Rosbioconsulting, на протяжении последних десяти лет накопленные инвестиции в биоэнергетику выросли в 18-20 раз; объем инвестиций в биоэнергетику составил порядка 30 млрд рублей, или 88-90% от общего объема инвестиций в ВИЭ в стране.

По данным институтов ОИВТ РАН и «Ростовтеплоэлектропроект», стоимость 1 кВт установленной мощности энергетических установок с использованием биотоплива, находится в пределах от 2000 до 4000 евро [4]. В то же время удельная стоимость крупных АЭС оценивается в 3500 – 5000 евро за кВт [9]. Современные угольные электростанции оцениваются примерно в 2500–3500 евро за 1 кВт. Определенные преимущества имеет газовая генерация со стоимостью около 2000–2500 евро за 1 кВт. Однако цены на газ стремительно растут, приближаясь к европейскому уровню. И это приводит уже сегодня к низкой рентабельности, либо даже к убыточности (при отсутствии господдержки) сооружаемых электростанций на газовом топливе.

Отметим для сравнения, что стоимость 1 кВт крупных современных сетевых ветроэлектростанций составляет не более 1600–1800 евро, а солнечных – 1200–1500 евро.

Результаты исследований

На кафедре «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» Института ядерной энергии и промышленности СевГУ были проведены исследования биогазовой установки.

На рис.1 показана структурная схема одного из вариантов биогазовых установок.

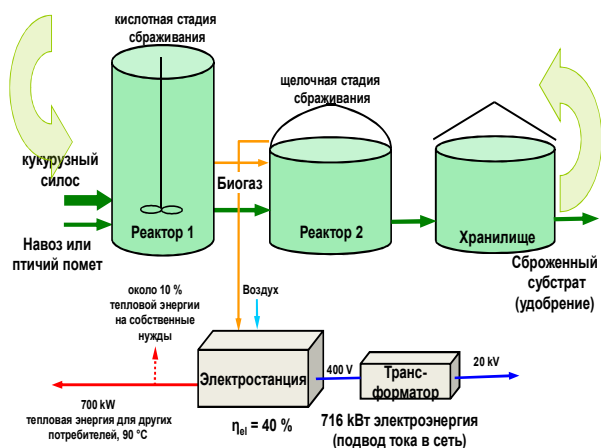


Рис.1. Структурная схема биогазовой установки.

Отходы сельхозпроизводства в реакторах-ферментерах 1 и 2 проходят стадию анаэробного сбраживания с выделением биогаза [6]. Биогаз поступает из реактора 2 на газопоршневую электростанцию. Электрическая мощность электростанции на напряжении 0,4 кВ выдается через трансформатор (или без него) в сеть, а тепловая мощность – потребителям тепловой энергии в виде теплоносителя с температурой в прямой магистрали до 90...95 ОС. Около 10 % тепловой энергии расходуется в среднем по году на поддержание процесса ферментации в реакторе 1.

Перебродивший субстрат перекачивается из реактора 2 в резервуар-хранилище, откуда далее, в жидком виде или после осушки, поступает на реализацию в качестве биоудобрений.

Главная особенность биоудобрения в том, что оно содержит активные полезные микроорганизмы, такие как метаногены и родственные им бактерии. Эти ризосферные микроорганизмы, попадая в почву, оказывают громадное влияние на растения, снабжая их физиологически активными веществами, витаминами, доступным азотом (азотификация), усиливают солюбилизацию фосфатов, высвобождают другие элементы питания растений из почвенных минералов. Биоудобрение напрямую усиливает активность основного процесса растений – фотосинтеза.

При постоянном использовании биоудобрения в почве образуются гуминовые материалы,

улучшаются ее аэрация, водоудерживающая и инфильтрационная способность, скорость катионного обмена. Идет естественное восстановление утраченного плодородия почв. Поскольку при применении микробиологического удобрения в почве идут экзотермические процессы, увеличивается ее теплоемкость, это приводит к ускорению всхожести, цветения и плодоношения, лучшему корнеобразованию [3,5].

Таблица 1. Параметры пиролизных газогенераторов для биомассы

Поставщик	Основные параметры газогенераторов					
	Объем перерабатываемой биомассы, т/сут.	Производительность по генерат. газу, нм³/ч	Возможная электрическая мощность, кВт	Стоимость комплекта		Общий вид
				тыс. €*	млн. руб.	
<i>Chelengqing Fengyu Electric Co, Ltd, Kumai</i>						
Генератор HLC-200	7...9	800	200	500	35	Рис.2
Генератор HLC-400	14...17	1500	400	900	63	-
Генератор HLC-800	29...35	2800	800	1700	85	-
Генератор HLC-1000	36...43	3700	1000	2200	190	Рис.3
<i>Flex Technologies Inc., Индия</i>	24...30	1000	250	700	49	Рис.4
<i>Фирма «Татьяна», Украина, Киев</i>	16...18	700	200	340	23,8	Рис.5
ООО «Технокомплекс», РФ, Ростов-на-Дону	15...20	1700	500	60	4,2	Рис.6
Генератор MIT-1-500	22...25	2800	800	170	11,9	Рис.7
Генератор УГЛАС800						
ООО «Металлоконструкция», РФ, Тюмень	6...8	750	200	75	52,5	Рис.8
ООО «Экотехнопром», РФ, Казань	25...30	3500	1000	300	21	Рис.9

Метод газификации низкосортных твердых топлив не позволил получить горючие газы с теплотой сгорания более 6 МДж/м³. Пиролитический метод переработки дал возможность получить горючие газы с заметно более высокой

теплотворной способностью, но имеют тот недостаток, что в составе получаемых газов содержится значительная доля двуокиси углерода и азота при низком выходе пиролизных газов [11]. В результате энергетическая эффективность конверсии исходного сырья не превысила 30 %.

Биогаз, содержащий значительную долю метана, может служить хорошим топливом для мини-ТЭС и мини-ТЭЦ, правда, с некоторым снижением их мощности в сравнении с использованием природного газа.

В целом, при грамотной организации полного сбыта вырабатываемых электрической и тепловой энергии и биоудобрений, биогазовые установки обладают следующими несомненными достоинствами:

- полная утилизация отходов;
- полная автоматизация процесса;
- производство из отходов дешевого топлива, электричества и тепла;
- производство из отходов эффективных органических удобрений;
- значительное улучшение экологической обстановки.

Выводы

Исследования, представленные в этой работе, показали эффективность внедрения в энергетические комплексы установок, использующих биогаз и биотоплива, полученные в результате переработки отходов сельскохозяйственного производства.

Экологический эффект от замещения энергосистем, использующих ископаемые органические топлива высокотехнологичными биосистемами, может иметь значительную социальную и экономическую эффективность [10].

В Российской Федерации имеются сегодня все условия для выхода на самые передовые рубежи по производству газообразных, твердых и жидких биотоплив. На начальном периоде, когда для сооружения новых технологических установок потребуются определенные инвестиции, нужна государственная поддержка. После окончания сроков окупаемости инвестиций, отпускные цены на получаемую продукцию можно будет значительно снизить. А это повлечет за собой соответствующее снижение тарифов на электрическую и тепловую энергию, на транспортные расходы и другие области использования биотоплива и позволит заметно улучшить климат экономического окружения в промышленности и сельском хозяйстве страны.

Список литературы

1. «Комплексная программа развития биотехнологий в Российской Федерации на период до 2020 года». ВП-П8-2322. Утв. Постановлением Правительства РФ от 24.04.12 № 1853п-178.
2. Государственная программа «Энергоэффективность и развитие энергетики». Утв. Постановлением Правительства РФ от 15.04.2014 № 321. Кувшинов В.В. Биогазовые технологии в сельском хозяйстве. Проблемы и перспективы развития в республике Крым. / И.Г. Жиганов, В.В. Смирнов, А.А. Важенин, Э.Л. Хайбулаев // В сборнике. международной научно-практической конференции - Экологическая промышленная и энергетическая безопасность '09. 2018. С. 637-642.
3. Кувшинов В.В. Биогазовые технологии в сельском хозяйстве. Проблемы и перспективы развития в республике Крым. / И.Г. Жиганов, В.В. Смирнов, А.А. Важенин, Э.Л. Хайбулаев // В сборнике. международной научно-практической конференции - Экологическая промышленная и энергетическая безопасность '09. 2018. С. 637-642.
4. Гурьев В.В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики Крым и г. Севастополя. / Е.Г. Какушина, Б.А. Якимович, В.В. Кувшинов // Энергетические установки и технологии. 2019. Том 5, № 2, С. 90-93.
5. Жиганов И.Г. Комбинированная солнечно-биоэнергетическая установка для сельского хозяйства республики Крым. / В.В. Кувшинова, А.А. Ненько, Д.С. Здарьев // Энергетические установки и технологии. 2019. Том 5, № 2, С. 94-98.
6. Кувшинов В.В. Использование солнечных электростанций для обеспечения энергетической безопасности Крымского региона. / Ф. М. Аль-Руфай и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 4, С. 252-255.
7. Кувшинов В.В. Система хранения для солнечных станций. / Коломийченко В.П., Какушина Е.Г. и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 3, С. 153-158.
8. Кувшинов В.В. Исследование характеристик фотозлектрической решетки с изменением поверхностной освещенности решетки. / АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г., Крит, Б. Л., Морозова, Н. В., Кувшинова В. В. // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 4, С. 223-228.
9. Вологдин С.В. Анализ различных сценариев энергоснабжения Крыма с учетом режимов работы солнечной электростанции. / Якимович Б.А., Кувшинов В.В., АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г. и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том 55, № 4, С. 229-234.
10. Гурьев В.В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики Крым и г. Севастополя / Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Кувшинов В.В. // Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 90-93.
11. Зайченко В.М. Направления развития энерге-

тики. /Чернявский А.А., Кувшинов В.В., Какущина Е.Г., Абейдулин С.А.//Энергетические установки и технологии. 2019 - Т. 5. № 3. С. 53-61.

References

1. "Comprehensive program for the development of biotechnologies in the Russian Federation for the period up to 2020". VP-P8-2322. Approved. Resolution of the Government of the Russian Federation dated 24.04.12 No. 1853p-178.
2. State program "energy Efficiency and energy development". Resolution of the Government of the Russian Federation of 15.04.2014 No. 321. Kuvshinov V. V. Biogas technologies in agriculture. Problems and prospects of development in the Republic of Crimea/ I. G. Zhiganov, V. V. Smirnov, A. A. Vazhenin, E. L. Khaibulaev// In the collection. international scientific and practical conference-Environmental industrial and energy security ' 09. 2018. pp. 637-642.
3. Kuvshinov V. V. Biogas technologies in agriculture. Problems and prospects of development in the Republic of Crimea/ I. G. Zhiganov, V. V. Smirnov, A. A. Vazhenin, E. L. Khaibulaev// In the collection. international scientific and practical conference-Environmental industrial and energy security ' 09. 2018. p. 637-642.
4. Guryev V. V. Development of renewable sources of electricity in the power system of the Republic of Crimea and Sevastopol./ E. G. Chekushina, B. A. Yakimovich, V. Kuvshinov// Energy installations and technologies. 2019. Volume 5, No. 2, pp. 90-93.
5. Zhiganov I. G. Combined solar-bioenergetic installation for rural housing of the Republic of Crimea. / V. V. Kuvshinova, A. A. Nenko, D. S. Zdariev// Energy installations and technologies. 2019. Volume 5, No. 2, pp. 94-98.
6. Kuvshinov V.V. The use of solar power plants to ensure energy security of the Crimean region. / F.M. Al-Rufai and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, No. 4, pp. 252–255.
7. Kuvshinov V.V. Storage system for solar stations. / Kolomiychenko V.P., Kakushina E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, No. 3, pp. 153–158.
8. Kuvshinov V.V. Study of the characteristics of the photoelectric grating with a change in the surface illumination of the grating. / AbdAli L. M., Kakushina, E. G., Crete, B. L., Morozova, N.V., Kuvshinova V.V.// Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, No. 4, pp. 223–228.
9. Vologdin S.V. Analysis of various scenarios of Crimea's energy supply, taking into account the operating modes of the solar power station. / Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., AbdAli L.M., Kakushina, E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume 55, No. 4, pp. 229–234.
10. Guryev V.V. Development of renewable energy sources in the energy system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol / Kakushina E.G., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V.// Power plants and technologies - 2019. V. 5. No. 2. pp. 90-93.
11. Zaichenko V.M. Directions of energy development. / Chernyavsky A.A., Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Abeydulin S.A.// Power plants and technologies. 2019 - Т. 5. No. 3. pp. 53-61.

УДК 621.383.51

Применение фотоэлектрических панелей нового поколения для увеличения эффективности работы солнечных установок

И.А. Кочетов¹, М.А. Старченко², В.В. Кувшинов³, Е.Г. Какушина, Р.Г. Калиев⁵
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия. ¹ kochetov.vano@mail.ru, ² warrior2me@gmail.com, ³ kuvshinov.vladimir@gmail.com,
⁴ little@mail.ru, ⁵ kaliev@mail.ru,

Статья поступила 04.06.2020 г.; после доработки 18.06.2020 г.

Аннотация

В настоящее время одними из основных мировых проблем являются проблемы, связанные с экологией. Здания не только ухудшают природу, но и потребляют высокое количество энергии: 40 % энергии в мире расходуется на освещение, работу кондиционеров, отопление и т. д. При внедрении ряда инноваций по энергоэффективности можно улучшить экологическую ситуацию в мире.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, солнечные панели, экология, распределенная энергетика.

The use of new generation solar panels to improve the environmental situation

I.A. Kochetov¹, M.A. Starchenko², V.V. Kuvshinov³, E.G. Kakyshina, R.G. Kaliev
FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,
Sevastopol, 299053, Russia. ¹ kochetov.vano@mail.ru, ² warrior2me@gmail.com, ³ kuvshinov.vladimir@gmail.com, ⁴ little@mail.ru, ⁵ kaliev@mail.ru,

Received 04.06.2020 y.; received in final form 18.06.2020 y.

Abstract

Currently, one of the main global problems are environmental problems. Buildings not only degrade nature, but also consume a high amount of energy: 40% of the world's energy is spent on lighting, air conditioning, heating, etc. With the introduction of a number of energy efficiency innovations, the environmental situation in the world can be improved.

Keywords: renewable energy, solar panels, ecology, distributed energy.

Введение

На сегодняшний день задача выработки электроэнергии стоит на переднем плане, причем потребности в ней увеличиваются с каждым годом. Но запасы традиционных природных ресурсов (нефти, угля, газа и др.) исчерпаемые, как и запасы ядерного топлива - урана и тория, из которого получают плутоний. Практически неисчерпаемы запасы термоядерного топлива - водорода, однако управляемые термоядерные реакции пока не освоены, но неизвестно когда их будут применять для промышленного получения энергии в чистом виде, т.е. без использования в этом процессе реакторов деления. Поэтому при

данных проблемах становится все предпочтительнее применение нетрадиционных энергоносителей, в первую очередь солнечной, ветровой, геотермальной энергии, совместно с внедрением энергосберегающих технологий.

Среди возобновляемых источников энергии солнечная радиация по масштабам ресурсов, экологической чистоте и повсеместной распространенности наиболее перспективна. Солнечная энергетика — это направление нетрадиционной энергетики, основанное на непосредственном использовании солнечного излучения для получения энергии. Солнечная энергетика использует возобновляемый источник энергии и

является экологически чистой, то есть не производит вредных отходов.

Анализ проблемы и постановка задачи

В настоящее время вопрос по улучшению экологической ситуации стоит на первом месте. Источниками парникового газа являются не только машины и заводы, но также огромным источником парниковых газов являются дома, в которых мы с вами проживаем: 40 % энергии в мире идет на освещение, работу кондиционеров, отопление и т. д. Наши дома не просто ухудшают природу, но и нуждаются в большом количестве энергии.

В процессе выработки энергии, необходимой для нужд города, в атмосферу выбрасываются сотни тонн загрязняющих веществ и диоксида углерода. Выбросы CO_2 приводит к глобальному потеплению и природным катаклизмам, происходящих в мире. В мире уже существуют здания, которые используют то, что нам дает природа, на благо, используя при этом стеклянные солнечные панели.

В настоящее время задачей исследователей является использование различных разработок для создания в качестве панелей, добывающих солнечную энергию, оконных стекол. Такие установки применяются для создания солнечных крыш, фасадов, балконов и окон, а также для навесов автостоянок. Это позволяет существенно экономить электроэнергию.

Солнечные панели Компании Sharp

В 2012 году корпорация Sharp представляет необычное решение внедрения альтернативных источников энергии, а именно новую полупрозрачную (затемненную) солнечную панель, которая предназначена для использования в балконах или в виде окон в высотных зданиях, где она может генерировать энергию, а также пропускать свет.

Компания начала изготавливать фотоэлектрические модули серии NA-B095AA из полупрозрачного (затемненного) стекла. Фотоэлементы, которые блокируют свет и производят электроэнергию, работают с КПД 6,8%. Фотоэлементы представлены в виде мелкой сетки, которая придает солнечным модулям современный стильный вид.

Выработка электроэнергии при помощи данного модуля размером 1,4 x 1 метр может производить 95 Ватт электроэнергии. Одного такого окна будет хватать для производства энергии для освещения нескольких комнат. Если же

на здание установить множество фотомодулей и использовать энергосберегающие технологии, то панели уже могут внести серьезный вклад в обеспечение жилья энергией.

Модули серии NA-B095AA производят примерно в три раза меньше электричества, чем классические солнечные панели, зато они могут внедряться практически повсеместно и почти незаметно. К тому же, солнечные панели от Sharp имеют толщину всего 1 см.

Такие полупрозрачные панели частично затемняют помещение, что довольно востребовано в странах с высокой солнечной активностью, также их можно использовать как балконные ограды или декоративный элемент.

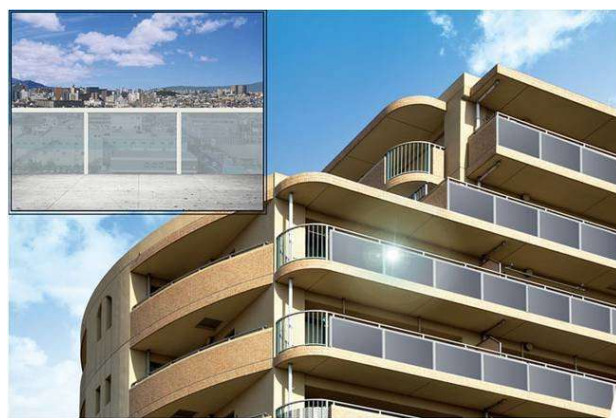


Рис. 1. Остекления балконов и больших зданий

На основании устройства этих панелей многие ученые и инженеры стали применять этот принцип работы для своих дальнейших разработок. Ведь при условии, что окно составляет от 20% площади фасада любого строения, то это влечет за собой большой потенциал для исследования и хорошая возможность использовать солнечную энергию для того же жилища. Так начали появляться новые образцы "солнечных" стекол для производства энергии.

Солнечные панели Компании Aleo Solar

Немецкая компания Aleo Solar представила стеклянные солнечные панели. В будущем перспектива солнечной энергетики во многом будет опираться на интегрированную фотовольтаику, одним из направлений которой является BIPV (Building-integrated photovoltaics) – солнечные панели, встроенные в конструкционные материалы зданий. Особенно актуальной эта технология может стать для архитекторов, дизайнеров и

инженеров, занятых в строительной сфере. Стекланные фотоэлектрические панели от немецкой компании Aleo Solar позволят облегчить использование солнечной энергии в рамках самых различных проектов без ущерба для эстетики и качества. Полупрозрачные солнечные модули от Aleo Solar серии Elegante являются одним из самых передовых решений в области строительно-отделочной интеграции фотоэлементов. Они могут применяться для создания солнечных крыш, фасадов, балконов и окон, а также для навесов автостоянок.

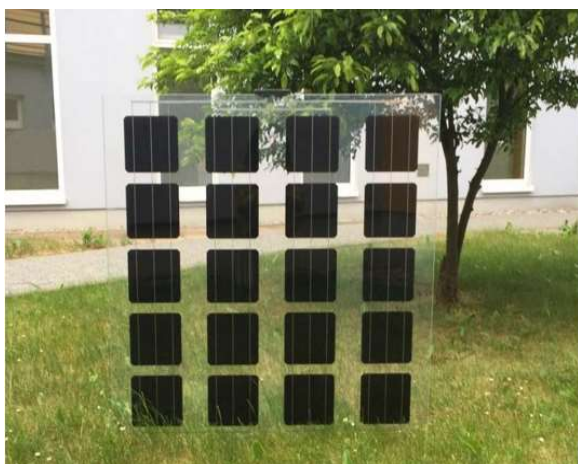


Рис.2. Полупрозрачные солнечные модули серии Elegante

Солнечные панели серии Elegante представляют собой монокристаллические ячейки, запаянные между двумя цельными стеклянными панелями размером 600x950x9мм с толщиной стекла 4 мм. Их надежность подтверждена немецким сертификатом DIBt Z-70.3-232, позволяющим безопасное использование в высотных конструкциях.

Главная особенность технологий BIPV состоит в широком диапазоне пользовательских размеров.

Также чрезвычайно важны длительный срок эксплуатации таких солнечных панелей и эстетические характеристики.

Солнечные модули серии Elegante можно аккуратно нарезать по размеру и применять при окончательной отделке здания как декоративный элемент.

Солнечные панели Компании NREL

Ученые Национальной лаборатории по изу-

чению возобновляемой энергии создали оконную солнечную панель, при этом сосредоточились на "эффекте прозрачности" оконного стекла.



Рис.3. Применение панелей на балконах

Изготовленное стекло автоматически может темнеть и светлеть в зависимости от интенсивности солнечного излучения. Стекло темнеет и производит энергию, когда поток солнечного света проходит сквозь него, поглощая свет. Когда поток солнечного света уменьшается, то стекло окна становится прозрачным.

В потемневшем состоянии стекло пропускает не более 3 % солнечного спектра, когда они прозрачные - 68 %. Эффективность преобразования солнечного света в электроэнергию составляет 11 %, что является не самым лучшим результатом на текущий момент, но достаточно хороший показатель для данной технологии.

На рис.4. представлено:

- а) схема архитектуры оконного устройства PV и процесса коммутации;
- б) коэффициент пропускания фотоэлектрических приборов в отбеленном и окрашенном состояниях в зависимости от длины волны;
- в) плотность тока в зависимости от напряжения переключаемого фотоэлектрического устройства в темное время суток (пунктир) и при освещении (сплошное);
- г) ток короткого замыкания в зависимости от времени в течение 20 циклов при трёх минутном освещении и с последующими пятью минутами охлаждения в темноте;
- д) ток короткого замыкания в зависимости от времени первого цикла освещения.

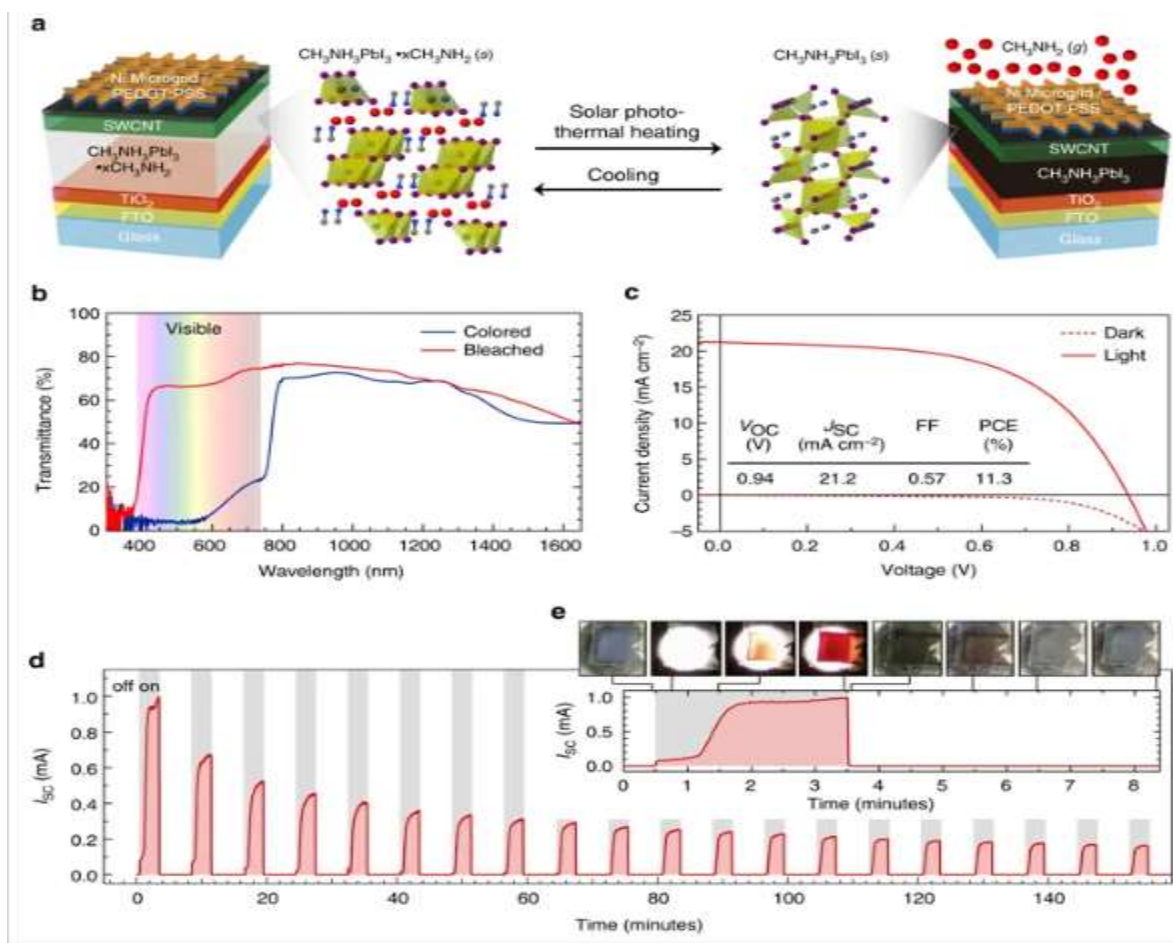


Рис.4. Состав и производительность переключаемых фотоэлектрических устройств. Схема архитектуры оконного устройства PV (photovoltaic) и процесс переключения.

Солнечные прозрачные элементы получают при помощи перовскитов (редкий Земельный минерал титаната кальция, CaTiO_3) и однослойных углеродных нанотрубок. Полученный элемент реагирует на тепло солнечного света, и превращается в тонированное состояние.

Изменение происходит благодаря молекулам метиламина. При нагревании, молекулы вытесняются, что приводит к потемнению устройства. Когда солнце не светит, элемент охлаждается, и молекулы повторно поглощаются, что приводит к восстановлению прозрачности.

На испытаниях стекло смогло пройти повторяющиеся циклы тонировки и прозрачности, но после 20 циклов эффективность начала снижаться. На данный момент разрабатывают решения для улучшения стабильности, чтобы переключение происходило без ущерба производительности.

Данная технология, может быть объединена с предыдущими технологиями и использована

также в здания и транспортные средства.

Заключение

Использование фотоэлектрических панелей нового поколения, совмещенных с конструкциями зданий и сооружений, позволяет значительно экономить площади, необходимые для установки классических солнечных батарей. Это позволяет для обеспечения индивидуальных потребителей устанавливать электроустановки гораздо большей мощности.

Применение электрических установок нового типа позволяет значительно увеличить долю использования возобновляемых источников энергии в общем энергобалансе.

Предложенные решения по применению солнечных прозрачных панелей устанавливаемые на крышах, фасадах, балконах и окнах, а также для навесов автостоянок, позволяют решить проблемы экологии, энергосбережения, экономии природных ресурсов в стране.

Также использование этих технологий архи-

текторами, дизайнерами и инженерами, занятыми в строительной сфере, предоставляет дополнительные возможности для придания зданиям эстетики и качества.

Список литературы

1. Маклакова Т. Г. Высотные здания. Градостроительные и архитектурно-конструктивные проблемы проектирования: монография / Маклакова Т. Г. – Москва : АСВ, 2006. – 160с.
2. Миласечкина О. Н. Энергосберегающие здания / Миласечкина О. Н., Ежова И. К. – Саратов: СГТУ, 2006.– 75 с.
3. Табунщиков Ю. А. Энергоэффективные здания / Табунщиков Ю. А., Бродач М. М., Шилкин Н. В. – Москва: Авок-пресс, 2003. – 196с.
4. Nature [Электронный ресурс] : nature communications. – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://www.nature.com/articles/s41467-017-01842-4>. - Загл. с экрана.
5. BuildingTECH [Электронный ресурс] : Технология энергии. – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://building-tech.org/nemeckaya-kompaniya-aleo-solar-sozdala-steklyannyesolnechnye-paneli-dlya-krysh-fasadov-okon-i-balkonov/>. - Загл. с экрана.

References

1. Maklakova T. G. High-rise buildings. Town-building and architectural-constructive design problems: monograph / Maklakova T. G. - Moscow: DIA, 2006. - 160 p.
2. Milashechkina O. N. Energy-efficient buildings / Milashechkina O. N., Yezhova I. K. - Saratov: SSTU, 2006.– 75 p.
3. Tabunshchikov Yu. A. Energy-efficient buildings / Tabunshchikov Yu. A., Brodach M.M., Shilkin N.V. - Moscow: Avok-press, 2003. - 196 p.
4. Nature [Electronic resource]: nature communications. - The electron. Dan. - Access mode: <https://www.nature.com/articles/s41467-017-01842-4>. - Zagl. from the screen.
5. BuildingTECH [Electronic resource]: energy Technology. - Electron. Dan. – Mode of access: <https://building-tech.org/nemeckaya-kompaniya-aleo-solar-sozdala-steklyannyesolnechnye-paneli-dlya-krysh-fasadov-okon-i-balkonov/>. - Stub from the screen.

УДК 620.92

Обзор гибридных фотоэлектрических и ветровых энергетических систем

Ю.А. Майорова¹, Е.А. Михайленко², К.П. Путилин³, Н.Н. Смокталь⁴ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия. ¹gaika20041983@mail.ru, ²jexsond@gmail.com, ³putilin-kp39@mail.ru, ⁴NNSmoktal@sevsu.ru

Статья поступила 24.06.2020 г.; после доработки 26.06.2020 г.

Аннотация

В статье рассмотрены перспективы применения систем гибридного электроснабжения с возможностью выдачи в сеть энергии от возобновляемых источников, таких как ветроэнергетические и фотоэлектрические установки, которые могут дополнять и усиливать мощность друг друга в зависимости от условий окружающей среды. В работе представлен обзор современного состояния как сетевых, так и автономных гибридных солнечных батарей и ветрогенерирующих систем. Колебания напряжения и частоты, а также наличие гармоник являются основными проблемами качества электроэнергии, как для подключенных к сети, так и для автономных систем электроснабжения. Предлагаются возможные решения проблем интеграции гибридных фотоэлектрических и ветрогенерирующих энергетических систем.

Ключевые слова: ветровая система, автономные системы, фотоэлектрические системы, качество электроэнергии, гибридная система, интеграция энергии

Overview of hybrid photovoltaic and wind power systems

Ju.A. Majorova¹, E.A. Mihajlenko², K.P. Putilin³, N.N. Smoktal⁴

"Sevastopol State University", 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia.

¹gaika20041983@mail.ru, ²jexsond@gmail.com, ³putilin-kp39@mail.ru, ⁴NNSmoktal@sevsu.ru

Received 24.06.2020 y.; received in final form 26.06.2020 y.

Abstract

The article discusses the prospects for using hybrid power supply systems with the possibility of returning renewable energy to the grid, such as wind power and photovoltaic installations, which can complement and strengthen each other depending on environmental conditions. The article also provides an overview of the current state of both network and Autonomous hybrid solar Bata-Rey and wind systems. Fluctuations in voltage, frequency, and harmonics are the main problems of power quality, both for connected and Autonomous systems. Possible solutions to the problems of hybrid photovoltaic systems and wind energy integration systems are proposed.

Keywords: wind system, autonomous systems, photovoltaic systems, power quality, hybrid system, energy integration

Введение

Глобальное внедрение возобновляемых источников энергии в энергетические системы стремительно растет. Этот рост особенно велик для солнечных фотоэлектрических (ФЭ) и ветрогенерирующих установок.

Возобновляемые источники энергии составили около 34% от общего объема производства потребляемой энергии во всем мире в 2018 году и этот процент продолжал расти в течение 2019 года по данным отчета о глобальном состоянии возобновляемых источников энергии за 2020 год [1]. В отчете подчеркивается, что

впервые мощность единичной фотоэлектрической установки стала больше, чем мощность единичной ветроустановки.

Солнечная и ветровая генерация прерывиста и может создать технические проблемы с сетевым электроснабжением, особенно когда количество установленной солнечной и ветровой генерации увеличивается либо сеть является сетью малой мощности и запаса её мощности оказывается недостаточно, чтобы сгладить быстрые изменениями уровня генерации. Кроме того, если солнечная и ветровая генерация используется для питания автономной системы, необходимо установить систему накопления энергии, для обеспечения непрерывной и бесперебойной выдачи электроэнергии. Размер накопителя энергии зависит от изменения уровня солнечного излучения или изменения ветрового потока.

Таблица 1 содержит глобальные показатели использования возобновляемых источников энергии, которые отражают достаточно быстрый прирост доли ВИЭ.

Таблица 1. Глобальные показатели использования возобновляемых источников энергии, ГВт

	2018	2019	2020
Установленная мощность возобновляемых источников энергии (с гидрогенерацией)	156	176	192
Установленная мощность возобновляемых источников энергии (без гидрогенерации)	84	85	89
Установленная мощность солнечных фотоэлектрических установок	402	450	500
Установленная мощность ветроэнергетики	395	410	440
Установленная мощность концентрации солнечной тепловой энергии	17	18	19

В данной статье представлен обзор проблем и возможностей для развития гибридной системы на основе солнечной фотоэлектрической генерации и генерации от ветра. В статье рассматриваются основные научно-исследовательские

работы, связанные с поиском оптимального размера установки, топологией силовой электроники и управления как сетевыми, так и отдельно стоящими гибридно-солнечными и ветровыми системами.

Гибридные солнечно-ветровые системы

Гибридные фотоэлектрические и ветрогенерирующие системы могут служить хорошим решением для задач автономного применения. Совмещение двух источников, а именно, солнечной энергии и ветра, обеспечивает общую надежность системы электроснабжения. Их комбинированный симбиоз становится более экономичным в эксплуатации, так как источники могут подпитывать друг друга. Внедрение гибридных солнечных и ветрогенерирующих систем способствует дополнительному повышению экономичности и надежности использования возобновляемых источников энергии. Аналогичным образом, внедрение гибридной солнечной и ветровой генерации в автономные системы позволяет уменьшить размер накопителя энергии, необходимого для непрерывного электроснабжения.

Солнечные системы генерации электроэнергии используют либо фотовольтаику, либо концентрированную солнечную энергию. Основное внимание в этой работе будет уделено способу генерации. Детальные описания различных технологий, физику и основы фотоэлектроники можно найти во многих учебниках и статьях, например, [2]. Фотоэлектрические модули определяются в основном по уровню падающего излучения. По мере увеличения интенсивности света фототок будет увеличиваться, а напряжение разомкнутой цепи уменьшаться. Эффективность любого фотоэлектрического элемента снижается с увеличением температуры, которая неравномерно распределяется по всей ячейке [3]. Выходная мощность от фотоэлектрической панели может быть сглажена с помощью распределения солнечной генерации в различных географических районах. Электроэнергия от солнечных фотоэлектрических и солнечных электростанций с концентраторами значительно дороже и требует существенного снижения стоимости или изменения политики путем либо субсидирования, либо принуждения к использованию этих технологий, с целью достичь значительного выхода на рынок

электроэнергии.

Глобальный отчет о ветрогенерации показал, что годовой рынок вырос примерно на 15%, и достиг примерно 563 ГВт, а совокупный рост рынка составил почти 24%. Ветроустановки (далее ВТ) делятся на два типа: горизонтально-осевые ВТ и вертикально-осевые ВТ.

Гибридные солнечно-ветровые системы можно разделить на два типа: подключенные к сети и автономные. Из-за природы гибридных фотоэлектрических установок и ветрогенераторов методы оптимизации играют большую роль в эффективном их использовании. Графический метод построения, линейное программирование и вероятностный подход - несколько примеров методов оптимизации, которые были разработаны для технико-экономической оптимальной гибридной возобновляемой энергетической системы обоих типов [4,5].

Подключение к системе

Внедрение комбинированных солнечных и ветроэнергетических систем в энергосистему может способствовать снижению общей стоимости и повышению надежности использования возобновляемых источников энергии для обеспечения подключаемой нагрузки. Сеть принимает избыточную энергию от объекта возобновляемой энергетики и при необходимости выдает ее объекту. Рис. 1 и рис. 2 показывают схемы соединения составных частей энергокомплексов между собой: с общей шиной постоянного тока и общей шиной переменного тока - подключающиеся к солнечным фотоэлектрическим и ветровым гибридным системам, соответственно.

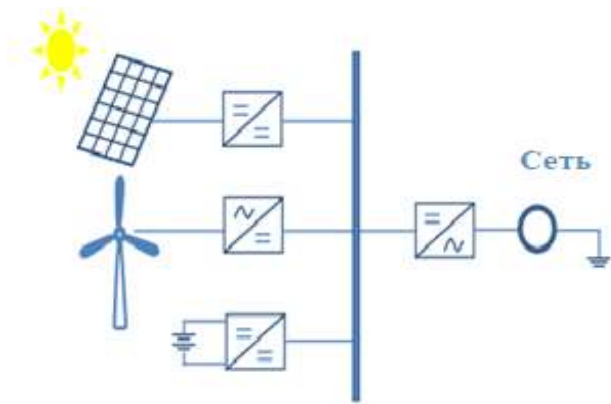


Рис.1. Сетевая гибридная система с общей шиной постоянного тока

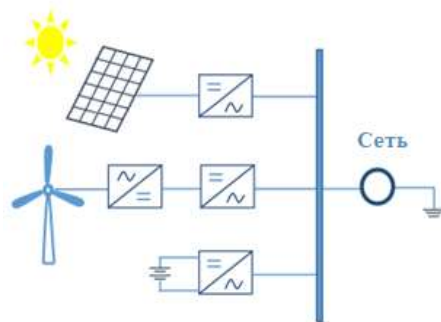


Рис.2. Гибридная система с сетевым подключением общей шины переменного тока

Оптимизация. Солнечные фотоэлектрические и ветроэнергетические системы не могут обеспечивать бесперебойное электроснабжение, потому что эти системы генерируют электроэнергию только во время солнечных и ветреных дней. Следовательно, сочетание этих двух источников улучшает общую выработку энергии, особенно если их подключить к сети. Для обеспечения оптимальной работы рассматриваемой системы требуется правильно оптимизировать, выбрать количество и размер ФЭ и ВТ. Традиционный метод калибровки гибридных солнечных фотоэлектрических и ветровых систем основан на наличии долгосрочных метеорологических данных, таких как солнечная активность и скорость ветра. Поскольку долгосрочные данные о погоде не всегда достоверны, используются методы искусственного интеллекта, такие как нечеткая логика, генетические алгоритмы и искусственная нейронная сеть. Кроме того, оптимизируются такие показатели эффективности, как чистая приведенная стоимость, энергетический индекс надежности и ожидаемая не поставляемая энергия, стоимость энергии.

Топология и управление силовой электроникой. Существует две топологии сети солнечной и ветровой гибридной системы, как видно из рис. 1 и рис. 2. Рис. 1 показывает, что напряжения на выходах постоянного тока от отдельных фотоэлектрических, ветровых и аккумуляторных батарей интегрированы на стороне постоянного тока через отдельные блоки силовых преобразователей и выпрямителей. Эти напряжения проходят через один общий инвертор, который действует как связь между источниками питания и сетью. Такое соединение обусловлено необходимостью обеспечения желаемой мощности при наличии только одного источника питания. Таким образом,

возобновляемые источники энергии действуют как источники тока и могут обмениваться энергией с сетью и общим инвертором, который управляет напряжением шины постоянного тока. Отдельные блоки могут быть использованы для отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ) с целью получения наибольшей мощности от фотоэлектрических и ветроэнергетических систем, а общий инвертор будет управлять напряжением шины постоянного тока. Аккумуляторная батарея заряжается при наличии дополнительной мощности в системе и разряжается (путем подачи питания) от возобновляемых источников энергии при дефиците мощности. С другой стороны, на рис. 2 показано, что возобновляемые источники энергии подают энергию непосредственно в сеть через отдельные блоки инверторов и силовых преобразователей по типу выпрямитель-инвертор.

Поскольку выходное напряжение шины постоянного тока от каждого преобразователя фиксированное и управляется независимо в этой системе, контроллер ветрогенератора и фотоэлектрической панели имеют функцию ОТММ, в то время как контроллер заряда топливного элемента (ТЭ) выполняет компенсацию колебаний мощности нагрузки. Преобразователи напряжения играют важную роль в управлении величиной и типом напряжения, будь то переменный или постоянный ток. Рабочий цикл этих преобразователей может быть использован для улучшения показателей качества электроэнергии. Алгоритм управления конвертора работает относительно быстро в процессе поиска ОТММ. Зарядный ток батареи меняется с автоматической регулировкой рабочего цикла.

Качество электроэнергии. Возросшее количество подключенных к сетям возобновляемых источников энергии оказывает влияние на качество сетевой электроэнергии, в частности на слабые сети. Колебания напряжения, колебания частоты и гармоники являются основными проблемами качества электроэнергии. Кроме того, дискретность выдаваемой энергии от фотоэлектрических батарей и ветрогенераторов оказывают огромное влияние на надежность всей сети. Однако, точные системы прогнозирования и планирования могут свести к минимуму эти воздействия. Для прогнозирования характера погодных условий, солнечной инсоляции и скорости ветра

используются различные подходы и алгоритмы статистического прогнозирования и регрессионного анализа. Системный оператор может настроить дистанционно управляемую генерацию на другом участке системы, чтобы оперативно отреагировать на любой дефицит или избыток энергии от возобновляемой энергетики. Это позволит уменьшить влияние колебаний выработки от возобновляемых источников энергии. Кроме того, распределение ВЭ по большей географической зоне в виде единичных автономных установок малой мощности, вместо концентрации крупных мощностей в одной области, может снизить эффект прерывистости выработки электроэнергии от ВЭ. Устройства хранения энергии, такие как аккумуляторные батареи или источники бесперебойного питания (ИБП) могут выступать в роли балансирующих устройств. Они накапливают избыточную энергию и обеспечивают непрерывность генерации при дефиците поступающей энергии от ВЭ.

Изменение солнечной инсоляции и скорости ветра с течением времени может вызывать колебания напряжения. Характеристики колебаний напряжения зависят также от типа и величины нагрузки. Для решения проблемы колебаний напряжения могут быть использованы активные силовые фильтры, такие как динамические регуляторы напряжения, статические синхронные компенсаторы, включающие в себя анализаторы качества электроэнергии. Аналогично, устройство компенсации мощности, такое как конденсатор постоянной либо переменной емкости может использоваться для решения проблемы дисбаланса реактивной мощности. Компенсаторы реактивной мощности являются эффективным устройством сопряжения между распределительными сетями и конечным потребителем. Резкие изменения активной мощности, потребляемой нагрузкой в сетях переменного тока могут вызывать колебания частоты системы. Эти изменения представляют собой фактически дисбаланс между нагрузкой и генерацией. Учитывая сказанное выше, важно разработать алгоритмы управления мощностью и частотой для повышения качества электроэнергии. Основной задачей инверторного контроллера с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) является регулирование напряжения и частоты трехфазной локаль-

ной системы переменного тока в микросети. Гармонические искажения обычно вызываются силовыми электронными устройствами и нелинейными приборами. Для уменьшения гармонических искажений могут быть использованы соответствующие фильтры и ШИМ-коммутационный преобразователь.

Независимые (автономные) системы

Независимая или автономная энергосистема является отличным решением для отдаленных районов, в которых коммунальные объекты, в частности линии электропередачи, экономически нецелесообразны либо сложны в установке из-за их высокой стоимости и/или сложности рельефа местности и т.д. Автономные энергосистемы могут разделяться по типу соединения элементов на энергосистемы с общей шиной постоянного тока, либо общей шиной переменного тока. Переменная природа солнечных и ветровых ресурсов может быть частично преодолена путем интеграции этих двух ресурсов в оптимальную комбинацию, что в итоге повышает надежность всей системы. Для автономных энергокомплексов стоимость накопления и хранения электроэнергии по-прежнему представляет собой основную экономическую проблему.

Комбинирование фотоэлектрических и ветрогенерирующих мощностей позволяет минимизировать требования к хранению электроэнергии и, в конечном счете, общую стоимость всей системы электроснабжения. Увеличение количества фотоэлектрических панелей и мощностей ветряных турбин является оптимальным выбором по сравнению с увеличением количества аккумуляторных батарей. Это объясняется тем, что аккумуляторные батареи гораздо дороже и имеют более короткий срок службы по сравнению со временем жизни ФЭ или ВТ.

Оптимизация. Как уже упоминалось ранее, сочетание солнечной фотоэлектрической энергии и энергии от ветра улучшает общую выработку энергии. Однако система накопления энергии обязательно должна иметь непрерывный источник питания и покрывать любой дефицит выработки электроэнергии от возобновляемых источников энергии.

Система хранения может быть представлена аккумуляторными батареями, топливными эле-

ментами и т. д. Как правило, предпочтение отдается аккумуляторным батареям. Существуют различные методы оптимизации, применяющиеся для гибридной энергетической системы на основе возобновляемой энергетики [6]. Использование гибридных фотоэлектрических и ветрогенерирующих систем в отдаленных районах, представляющих собой большую часть автономного применения гибридных фотоэлектрических и ветровых систем, ставит под собой непростую задачу. Это обусловлено тем, что не всегда возможно легко найти долгосрочные погодные данные, такие как солнечное излучение и скорость ветра, которые используются для определения размеров энергокомплекса.

Таким образом, для определения размеров автономных систем используются следующие методы: нечеткая логика, генетические алгоритмы и искусственная нейронная сеть.

На основе экспериментальных результатов работы фотоэлектрических и ветроаккумулирующих гибридных систем предложены некоторые пути оптимизации модели с целью снижения стоимости периода эксплуатации и увеличения надежности системы [7].

Модульность и управление силовой электроникой. Существует два основных способа коммутации модулей для автономных фотоэлектрических и ветрогенерирующих гибридных систем, как уже упоминалось ранее: с общей шиной постоянного тока и общей шиной переменного тока. На рис. 3 показаны фотоэлектрическое устройство и ветрогенератор с общей шиной постоянного тока.

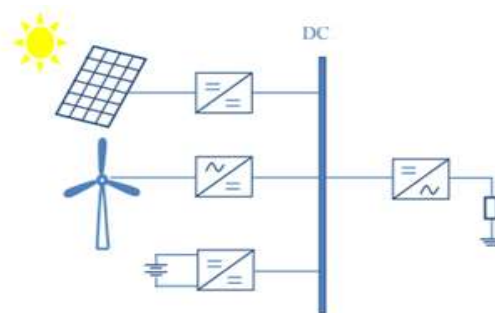


Рис.3. Автономная гибридная система с общей шиной постоянного тока

Одним из главных преимуществ такого типа коммутации является включение промежуточной

шины постоянного тока для соединения различных источников генерации, которые не должны работать на постоянной частоте и в синхронизме. Выходное напряжение шины постоянного тока от всех источников тока является фиксированным, а выходной ток контролируется от каждого источника независимо. Блок батарей взаимодействует с преобразователем постоянного тока, который регулирует напряжение шины постоянного тока путем зарядки (в случае дополнительной мощности) или разрядки батареи (в случае нехватки мощности). Возобновляемые источники энергии выступают в качестве источников тока и непосредственно обеспечивают нагрузку электроэнергией. Если блок промежуточной шины постоянного тока регулирует величину напряжения нагрузки, то индивидуальные блоки выпрямителей и конверторов можно использовать для ОТММ. Энергокомплексы генерируют максимальную мощность от фотоэлектрической и ветровой энергии, а общий инвертор контролирует величину напряжения на нагрузке. Аккумуляторная батарея действует как источник напряжения для управления общим напряжением шины постоянного тока путем зарядки или разрядки.

При стандартном способе управления гибридной системой силовые электронные преобразователи используются для максимальной выработки энергии от солнечных и ветровых энергетических ресурсов. Кроме того, современные методы управления позволяют устранить колебания мощности, вызванные непостоянством возобновляемых источников энергии. На рис. 4 показана автономная фотоэлектрическая и ветрогенерирующая гибридная система с общей шиной переменного тока.

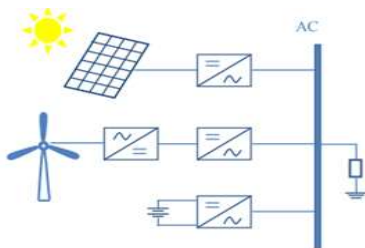


Рис.4. Автономная гибридная система с общей шиной переменного тока

Способ соединения генерирующих мощностей на переменном токе широко используется

длительное время и имеет ряд преимуществ. С другой стороны, при задачах контроля напряжения переменного тока возникают проблемы, некоторые из которых представлены далее. При данной топологии сети напряжение на клеммах переменного тока от отдельных фотоэлектрических, ветрогенерирующих установок и аккумуляторных батарей, питают нагрузку непосредственно через отдельные блоки выпрямителей и преобразователей выпрямитель-инвертор. В таком случае возобновляемые источники энергии могут выступать в качестве источников тока только при условии, что аккумуляторная батарея является источником напряжения для управления общим напряжением шины переменного тока путем зарядки или разрядки.

Регулирование потоков мощностей обычно применимо к генераторам для регулирования частоты, а иногда и напряжения с целью получить равное распределение нагрузки параллельно работающих генераторов. Такой тип регулирования также может быть использован для выполнения правильного распределения тока в микросистеме. С помощью регулирования потоков мощности достигается децентрализованное управление для каждого взаимодействующего с сетью преобразователя. В то же время в системах переменного тока для управления может быть использована только связь с низкой пропускной способностью, например, связь по линии электропередачи. В ряде работ [9] управление потоком мощности осуществлялось с использованием метода снижения частоты и напряжения для обеспечения плавного перехода между сетевыми и автономными параллельными режимами работы. В работе [10] был разработан алгоритм supervisory управления для распределенной солнечной микросистемы постоянного тока, которая должна иметь ОТММ и принимать решение о направлении потока энергии.

Качество электроэнергии. Прерывистость энергии, полученной от солнца или ветра оказывает огромное влияние на энергобезопасность нагрузок, так как эти нагрузки не имеют никакой связи с сетью. Таким образом, любой дефицит выработки электроэнергии от этих источников может оставить подключенные нагрузки без электроснабжения. Как говорилось ранее, колебания напряжения, колебания частоты и гармоника являются основными проблемами качества электроэнергии. Колебания напряжения

в результате изменения инсоляции могут привести к нестабильности работы всей фотоэлектрической системы, что окажет влияние на общую надежность гибридной автономной фотоэлектрической и ветрогенерирующих систем. То же самое относится и к вариациям скорости ветра, которые влияют на производительность ветрогенерирующей системы и, в конечном счете, на общую выработку гибридной системы. Точные системы прогнозирования и планирования могут свести к минимуму эти последствия. Стабильность частоты генератора должна учитываться в зависимости от требований к нагрузке и от того, подключен ли генератор к нагрузкам переменного тока с критическими требованиями к частоте или нет. Высокочастотные колебания могут быть подавлены с помощью накопительных устройств, таких как электролитический двухслойный конденсатор. В работе [11] было проведено экспериментальное исследование для оценки ветрового воздействия на фотоэлектрический модуль.

Микросистема переменного тока

На рис. 5 показана гибридная фотоэлектрическая и ветрогенерирующая система наряду с аккумуляторной батареей, которая подключена к микросистеме переменного тока.

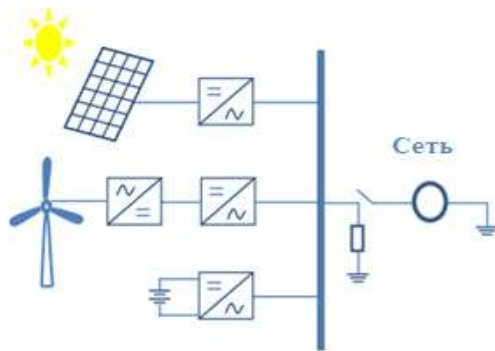


Рис.5. Гибридная система с микросетью переменного тока

Такая система может работать в сетевом или автономном режиме. Система объединяется посредством шины переменного тока, с промежуточной шиной постоянного тока от индивидуальных фотоэлектрических и ветрогенерирующих модулей, через индивидуальные выпрямители и инверторы, интегрированные на стороне переменного тока. Данный способ коммутации

обеспечивает питание нагрузки даже при наличии только одного источника.

Таким образом, в сетевом режиме работы возобновляемые источники энергии действуют как источники тока и отдают свою мощность непосредственно на шину переменного тока. Батарея в системе взаимодействует с двунаправленным преобразователем и может заряжаться или разряжаться в зависимости от текущей выработки, нагрузки и ее параметров. Однако в автономном режиме возобновляемые источники энергии действуют как источники тока, питающие непосредственно нагрузки, а аккумуляторная батарея действует как источник напряжения, контролирующий напряжение шины переменного тока путем зарядки или разрядки. Аккумуляторный преобразователь регулирует величину и частоту напряжения на нагрузке. Индивидуальный ВЭ блок можно использовать для систем ОТММ, чтобы получить максимум энергии от солнечных фотоэлектрических и ветрогенерирующих систем в сетевом режиме. То же самое может быть применимо и в автономном режиме при условии, что аккумуляторная батарея используется в качестве источника напряжения для управления напряжением шины переменного тока путем зарядки или разрядки.

Выводы

В данной статье представлен обзор проблем и возможностей интеграции фотоэлектрических и ветровых источников энергии для производства электроэнергии. Выявлено, что основной проблемой для систем с сетевым подключением, а также автономных систем является прерывистый характер фотоэлектрических и ветровых источников.

Интегрируя эти два ресурса в оптимальную комбинацию можно частично устранить влияние переменной природы солнечных и ветровых ресурсов, и общая система станет более надежной и экономичной в эксплуатации. Это определенно оказывает большее влияние на автономную генерацию.

В таблице 2 обобщены основные проблемы для гибридных систем с сетевым подключением фотоэлектрических и ветрогенерирующих систем с возможными решениями или снижением отрицательных последствий. Аналогичным образом, основные проблемы и решения / меры по смягчению последствий для автономных систем

приведены в таблице 3.

Интеграция производства возобновляемой энергии с аккумуляторными батареями и системами резервной генерации от дизельных генераторов становится экономически выгодным решением для задач автономного энергоснабжения. Ветро-дизельная гибридная конфигурация может питать нагрузку даже в пиковые часы.

Алгоритмы управления энергокомплексом должны обеспечивать высокую эффективность системы наряду с высокой надежностью и наименьшими затратами. Хорошее планирование с точным прогнозом погодных условий, солнечной инсоляции и скоростей ветра может помочь в снижении дискретности генерируемой энергии. Колебания напряжения и частоты, а также гармонические колебания являются основными проблемами в вопросах качества электроэнергии как

для сетевых, так и для автономных систем. Эта проблема может быть решена в значительной степени с помощью правильного проектирования, передовых средств управления и хорошей оптимизации гибридных систем.

В результате анализа различных научных исследований, связанных с проектированием, разработкой топологий силовой электроники и управлением сетевыми и автономными гибридными фотоэлектрическими и ветровыми системами, можно сделать вывод, что такие системы могут быть подключены к основной общей шине переменного тока независимо от того, работают ли они в сетевом режиме или в автономном.

Таблица 2. Основные проблемы систем с сетевым подключением и их возможные решения

№	Проблемы	Решения
1	Колебания напряжения из-за колебаний скорости ветра и нерегулярного солнечного излучения	Серия мощных, параллельно подключенных активных фильтров. Компенсаторы мощности, такие как конденсатор постоянной емкости/конденсатор переменной емкости либо статический компенсатор. Менее чувствительное оборудование заказчика к нарушениям электроснабжения / искажениям напряжения и системам функционирования инженерных сетей
2	Колебания частоты при резких изменениях активной мощности по нагрузкам	ШИМ-инверторный контроллер для регулирования напряжения и частоты трехфазной шины переменного тока в микросистеме.
3	Гармоники силовых электронных устройств и нелинейных приборов	ШИМ-коммутационный преобразователь и соответствующие фильтры.
4	Влияние прерывистости энергии на безопасность сети	Точные статистические системы прогнозирования и планирования. Подходы и алгоритмы регрессионного анализа для прогнозирования характера погоды, солнечной радиации и скорости ветра. Увеличение или уменьшение генерации через диспетчера, или системного оператора, чтобы избежать дефицита / избытка в производстве возобновляемой энергии. Передовые средства управления с быстрой реакцией, такие как автоматическое управление генерацией и гибкая система передачи переменного тока
5	Синхронизация	Самый популярный метод синхронизации сети основан на цикле фазовой автоподстройки частоты. Другие методы синхронизации включают обнаружение нулевого пересечения сетевых напряжений или использование комбинаций фильтров, связанных с нелинейным преобразованием.

Таблица 3. Основные проблемы автономных систем и их возможные решения

№	Проблемы	Решения
1	Высокая стоимость хранения энергии	Комбинирование солнечных фотоэлектрических и ветро-генерирующих мощностей позволит свести к минимуму требования к хранению энергии и в конечном итоге общую стоимость системы
2	Меньше полезной энергии в течение года	Интеграция производства возобновляемой энергии с системами резервного хранения энергии при помощи аккумуляторных батарей и дизельных генераторов.
3	Прерывистая энергия / качество электроэнергии	Интеграция генерации возобновляемой энергии с аккумуляторными батареями или топливными элементами, а в некоторых случаях и с системами резервного питания дизельных генераторов.
4	Защита	Соответствующие устройства защиты должны быть установлены по соображениям безопасности, включая модернизацию существующих схем защиты, в частности, при внедрении распределенных генераторов.
5	Малая емкость накопителей	Интеграция фотоэлектрических и ветровых источников энергии с топливными элементами
6	Проблемы охраны окружающей среды и безопасности аккумуляторов и водородных баков.	Интеграция фотоэлектрических и ветровых источников энергии с топливными элементами вместо больших свинцово-кислотных аккумуляторов или суперконденсаторов приводит к созданию экологически чистого надежного источника энергии и снижает общие затраты на техническое обслуживание.

Список литературы

1. Доля ВИЭ в мире <https://renen.ru/ustanovlennaya-moshhnost-vie-v-mire-prevysila-2500-gvt-po-itogam-2019-g-irena/9>
2. Коданева С.И. Возобновляемая энергетика и проблема изменения климата/Макашева Н.А.//Социальные и гуманитарные науки. Отечественная и зарубежная литература. Серия 2: Экономика, 2020.-С.44-50.
3. L. Micheli, N. Sarmah, X. Luo, K. S. Reddy and T. K. Mallick Opportunities and challenges in micro- and nanotechnologies for concentrating photovoltaic cooling // A review Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20, 595-610 (2013)
4. P. G. Arul, V. K. Ramachandaramurthy and R. K. Rajkumar Control strategies for a hybrid renewable energy system // A review Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42, 597- 608 (2015)
5. B. Bhandari, K. T. Lee, G. Y. Lee, Y. M. Cho and S. H. Ahn Optimization of hybrid renewable energy power systems // A review International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology, 2, 99-112 (2015)
6. Садыков Н.Т., Дмитриченко В.И. Виды управления гибридными системами возобновляемой энергии//Вестник науки и образования,2020.- С.15-20.
7. P. Bajpai and V. Dash, "Hybrid renewable energy

- systems for power generation in stand-alone applications // A review Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 2926-2939, (2012)
8. A. Hiendro, R. Kurnianto, M. Rajagukguk, and Y. M. Simanjuntak Techno-economic analysis of photovoltaic/wind hybrid system for onshore/remote area in Indonesia Energy, 59, 652-657 (2013)
9. M. A. Abusara, J. M. Guerrero, and S. M.Sharkh LineInteractive UPS for Microgrids IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61, 1292-1300 (2014)
10. А.М. Трещ Математическая модель работающего в скользящем режиме импульсного преобразователя постоянного тока/Богуш В.А.//Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Выпуск №2, 2013.-С.93-98.
11. A. Abiola-Ogedengbe, H. Hangan and K. Siddiqui Experimental investigation of wind effects on a standalone photovoltaic (PV) module Renewable Energy, 78, 657-665 (2015)

References

1. Share of renewable energy in the world <https://renen.ru/ustanovlennaya-moshhnost-vie-v-mire-prevysila-2500-gvt-po-itogam-2019-g-irena/9>
2. Kodanewa S. I., Makasheva N. A. Renewable energy and the problem of climate change *Social and*

- human Sciences. Russian and foreign literature. Series 2: Economics*, 2020. - pp. 44-50.
3. L. Micheli, N. Sarmah, X. Luo, K. S. Reddy and T. K. Mallick Opportunities and challenges in micro- and nanotechnologies for concentrating photovoltaic cooling *A review Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 595-610 (2013)
 4. P. G. Arul, V. K. Ramachandaramurthy and R. K. Rajkumar Control strategies for a hybrid renewable energy system *A review Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 597- 608 (2015)
 5. B. Bhandari, K. T. Lee, G. Y. Lee, Y. M. Cho and S. H. Ahn Optimization of hybrid renewable energy power systems *A review International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 2, 99-112 (2015)
 6. Sadykov N. T., Dmitrichenko V. I. Types of management of hybrid renewable energy systems *Bulletin of science and education*, 2020. - P. 15-20
 7. P. Bajpai and V. Dash, "Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications *A review Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2926-2939, (2012)
 8. A. Hiendro, R. Kurnianto, M. Rajagukguk, and Y. M. Simanjuntak *Techno-economic analysis of photovoltaic/wind hybrid system for onshore/remote area in Indonesia Energy*, 59, 652-657 (2013)
 9. M. A. Abusara, J. M. Guerrero and S. M. Sharkh *LineInteractive UPS for Microgrids IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61, 1292-1300 (2014)
 10. A. M. Tresch, Bogush V. A., Mathematical model of a DC pulse Converter operating in sliding mode Bogush V. A. *Reports of the Belarusian state University of Informatics and Radioelectronics. Release №2*, 2013. - P. 93-98.
 11. A. Abiola-Ogedengbe, H. Hangan and K. Siddiqui *Experimental investigation of wind effects on a standalone photovoltaic (PV) module Renewable Energy*, 78, 657-665 (2015)

УДК 690.92

Интеллектуальные способы увеличения эффективности фотоэлектрических и ветровых электростанций

Ю.А. Майорова¹, К.П. Путилин², В.С. Рендова³, Н.Н. Смокталь⁴

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия.

¹gaika20041983@mail.ru, ²putilin-kp39@mail.ru, ³rendova00@mail.ru, ⁴NNSmoktal@sevsu.ru

Статья поступила 23.06.2020 г.; после доработки 24.06.2020 г.

Аннотация

Рассмотрены перспективные источники энергии, которые могут использоваться вместо традиционных горючих ископаемых. Так как распространение возобновляемых источников набирает обороты, требуется увеличить выдаваемую ими мощность до максимума. В публикации предложены несколько интеллектуальных способов увеличения производительности фотоэлектрических и ветрогенерирующих электрических станций. Проанализированы способы применения фотоэлектрических модулей с контроллерами заряда аккумулятора или с инверторами и их влияние на эффективность рассматриваемых электрических станций. Предложено обоснование выбора некоторых технологий по увеличению мощности ветрогенерирующих электростанций со способами их применения.

Ключевые слова: Возобновляемые источники энергии, ветроэнергетика, солнечная энергетика, увеличение производительности, электроэнергетика, интеллектуальные технологии, электростанция, контроллер, инвертор.

Smart ways to increase the effectiveness of photovoltaic and wind power plants

Ju.A. Majorova¹, K.P. Putilin², V.S. Rendova³, N.N. Smoktal⁴

"Sevastopol State University", 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia.

¹gaika20041983@mail.ru, ²rendova00@mail.ru, ³putilin-kp39@mail.ru, ⁴NNSmoktal@sevsu.ru

Received 23.06.2020 y.; received in final form 24.06.2020 y.

Abstract

The article discusses promising energy sources that can be used instead of traditional fossil fuels. As the spread of renewable sources is gaining momentum, it is necessary to increase their output power to the maximum. The publication offers several intelligent ways to increase the performance of photovoltaic and wind power plants. The methods of using photovoltaic modules with battery charge controllers or inverters, and their impact on their performance of the power stations under consideration, are analyzed. The justification of the choice of some technologies for increasing the capacity of wind farms with ways of their application is offered.

Keywords: Renewable energy source, wind energy, solar energy, increased productivity, electro energetics, intellectual technology, electric power plant, controller, inverter.

Введение

На сегодняшний день современной электроэнергетике приходится функционировать и развиваться в ряде противоречивых условий. Эти

условия обусловлены необходимостью увеличения роста энерговыработки электрической энергии, т.к. уровень потребления энергии растет с каждым годом. Открываются новые предприятия, возрождаются заводы, разрастаются города.

Наряду с ростом генерации электроэнергии существует проблема ухудшения состояния экологии и истощения запасов углеводородного топлива. Дальнейшего развития этих проблем можно избежать путем использования новых энергетических источников. Также существует необходимость в оптимизации процессов генерирования, распределения и потребления электрической энергии.

По мнению экспертов в области электроэнергетики, на сегодняшний день и в ближайшем будущем именно возобновляемая электроэнергетика, как альтернатива топливной энергетике, получит широкое распространение. Нестабильность энергетического потенциала возобновляемых источников энергии повышает роль интеллектуальных способов в задачах их интеграции в электроэнергетическую систему. В данной статье мы рассмотрим интеллектуальные способы увеличения эффективности фотоэлектрических и ветровых электростанций.

Технологии повышения эффективности фотоэлектрических и ветряных станций

Изменение режимов работы в зависимости от энергетического потенциала и мощности, отдаваемой в нагрузку, является значимой особенностью ветряных турбин и фотоэлектрических преобразователей. Существует возможность существенного различия энергетической эффективности для этих режимов. Для того, чтобы максимально использовать энергию первичного энергоресурса и установленную мощность энергетического оборудования нужно сформировать наиболее благоприятные рабочие режимы солнечных и ветровых электростанций. Основным фактором прямого воздействия на режимы работы данных электростанций является электрическая нагрузка. Величина нагрузки может регулироваться по определенным законам. Регулировка может происходить как в процессе заряда аккумуляторов электрической энергии, так и в процессе выдачи мощности в электроэнергетическую систему.

Фотоэлектрические станции – инженерное сооружение, которое использует эффект преобразования прямого солнечного излучения в электроэнергию. Такой вид преобразования энергии был открыт в 1839 году французским физиком Беккерелем. В большинстве случаев фотоэлементы – это кремниевые полупроводниковые фотодиоды. Энергия фотонов передается электро-

нам материала при поглощении света полупроводниковой структурой, что вызывает появление свободных носителей заряда. Носители заряда создают потенциальный градиент в области р-п перехода, под воздействием которого возникает электрический ток через электрические приёмники. Типичная величина разности потенциалов – 0,5 В, плотность фототока – 200 А/м² при удельной мощности солнечного излучения 1 кВт/м². Типовые вольт-амперные характеристики фотоэлектрического модуля при различных уровнях инсоляции показаны на рис.1.

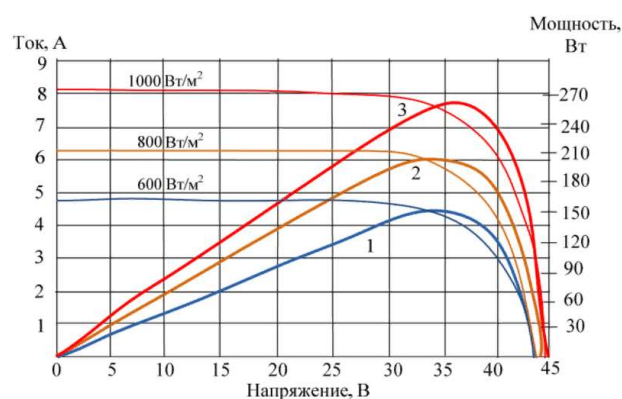


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики фотоэлектрического модуля при различной инсоляции.

По данным характеристикам видно, что каждому уровню инсоляции соответствует свой максимум генерируемой мощности. Максимуму мощности соответствуют определённое значение напряжения и тока фотоэлектрического модуля. Исходя из этого, изменяя величину нагрузки мы можем получать максимальную мощность от фотоэлектрических модулей. Также нагрузка должна соответствовать текущей величине инсоляции. Как правило в качестве непосредственной нагрузки массива фотоэлектрических модулей используется аккумуляторная батарея с собственным контроллером заряда либо сетевой инвертор. Следовательно, свойства контроллера и инвертора напрямую определяют эффективность использования энергии и мощность, генерируемую фотоэлектрическими модулями. Известно, что мощность ветряной турбины пропорциональна кубу скорости ветра. Для того, чтобы электрическая нагрузка получила максимум этой мощности нужно соответствующим образом выбрать ее величину. Основная проблема использования ветра в качестве источника энергии заключается в том, что скорость ветра является прерыв-

вистой. Энергию ветра нельзя запасть в непосредственном виде, поэтому этот источник энергии следует использовать вместе с другими типами источников энергии. Это нужно для того, чтобы обеспечить непрерывную и надежную передачу электрической энергии. На рис.2. приведены мощностные характеристики наиболее распространенных лопастных ветряных турбин.

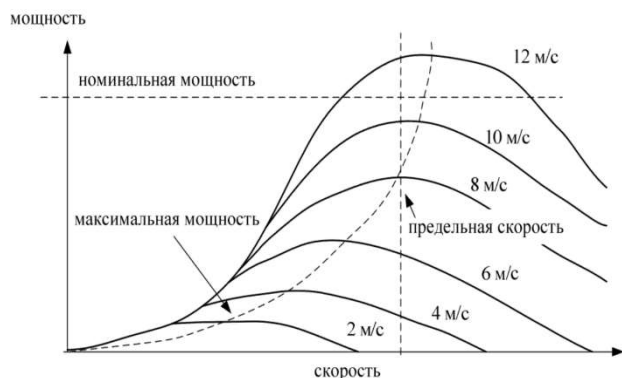


Рис. 2. Мощностные характеристики лопастных турбин.

Для согласования мощности ветрового потока с мощностью электрической нагрузки также, как и для фотоэлектрических станций необходимы соответствующие контроллеры заряда аккумуляторов или инверторы, в зависимости от типа ветряной электростанции. Схема автономной фотоэлектрической станции приведена на рис.3.



Рис. 3. Схема автономной фотоэлектрической станции.

В этой статье рассмотрены две основные технологии, наиболее часто используемые в инверторах и контроллерах заряда фотоэлектрических установок. Основная их функция — регулирование выходного напряжения (мощности) установки с целью достижения заданных параметров (максимальной выходной мощности).

Технология PWM (Pulse Width Modulation — широтно-импульсная модуляция)

Широтно-импульсная модуляция (далее ШИМ) — это процесс получения изменяющегося аналогового значения сигнала посредством цифровых устройств. Технологии ШИМ используются для получения прямоугольных импульсов — сигнала, амплитуда которого постоянно изменяется между максимальным и минимальным значениями. Данный сигнал модулирует напряжение между максимальным и минимальным значениями, изменяя при этом длительность времени включения максимального значения относительно длительности включения минимального (см. рис. 4).

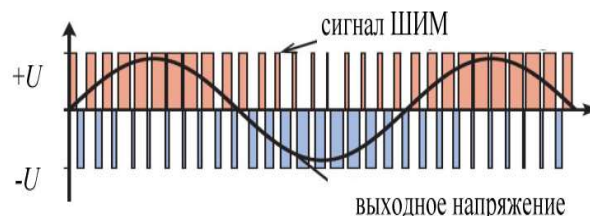


Рис. 4. ШИМ сигнал и синусоидальное выходное напряжение.

Шириной импульса называется длительность включения максимального значения. Для того, чтобы получить переменные аналоговые величины нужно изменить ширину импульса. Данная технология позволяет поддерживать определенный уровень напряжения. Как правило, система ШИМ снабжена электронным реле с микропроцессорным управлением. Контроллер с ШИМ обеспечивает 100% уровень зарядки аккумуляторов. Происходит это в 4 стадии, которые выполняются автоматически в зависимости от фактического уровня заряда аккумуляторной батареи. Графическая иллюстрация процессов заряда аккумуляторов показана на рис.5.

1) Стадия накопления. Основной заряд. Заряд осуществляется полным током фотоэлектрических модулей;

Стадия насыщения. Этап абсорбции. При достижении определенного уровня напряжения в аккумуляторной батарее контроллер начнет поддерживать постоянное напряжение за счет ШИМ тока заряда. Это нужно для того, чтобы избежать перегрева и газообразования в аккумуляторах. По мере заряда аккумуляторов ток будет уменьшаться;



Рис. 5. Графическая иллюстрация процессов заряда аккумуляторов.

2) Стадия поддерживающего заряда характерна для полностью заряженной батареи. На этой стадии зарядное напряжение и ток уменьшаются для того, чтобы предотвратить нагрев и газообразование в батарее, которая поддерживается в заряженном состоянии;

3) Стадия выравнивания. Данная стадия может дополнительно применяться только для аккумуляторов с жидким электролитом. Эта стадия предусматривает периодический заряд до газообразования, что способствует выравниванию напряжения на различных отсеках аккумуляторных батарей, очищения пластин и перемешивания электролита.

Таким образом, к достоинствам ШИМ контроллеров можно отнести: исключение перегрева и закипания аккумулятора, высокий КПД и выравнивание заряда в разных отсеках аккумулятора и в разных аккумуляторах.

Недостатком ШИМ контроллеров является ограниченный диапазон изменения напряжения генерирующего устройства – фотоэлектрических модулей, что приводит к потере части энергии.

Технология MPPT (Maximum Power Point Tracking– отслеживание точки максимальной мощности (ОТММ))

MPPT технологии применяются не только в контроллерах, но и в инверторах. Типовой MPPT контроллер постоянно отслеживает напряжение и ток на фотоэлектрических модулях, перемножает их значения и определяет пару: ток-напряжение при которых мощность фотоэлектрических модулей, которая зависит от температуры и освещенности, будет максимальной, соответствующей текущей освещенности. Встроенный процессор также может отслеживать стадию заряда аккумулятора (накопление, насыщение,

поддержка, выравнивание) и на основании этих данных определяет величину зарядного тока. Процессор также может выполнять и другие функции: хранение данных, индикацию параметров на табло и другие. Технология MPPT представляет собой наиболее эффективную технологию контроллеров заряда, позволяющую повысить КПД использования солнечной энергии на 20-30% по сравнению с ШИМ контроллерами.

Для того, чтобы в аккумуляторе поддерживалось напряжение 12В ШИМ контроллер ограничивает напряжение фотоэлектрического модуля на уровне зарядного – немного выше чем 12 В. При этом, в соответствии с рис. 5, зарядная мощность составит целых 53 Вт (точка 1 на рис. 5).

MPPT контроллер позволяет использовать диапазон напряжений фотоэлектрических модулей от 12 В до максимального по характеристике значения – 17 В (точка 2 на рис. 6). MPPT контроллер преобразует повышенное напряжение в зарядный ток, что обеспечивает достаточную величину зарядной мощности в 75 Вт.

Для реализации данного вида технологий может применяться несколько методов. Данные методы можно разделить на прямые и непрямые. Прямые методы – это такие методы, которые включают в себя прямые измерения тока, мощности или напряжения и имеют наиболее быстрые и точные результаты, чем у непрямых методов. Непрямые методы – это методы, которые основаны на периодическом отслеживании точки максимальной мощности с помощью простых измерений и других различных параметров. [2].

К наиболее известным из них относятся:

- алгоритм постоянного напряжения (тока) (Constant Voltage (current) method);
- алгоритм формирования напряжения, составляющего определенную долю от напряжения холостого хода (Fractional Open Circuit Voltage);

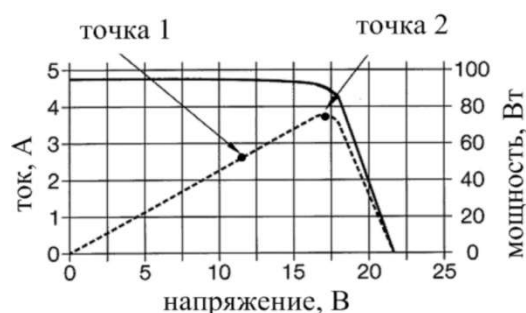


Рис. 6. Иллюстрация принципа действия MPPT и ШИМ контроллеров фотоэлектрических станций.

- алгоритм случайных возмущений (Perturband Observe Method);
- алгоритм дополнительной проводимости (Incremental Conductance Method).

Алгоритм постоянного напряжения (тока).

Данный метод основан на том, что рабочее напряжение солнечных модулей (PV) корректируется посезонно. Более высокое напряжение MPP поддерживает в течение зимнего времени, летом же наоборот. При том, что уровень инсоляции остается на том же уровне за счет низких температур. (рис. 7). К недостаткам данного метода можно отнести не высокую точность. Точность возрастет если реализация метода будет происходить с учетом минимальных колебаний освещенности в определенный день, что ведет к разработке поискового алгоритма.

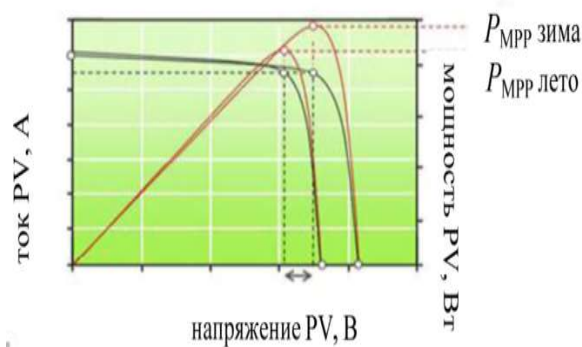


Рис. 7. Принцип алгоритма постоянного напряжения.

Алгоритм с использованием напряжения, составляющего определенную долю от напряжения холостого хода. Основное допущение данного метода заключается в том, что отношение напряжения точки максимальной мощности U_{MPP} к напряжению холостого хода U_{xx} практически неизменно:

$$U_{MPP}/U_{xx} \cong k < 1$$

где k – коэффициент пропорциональности между напряжением холостого хода и напряжением точки максимальной мощности (рис. 8).

Метод реализуется путем следующих шагов:

- измерение напряжения холостого хода массива фотоэлементов (при изоляции от МРРТ);
- вычисление ТММ и коэффициента пропорциональности;
- установка напряжения в устройстве МРРТ, соответствующего полученному коэффициенту.

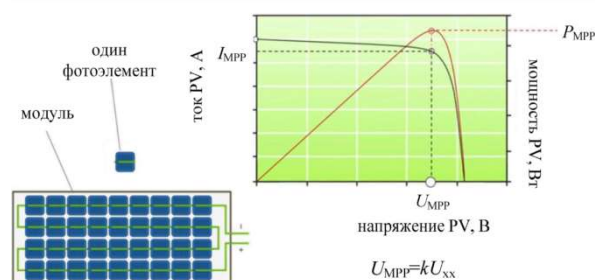


Рис. 8. Принцип реализации формирования напряжения, пропорционального напряжению холостого хода фотоэлемента (U_{xx} – напряжение холостого хода).

Так как точка ТММ изменяется с погодными условиями, данную операцию нужно проводить несколько раз. Как правило, значение данного коэффициента изменяется в пределах 0,73-0,80.

Таким образом, из-за неопределенности с выбором коэффициента, отслеживание ТММ является трудоемким процессом. При этом каждое измерение сопровождается потерями энергии. Усовершенствование данного метода может осуществляться за счет измерения параметров одного фотоэлемента (pilot cell), который будет соответствовать всем остальным солнечным панелям. Данная модификация значительно упрощает момент определения коэффициента пропорциональности.

Алгоритм случайных возмущений. Такой алгоритм выполняется следующим образом. Предположим, что рабочая точка массива солнечных батарей находится в точке А. Данная точка не будет соответствовать точке максимальной мощности (рис. 9).

В рассматриваемом алгоритме рабочее напряжение массива солнечных батарей увеличивается на очень небольшое значение.

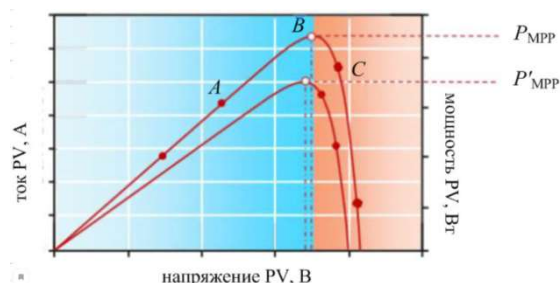


Рис. 9. Принцип алгоритма случайных возмущений.

Затем измеряется изменение мощности, отбираемой преобразователем от солнечной бата-

реи. В случае, если изменение мощности положительное, изменения напряжения в том же направлении будут сдвигать рабочую точку ближе к ТММ, в данном примере к точке В (см. рис. 9). Также возможно и изменение направления движения рабочей точки, но это произойдет только тогда, когда изменение напряжения приведет к снижению мощности (точка С). Таким образом, при достижении точки максимальной мощности (P_{MPP}) система приходит в состояние динамического равновесия. То есть, отношение изменения мощности и напряжения равно нулю.

Весомое преимущество этого алгоритма состоит в том, что он намного проще большинства прямых методов. Однако, алгоритм случайных возмущений имеет также и ряд недостатков, которые приводят к снижению его эффективности. При малых уровнях освещенности вольтамперная характеристика сглаживается, что приводит к большим сложностям при определении точки максимальной мощности, так как изменения в мощности становятся малы по сравнению с изменением напряжения. Другой недостаток алгоритма случайных возмущений состоит в том, что он не может точно определить момент достижения регулятором ТММ.

Для метода случайных возмущений характерны колебания рабочей точки вокруг точки максимальной мощности, что приводит к снижению эффективности алгоритма. Также работа алгоритма случайных возмущений в некоторых режимах показывает ошибочные результаты при тестировании. Такое поведение можно наблюдать в данном алгоритме при резком изменении уровня освещенности (нижняя кривая на рис. 9). Данная ошибка может возникать в случае, когда происходит изменение выходной мощности вследствие изменения уровня освещенности. Это изменение мощности превышает заданную алгоритмом корректировку мощности (итерации поиска ТММ). Алгоритм случайных возмущений также может опираться на изменения рабочего напряжения, на постоянные величины или на переменные.

Алгоритм приращения проводимости (Incremental Conductance Method). В методе приращения проводимости для предсказания эффекта изменения напряжения измеряются постепенные изменения тока и напряжения массива. Данный метод использует приращение проводимости массива фотоэлементов для вычисления знака изменения мощности по отношению к напряжению dP/dV . Метод приращения прово-

димости вычисляет точку максимальной мощности сравнивая приращение проводимости dI/dV с проводимостью массива I/V . Точка, в которой они равны и есть точка максимальной мощности. Затем данное равновесие поддерживается до момента изменения условий эксплуатации (рис.10, рис.11).

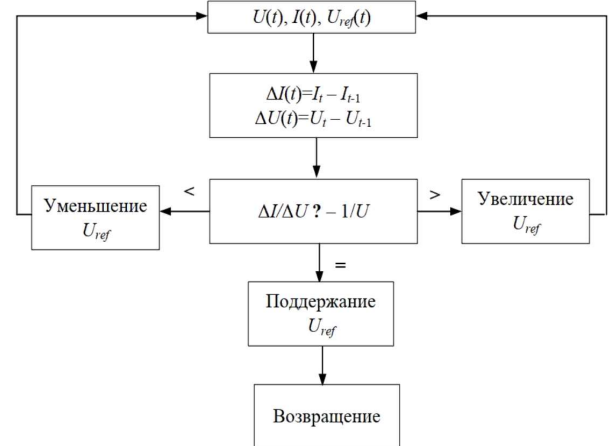


Рис. 10. Алгоритм приращения проводимости.

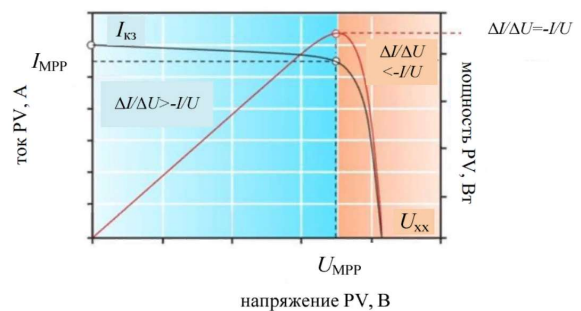


Рис. 11. Принцип работы алгоритма приращения проводимости.

Вывод алгоритма исходит из формулы:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(I \cdot V)}{dV} \rightarrow \frac{dP}{dV} = I + V \cdot \frac{d(I)}{dV}$$

Мгновенное напряжение и ток – это те параметры, которые мы имеем возможность отслеживать. При этом напряжение также контролируется как параметр. U_{ref} – это напряжение на фотоэлектрических модулях, установленное МРРТ устройством. Данный метод является одним из самых эффективных и точных по сравнению с остальными методами. При расчете ТММ алгоритм не зависит в области этой точки при устойчивом состоянии, в отличие от алгоритма случайных возмущений. Кроме того, небольшие интервалы отбора измерений делают его менее восприимчивым к изменяющимся условиям

освещения. Тем не менее, при очень быстро меняющихся условиях или частичном затенении, алгоритм приращения проводимости может оказаться менее эффективным, но всё равно остается наиболее точным. Основным недостатком этого алгоритма является сложность его аппаратной реализации. Необходимо не только измерять токи и напряжения, но также рассчитывать мгновенные и дополнительные значения проводимости.

Основными достоинствами солнечных контроллеров МРРТ типа являются следующие особенности:

- повышается эффективность использования не только аккумуляторной батареи, но и фотоэлектрических модулей за счет возможностей использования слабой инсоляции;
- увеличивается мощность, снимаемая с фотоэлектрических модулей за счет увеличения их суммарного напряжения и преобразования его в зарядный ток с помощью DC/DC преобразователя;
- появляется возможность заряда аккумуляторов при низкой освещенности;
- более высокое входное напряжение контроллера позволяет уменьшить сечение кабелей и увеличить расстояние до фотоэлектрических модулей.

Следует отметить, что современные инверторы могут обладать функциями МРРТ контроллеров, например, автономный инвертор фирмы MUST, сетевой инвертор AXIOMA energy и др. Топология трёхфазного сетевого инвертора с МРРТ трекерами показана на рис.12. МРРТ трекеры отслеживают точку максимальной мощности солнечной батареи, затем следует инвертор, который преобразует постоянный ток в переменный, синхронизированный с сетью. ШИМ контроллеры почти всегда применяются в системах мощностью до 2-3 кВт с аккумуляторной батареей малой емкости.

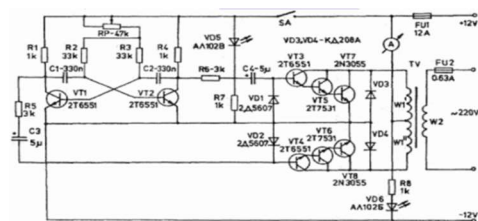


Рис. 12. Топология трехфазного инвертора с МРРТ трекерами.

МРРТ контроллеры рекомендуются для более мощных систем. Представленные на рынке

образцы таких контроллеров для фотоэлектрических станций рассчитаны на входное напряжение в интервале от 75 до 200 В и ток до 60-80 А. Это позволяет подключать на один контроллер фотоэлектрические модули мощностью до 4 кВт при системном напряжении 48 В. Мощность ветряной турбины зависит от скорости ветра и частоты ее вращения. При этом каждому значению скорости ветра соответствует определенная частота вращения ветряной турбины при которой она развивает максимум мощности (см. рис.2). Для того, чтобы получить максимальную мощность от ветряных электрических станций необходимо регулировать обороты турбины. Это применимо для любых скоростей ветра.

Частотой вращения генератора можно управлять за счёт изменения его электрической нагрузки.

Балластные нагрузки и аккумуляторные батареи – это то, что используется в качестве регулируемой нагрузки в автономных системах. Отдаваемую в электрическую систему мощность можно регулировать в рассматриваемых сетевых ветряных электростанциях. С помощью контроллеров ветрогенераторов можно осуществить эффективную работу и заряд аккумуляторной батареи. Включение контроллера заряда аккумуляторов в структурную схему ветряной электростанции показано на рис.13.



Рис. 13. Включение контроллера заряда аккумуляторов в структурную схему ветряной электрической станции.

Основными функциями контроллеров ветрогенераторов являются:

- оценка и наблюдение за параметрами рабочего режима ветряных электростанций;
- разгон ротора при небольшой силе ветра даже на холостом ходу;
- преобразование трехфазного переменного тока ветрогенератора в постоянный ток;

- при больших скоростях ветра подключение балластной нагрузки для защиты аккумуляторных батарей, а также для уменьшения частоты вращения ветрогенератора;
- отключение ветрогенератора при полном заряде аккумулятора;
- возможность регулировки величины зарядного тока в зависимости от степени заряда аккумулятора.

Помимо выше указанных функций МРРТ контроллер обеспечивает бесперебойную работу ветрогенератора в точке максимальной мощности для любой скорости ветра. Поддержание частоты вращения ветрогенератора является обязательным условием, поскольку без данного условия ветряной генератор не сможет выработать максимальную мощность. Очень важно, чтобы частота вращения ротора генератора поддерживалась для каждой скорости ветра. Следовательно, частота должна соответствовать точке максимальной скорости ветрогенератора. На данный момент известны всего лишь два типа алгоритмов отслеживания точки максимальной мощности:

- алгоритмы, которые базируются на уже известных характеристиках и параметрах ветрогенератора;
- алгоритмы, которые не требуют знания характеристик конкретного ветрогенератора [3];

Для того, чтобы произвести поиск точки максимальной мощности ветрогенератора существует три метода:

- метод, который заключается в обеспечении режима работы ветрогенератора с оптимальной для него частотой;
- метод, который основан на сравнении зависимости максимальной мощности ветряной турбины от частоты ее вращения. В данном методе следует учесть, что частота вращения должна быть связана с фактическим значением мощности;
- метод, при котором возможно найти точку максимальной мощности без проверенной информации о параметрах ветряного генератора.

Суть первого метода состоит в том, что для поддержания наиболее благоприятной быстроходности необходимо регулировать величину электрической мощности. Благодаря этому потребитель (нагрузка) будет получать электрическую энергию определенной частоты. Для этого метода требуется измерять текущую частоту вращения ветряного генератора и скорость ветра.

Также этот метод требует знания характеристик ветряной турбины. Структурная схема реализации данного метода приведена на рис.14.

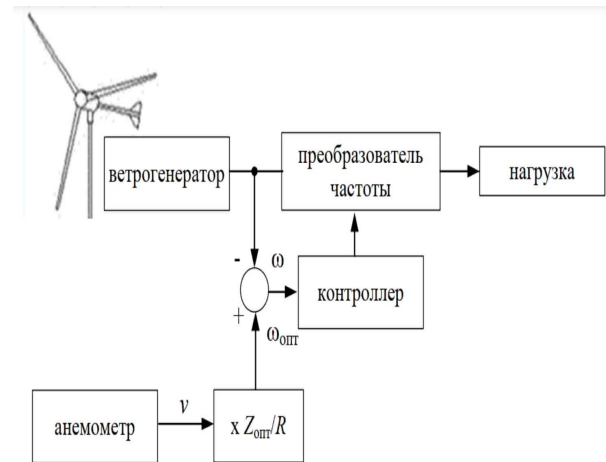


Рис. 14. Структурная схема реализации метода приращения проводимости.

Второй метод заключается в необходимости учета зависимости точки максимальной мощности ветряной турбины от частоты ее вращения для поиска точки максимальной мощности ветряного генератора. Эта зависимость хранится в памяти микроконтроллера. Данный метод базируется на том, что для вычисления приемлемой для текущей скорости ветра мощности следует измерить частоту вращения ветряной турбины. Далее эти данные сравниваются с фактическим значением выходной мощности. Схема реализации данного метода показана на рис.15.

Все рассмотренные выше методы основаны на том, что рабочие характеристики рассматриваемой ветряной турбины нам известны. Чаще всего производитель не приводит в полном объеме эти данные. Остается только один вариант - получить их самостоятельно. Самостоятельно получить такие данные можно только путем экспериментальных исследований или моделирования, что является трудоемким и длительным процессом.

Третий метод обеспечения энергетической эффективности ветряного генератора самый простой из всех выше указанных. В нем нет тех недостатков, которые есть в остальных двух методах. Принцип поиска точки максимальной мощности иллюстрируется рис.16. При значении производной $dP/d\omega = 0$ значение мощности находится в точке максимума. Рабочая точка на мощностной характеристике может быть передвинута вправо от точки максимума.

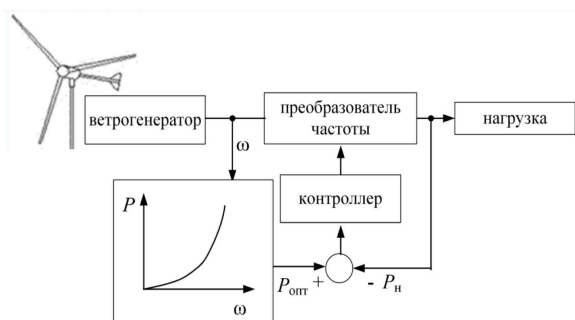


Рис. 15. Схема реализации метода дополнительной проводимости.

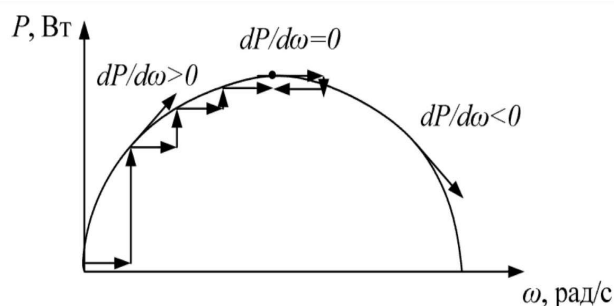


Рис. 16. Принцип поиска точки максимальной мощности.

Это может произойти только тогда, когда значение производной мощности P станет отрицательной по частоте вращения. Следовательно, для того, что бы вернуться в режим максимальной мощности необходимо обязательно уменьшить частоту вращения ветряного генератора. Исходя из этого, для возврата в режим максимальной мощности при положительном значении производной, следует увеличить частоту вращения ветряного генератора.

Помимо основной функции контроллеров ветрогенераторов, такой как поиск точки максимальной мощности, у них есть еще одна важная функция. Они позволяют расширить диапазон использования энергии ветра. Данная функция осуществляется с помощью интеллектуальных технологий. Существуют контроллеры, которые могут обеспечить работу ветряной электростанции даже при слабых ветрах. Для того чтобы это осуществить контроллер фиксирует «обороты выключения» и «обороты включения». После фиксации этих данных начинается и прекращается отбор мощности от ветряной электрической станции. Таким образом, после того как ветрогенератору задали интервал оборотов он подаст сигнал на контроллер и отключит генератор от нагрузки.

При отсутствии потребителя (нагрузки) ветряная турбина набирает рабочие обороты согласно с расчётным профилем и расчётным углом атаки его лопастей (см. рис.6). Контроллер может подключить ветряной генератор к аккумуляторной батарее и отобрать мощность только при условии, что будет набрана рабочая частота вращения. После этого ветряной генератор вновь затормаживается и снова отключается контроллером. В результате выше указанных действий при слабых ветрах энергия накапливается порционно. Такое количество энергии в итоге превышает возможности простого контроллера. Это происходит из-за того, что энергия снимается при частотах вращения ветряного генератора близких к наиболее благоприятным частотам.

Инверторы ветряных электрических станций могут иметь функции MPPT так же, как и фотоэлектрических станций. Такие инверторы обеспечивают максимум выработки электрической энергии для данной скорости ветра. Следовательно, возможно увеличение выработки электрической энергии фотоэлектрическими и ветроэлектрическими генераторами до максимального значения. Данная энергия будет соответствовать энергетическому потенциалу первичного энергоносителя.

Выводы

В статье предложены интеллектуальные способы увеличения эффективности ветрогенерирующих и солнечных электростанций. Рассмотрены ряд технологий, позволяющие увеличить количество выдаваемой мощности и уменьшить занимаемые площади.

Приведены результаты исследования, которые подтверждают, что применение данных технологий положительно влияет на работоспособность ветряных и солнечных электростанций. К ней можно отнести повышение эффективности и КПД, уменьшение площади отвода земельных участков, повышение точности и надежности в эксплуатации. Также в результате работы можно сделать вывод, что для согласования мощности ветрового потока с мощностью электрической нагрузки, как и в случае фотоэлектрических станций, необходимы соответствующие контроллеры заряда аккумуляторов или инверторы. Данные контроллеры следует выбирать в зависимости от типа ветряной электростанции. Перспективным направлением развития ВИЭ является расширение сфер применения интеллектуальных технологий в энергетике.

Список литературы

1. www.smartgrid.gov
2. Интеллектуальные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учебное пособие/ Б.В. Лукутин; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. – 115с.
3. Шкрадюк И.Э. Тенденции развития возобновляемых источников энергии в России и мире. – М.: WWFRossii, 2010. – 88 с.
4. Пученкин А.В., Титов В.Г., Ходыкина И.В. Анализ алгоритмов управления регулятором точки максимальной мощности для солнечных батарей.
5. Степанов С.Ф., Павленко И.М., Ербаев Е.Т. Обеспечение эффективной работы мультимодульной ветроэлектростанции при изменении скорости ветра и нагрузки// *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 6.
6. Проект Энергетической стратегии России на период до 2035 года.
7. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шутов Е.А., Парников Н.М. Оптимизация числа и мощности дизель-генераторов автономной дизельной электростанции // *«Промышленная энергетика»*. – 2009 – №11. – С.27-33.
8. Лукутин Б.В., Климова Г.Н., Обухов С.Г., Шутов Е.А., Парников Н.М. Формирование энерго-эффективных режимов дизельной электростанции инверторного типа // *«Известия вузов Электромеханика»*. – 2009. – № 6. – С.80-83.
9. Петренко Ю.Н. Програмное управление технологическими комплексами в энергетике: учебн. пос./Петренко Ю.Н., Новиков С.О., Гончаров А.А. – Минск: Выш. шк., 2013. – 407 с.: ил.
10. Юрченко А.В. Фотоэлектрических датчик для систем слежения за Солнцем / А.В. Юрченко, А.В. Волгин, М.В. Китаева, А.В. Охорзина / Издательство Томского политехнического университета, 2010.
11. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д., Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного измерения. – Л.: Наука, 1989.
12. Розанов Ю.К., Баранов Н.Н., Антонов Б.М., Ефимов Е.Н. Соломатин А.В. Силовая электроника в системах с нетрадиционными источниками электроэнергии. – *Электричество*, 2002, №3.
3. Shkradyuk I.E'. Tendencii razvitiya vozobnovlyayemy'x istochnikov energii v Rossii i mire. – М.: WWFRossii, 2010. – 88 s.
4. Puchenkin A.V., Titov V.G., Xody'kina I.V. Analiz algoritmov upravleniya regul'yatorom tochki maksimal'noj moshhnosti dlya solnechny'x batarej.
5. Stepanov S.F., Pavlenko I.M., Erbaev E.T. Obespechenie e'ffektivnoj raboty' mul'timodul'noj vetroe'lektrostantsii pri izmenenii skorosti vetra i nagruzki// *Sovremennyy'e problemy' nauki i obrazovaniya*. – 2013. – № 6.
6. Proekt E'nergeticheskoy strategii Rossii na period do 2035 goda.
7. Lukutin B.V., Obuxov S.G., Shutov E.A., Parnikov N.M. Optimizaciya chisla i moshhnosti dizel'-generatorov avtonomnoj dizel'noj e'lektrostantsii // *«Promy'shlennaya e'nergetika»*. – 2009 – №11. – S.27-33.
8. Lukutin B.V., Klimova G.N., Obuxov S.G., Shutov E.A., Parnikov N.M. Formirovanie e'nergo-e'ffektivny'x rezhimov dizel'noj e'lektrostantsii invertornogo tipa // *«Izvestiya vu-zov E'lektromexanika»*. – 2009. – № 6. – S.80-83.
9. Petrenko Yu.N. Promgramnoe upravlenie texnologicheskimi kompleksami v e'nergetike: uchebn. pos./Petrenko Yu.N., Novikov S.O., Goncharov A.A. – Minsk: Vy'sh. shk., 2013. – 407 s.: il.
10. Yurchenko A.V. Fotoe'lektricheskix datchik dlya sistem slezheniya za Solncem / A.V. Yurchenko, A.V. Volgin, M.V. Kitaeva, A.V. Oxorzina / Izdatel'stvo Tomskogo politexnicheskogo uni-versiteta, 2010.
11. Andreev V.M., Grilixes V.A., Rumyancev V.D., Fotoe'lektricheskoe preobrazovanie koncentrirovannogo solnechnogo izmereniya. – L.: Nauka, 1989.
12. Rozanov Yu.K., Baranov N.N., Antonov B.M., Efimov E.N. Solomatin A.V. Silovaya e'lektronika v sistemax s netradicionny'mi istochnikami e'lektroe'nergii. – *E'lektrichestvo*, 2002, №3.

References

1. www.smartgrid.gov
2. Intellektual'ny'e sistemy' e'lektrosnabzheniya s vetrovy'mi i solnechny'mi e'lektrostantsiyami: uchebnoe posobie/ B.V. Lukutin; Tomskij politexnicheskij universitet. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politexnicheskogo universiteta, 2019. –115s.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 620.92

Использование модулей Пельтье в солнечной энергетике

В.И. Завирюха¹, С.В. Ставиного², В.В. Кувшинов³, Т.В. Решетникова⁴,
А.В. Соломоненко⁵

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия. ¹ vlad.zaviryukha@mail.ru, ² serega1998147@mail.ru,

³ kuvshinov.vladimir@gmail.com, ⁴ reshetnikovatv@krgo.energy.crimea.ru, ⁵ solomonenkoav@krgo.energy.crimea.ru

Статья поступила 15.06.2020 г.; после доработки 17.06.2020 г.

Аннотация

В статье рассматривается метод увеличения коэффициента полезного действия солнечной панели, путем включения термоэлектрических преобразователей в конструкцию солнечной батареи. В частности использование модуля Пельтье, а также перспективность данного метода.

Ключевые слова: солнечная энергетика, фотоэлектрические преобразователи, коэффициент преобразования, модуль Пельтье, альтернативные источники.

Using Peltier module in solar power

V.I. Zaviryukha¹, S.V. Stavinoga², V.V. Kuvshinov³, T.V. Reshetnikova⁴,
A.V. Solomonenko⁵

FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,
Sevastopol, 299053, Russia. ¹ vlad.zaviryukha@mail.ru, ² serega1998147@mail.ru, ³ kuvshinov.vladimir@gmail.com,
⁴ reshetnikovatv@krgo.energy.crimea.ru, ⁵ solomonenkoav@krgo.energy.crimea.ru

Received 15.06.2020 y.; received in final form 17.06.2020 y.

Abstract

The article considers a method for increasing the efficiency of a solar panel by including thermal converters into the design of a solar battery. In particular the use of the Peltier module, and the prospects of this method.

Keywords: solar energy, photovoltaic converters, conversion coefficient, Peltier module, alternative sources.

Введение

В современном обществе с развитием технологий все большее место в электроэнергетики занимают вопросы использования альтернативной возобновляемых источников энергии. В частности, вопрос увеличения производительности энергоустановок, основанных на преобразовании различных видов энергии. В данной статье рассмотрен раздел солнечной энергетике. Одним из вариантов решения данного вопроса при использовании солнечных панелей, является

увеличение коэффициента преобразования потока солнечной радиации, путем использования не только видимой и ультрафиолетовой, но и инфракрасной части спектра.

Анализ проблематики

С развитием промышленных потребностей общества, а также связанным с этим ростом потребления электроэнергии, возникает необходимость в экономии топливно-энергетических ресурсов и поиске альтернативных путей обеспечения

потребностей общества в данных вопросах. Наиболее эффективные решения предоставляет альтернативная энергетика, в частном случае, солнечная. Одной из основных проблем данного раздела альтернативной энергетики является низкий коэффициент полезно действия при преобразовании солнечной энергии. В данной статье рассматривается один из способов повышения коэффициента полезно действия при производстве энергии солнечными панелями.

Конструкционное решение в рамках данной концепции

Для дальнейшего рассмотрения предложенного варианта с использованием усвоения инфракрасного спектра солнечного излучения, необходимо определить какой тип солнечной панели, из ныне существующих, использовать в конструкции устройства. Основными факторами выбора являются: коэффициент полезно действия при преобразовании солнечного света и влияние высокой температуры на панель, а также, стоимость самой панели. Промышленность на наше время предлагает такие типы солнечных панелей как: монокристаллические кремниевые фотоэлементы (рис. 1), поликристаллические фотоэлементы, фотоэлементы с использованием диоксида индия и меди (CIS технология), фотоэлементы с использованием теллурида кадмия (CdTe технология) [1].

Из приведенного перечисления доступных панелей наивысшую эффективность преобразования солнечной энергии имеют монокристаллические кремниевые фотоэлементы – до 22% среди серийно выпускаемых. Однако их цена наиболее высокая, так как, при производстве предъявляются высокие требования к материалу, из которого они производятся.



Рис. 1. Пример монокристаллической солнечной панели

Второе место по данному параметру принадлежит серийно выпускаемым поликристаллическим элементам. Они имеют эффективность до 18%. Более низкая эффективность связана с тем, что при производстве поликристаллического кремния используют не только первичный

кремний высокой степени очистки, но и вторичное сырье (например, переработанные солнечные панели или кремниевые отходы металлургической промышленности). Это приводит к появлению различных дефектов в поликристаллических элементах, таких как границы кристаллов, микродефекты, примеси углерода и кислорода [1, 2].

Опираясь на изложенные факторы, можно определиться с выбором, так как рабочие диапазоны температур для всех типов панелей различаются не существенно и представляют от -50°C до $+80^{\circ}\text{C}$ (рис. 2).

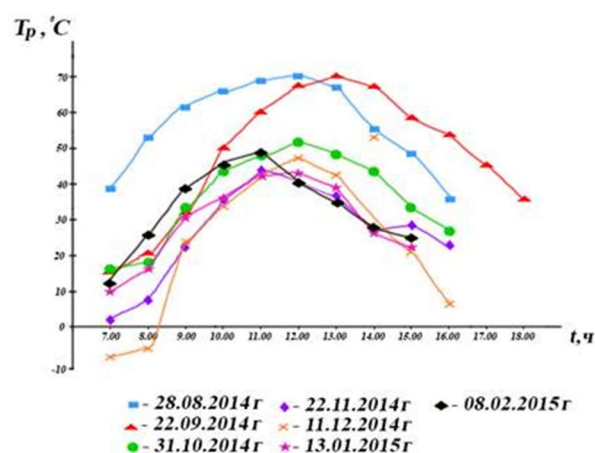


Рис. 2. Температура солнечной панели в разные времена года

Высокие температуры нагрева солнечной панели, негативно влияя на коэффициент полезно действия (рис. 3). Использование термоэлектрических преобразователей позволит контролировать нагрев устройства [3].

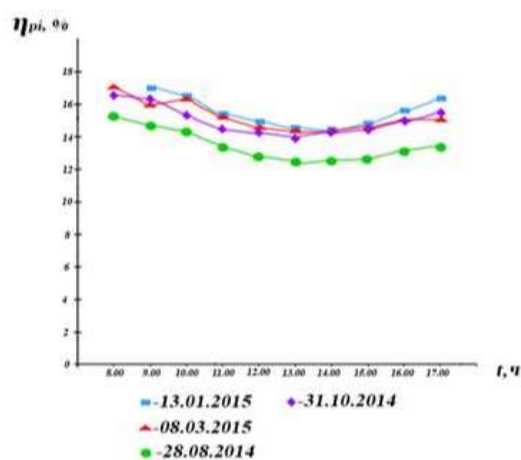


Рис. 3. КПД солнечной панели в разные времена года в течении солнечного дня

Результаты исследования

Результаты показали, что сезонные изменения погоды влияют на энергетические параметры панели, при этом температура нагрева в летнее время достигает температуры 70°C и выше. Полученные данные показали, что КПД солнечной панели в жаркое время в течение года снижается от 8 до 21 %. Зимой панель может нагреваться до температуры 40°C , при этом КПД солнечной панели снижается на 7-8 %, а летом температура поверхности достигает 70°C и КПД уменьшается на 20-21 % [4].

По приведенным параметрам мы определили, что монокристаллические кремниевые фотоэлементы подходят для нашего проекта больше, чем остальные предложенные варианты. Помимо преобразователя солнечной энергии, мы также будем использовать термоэлектрический преобразователь и систему охлаждения для него.

Для данного диапазона температур наиболее всего соответствует модуль Пельтье (рис. 4). Модуль Пельтье – это термоэлектрический преобразователь, принцип действия которого базируется на эффекте Пельтье – возникновении разности температур при протекании электрического тока.



Рис. 4. Схема модуля Пельтье

На горячую сторону устанавливается солнечная панель. На холодную, в зависимости от конструкции установки: радиатор, система охлаждения с жидким теплоносителем или комбинированная система (рис. 5). Для охлаждения в приведенном, в статье, примере позволяет использовать любую систему охлаждения, обеспечивающую разницу температур между горячей и холодной стороной в 70°C при условии, что температура горячей стороны не должен превышать $+80^{\circ}\text{C}$. Характеристика данного устройства,

изображена на рисунке 6.

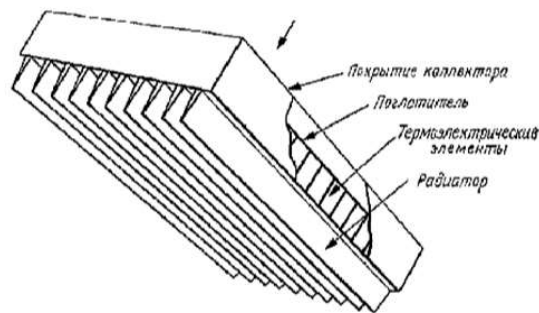


Рис. 5. Принципиальная конструкция использования преобразователя тепла для получения электроэнергии

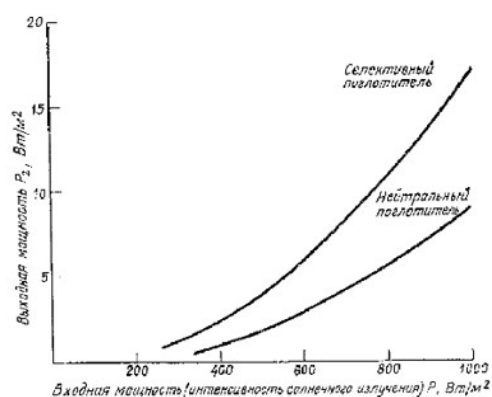


Рис. 6. Пример характеристики предложенной конструкции без учета солнечной панели

Решение применять модуль Пельтье, обусловлено тем, что, перегрев солнечной панели недопустим, так как, снижается ее КПД, а рабочий диапазон температур предложенного термоэлектрического преобразователя приблизительно совпадает с рабочим диапазоном солнечной панели [5, 6].

Анализ использования предложенного принципа конструирования солнечных панелей

Опираясь на вышеизложенный материал, мы определили, что используя подобную конструкцию солнечной установки, мы повысим коэффициент полезного действия с 18-22% до 19-23%, за счет более полного преобразования солнечного излучения в электрическую энергию принимая в расчет то, что, обслуживание солнечной станции состоящей из солнечных батарей изменится не значительно. Также, в случае использования системы охлаждения с водным теп-

лоносителем, допускается использование нагретой воды на близлежащих предприятиях, использующих в технологических процессах нагрев воды, для снижения затрат топлива на достижение необходимой температуры воды на предприятии. Данная конструкция открывает широкие перспективы при совершенствовании солнечных панелей в плане уменьшения влияния на их производительность высоких температур, что позволит использовать теплоэлектрогенераторы с более высокой разницей температур, позволяющей увеличить эффективность установки в целом [7].

Выводы

Проанализировав вышеизложенное, можно сделать следующие основные выводы:

- применение солнечных панелей с использованием термоэлектротеплопреобразователя является достаточно эффективным методом повышения коэффициента полезного действия с учетом дальнейшего совершенствования материалов;
- применение солнечных панелей с предложенной конструкцией открывает широкие перспективы их использования, как в частном секторе, так и при промышленном использовании;
- также данная технология благоприятно влияет на экологию, поскольку используется преобразование солнечной энергии, что не затрагивает экологические проблемы;
- в результате применения данного устройства, второстепенным фактором является наличие нагретого теплоносителя, использовании которого позволит экономить ресурсы.

Список литературы

1. Б. Дж. Бринкворт Солнечная энергия для человека. – М.: Мир, 1976 – 291 с.
2. Виссарионов В.И. Солнечная энергетика. Учебное пособие. Методические рекомендации. – М.: МЭИ, 2008. – 276 с.
3. Баранов Н.Н. Нетрадиционные источники и методы преобразования энергии: учебное пособие для вузов. – М.: МЭИ, 2012. – 384 с.
4. Джумаев А.Я. Анализ влияния температуры на рабочий режим фотоэлектрической солнечной станции / А.Я. Джумаев // Технические науки – от теории к практике. – 2015. – № 5. – С. 33-40.
5. Руди Д.Ю. Распределенная энергетика / Д.Ю. Руди // Сборник научных статей 4-й Международной научной конференции Поколение будущего: взгляд молодых ученых. – 2015. – Т. 4. – С.

225-229.

6. Белозерцев В.Н. Исследование основных характеристик термоэлектрического охладителя и генератора: лаб. практикум. – Самара: СГАУ, 2015. – 76 с.
7. Распределенная энергетика [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Распределенная_энергетика.

References

1. B. J. Brinkworth Solar energy for man. – Moscow.: Mir, 1976 – 291 p.
2. Vissarionov V.I. Solar energy. Textbook. Methodological recommendations. – Moscow: MEI, 2008. – 276 p.
3. Baranov N.N. Alternative sources and methods of energy conversion: Textbook for universities. – Moscow: MEI, 2012. – 384 p.
4. Dzhumaev A.Ya. Analysis of the influence of temperature on the operating mode of a photoelectric solar station / A.Ya. Dzhumaev // Technical sciences – from theory to practice. – 2015. – No. 5 – p 33-40.
5. Rudi D.Yu. Distributed energy / Rudi D.Yu. // a collection of scientific articles 4-th International scientific conference The generation of the future: a perspective of young scientists – 2015. – Vol. 4. – p. 225-229.
6. Belozertsev V.N. Research of the main characteristics of a thermoelectric cooler and generator: laboratory workshop. – Samara: SNRU, 2015. – 76 p.
7. Distributed energy [Electronic resource]: Wikipedia. The free encyclopedia. – Access mode: https://ru.wikipedia.org/wiki/Распределенная_энергетика.

УДК 621.316.718

Оптимизация режима асинхронного валогенератора в судовой электроэнергетической системе

Л.Н. Канов

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, lkanov48@mail.ru

Статья поступила 02.09.2020 г.; после доработки 04.09.2020 г.

Аннотация

Построено математическое описание режима работы асинхронного валогенератора в судовой электроэнергетической системе. Показана возможность оптимизации режима работы асинхронного валогенератора по величине активной мощности, передаваемой в судовую электроэнергетическую систему с помощью батареи регулировочных конденсаторов. Выполнен расчет оптимального режима в условиях изменяющейся скорости вращения главного двигателя при маневрировании и волнении.

Ключевые слова: асинхронный валогенератор, судовая электроэнергетическая система, математическое моделирование, скорость вращения вала, активная мощность, емкость регулировочного конденсатора, волнение моря

Optimization of the regime of Asynchronous shaftgenerator in the Ship electroenergy system

L. N. Kanov

Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st.,
Sevastopol, 299053, Russia, lkanov48@mail.ru

The article acted 02.09.2020 y.; after a revision 04.09.2020 y.

Abstract

Mathematical description of the regime of asynchronous shaftgenerator operations built in the ship electroenergy system. Possibility of optimization of the regime of asynchronous shaftgenerator operations is showed on the size of active power, transferable in the ship electroenergy system by the battery of regulation condensers. The calculation of the optimum regime is executed in the conditions of changing speed of main engine rotation at maneuvering and rough sea.

Keywords: asynchronous shaftgenerator, ship electroenergy system, mathematical modeling, speed of rotation of shaft, active-power, capacity of regulation condenser, rough sea

Введение

Для повышения эффективности использования топлива в зависимости от типа судна и силовой установки судовые электроэнергетические системы выполняются с отбором мощности от главной силовой установки с применением валогенераторов [1 – 3]. Валогенератор (ВГ) приводится во вращение от главного двигателя через редуктор.

Для выработки электроэнергии ВГ использует тяжелое топливо главного двигателя, значительно более дешевое, чем дизельное топливо высокооборотистых дизель-генераторов. Дизель-генераторы (ДГ) судовой электростанции большую часть времени работают с неполной нагрузкой, что объясняется случайным характером мощности судовых потребителей. В то же время загрузка главного двигателя в ходовом режиме близка к номинальной. Поэтому средний

КПД главного двигателя выше эксплуатационного КПД ДГ судовой электростанции. Следовательно, использование ВГ позволяет получить значительную экономию топлива.

В то же время использование ВГ связано с определенными техническими проблемами. Питание потребителей от ВГ может осуществляться только в определенном диапазоне изменения числа оборотов гребного вала. Опыт эксплуатации судов показывает [3 – 5], что статистическое изменение частоты вращения гребного вала примерно на 10...15% ниже или на 5% выше нормальной частоты вращения. Динамическое же изменение частоты вращения гребного вала при волнении еще больше.

Поэтому существенной трудностью при использовании ВГ является сложность стабилизации частоты и величины напряжения при значительных отклонениях частоты вращения гребного вала и переменной нагрузке ВГ. Для стабилизации напряжения, частоты и мощности ВГ применяются устройства регулирования возбуждения и различные статические преобразователи.

В [6] описана подобная схема ВГ. Она представляет каскадное соединение асинхронного генератора с двигателем постоянного тока. К входной статорной обмотке генератора с фазным ротором подводится напряжение возбуждения со стороны сети. Обмотка ротора через выпрямитель соединяется с цепью якоря двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. На валу двигателя установлен синхронный генератор. Таким образом, энергия асинхронного генератора передается на вал синхронного генератора, а он уже передает энергию в бортовую сеть.

Существуют схемы ВГ на основе биротативного генератора переменного тока [7], который состоит из двух вращающихся друг относительно друга роторов. Один ротор служит якорем, на нем уложена трехфазная обмотка. Другой ротор является короткозамкнутым и служит индуктором. Стабилизация частоты при переменной частоте вращения ведущего вала достигается путем регулирования частоты вращения якоря относительно индуктора. Для этого индуктор соединяется с валом посредством механической передачи. Якорь же вращается регулируемым приводом, частота вращения которого должна изменяться от нуля до значения, равного максимальному отклонению частоты вращения индуктора от номинальной. Регулирующий привод подсоединен к гребному валу.

Анализ технических решений при использо-

вании ВГ показывает, что пока не существует однозначных и общепринятых схем генераторных комплексов, которые работают с переменной частотой вращения.

Цель и задачи исследования

Целью статьи является анализ возможности применения схемы ВГ на основе асинхронной машины с конденсаторным возбуждением и оптимизация ее работы по максимуму передаваемой мощности в сеть.

Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи:

- построение математической модели асинхронной машины с конденсаторным возбуждением, включенной к бортовой сети;
- расчет активной и реактивной мощностей асинхронного валогенератора (АВГ), передаваемых в сеть;
- определение оптимальных величин ёмкости конденсаторов для обеспечения максимальной передаваемой активной мощности в условиях переменной скорости вращения главного двигателя.

Математическое описание асинхронного валогенератора

Рассмотрим АВГ, состоящий из короткозамкнутого асинхронного двигателя с приводом от гребного вала через повышающий редуктор, работающий на сеть. Таким образом, АВГ возбуждается от напряжения сети заданной величины U и частоты f . При вращении короткозамкнутого ротора со сверхсинхронной скоростью АВГ при соответствующей регулировке конденсаторов C передает мощность в бортовую сеть, рис.1.

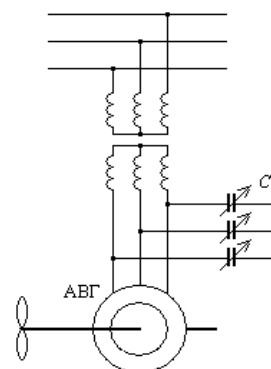


Рис.1. Асинхронный валогенератор с короткозамкнутым ротором

Уравнения короткозамкнутого асинхронного генератора имеют вид [6], рис.2,а

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= r_1 I_1 + jx_{\sigma 1} I_1 + jx_1 (I_1 + I_2'); \\ 0 &= \frac{r_2'}{s} I_2' + jx_{\sigma 2}' I_2' + jx_1 (I_2' + I_1) \end{aligned} \right\}$$

В этих формулах

U_1 – приложенное напряжение статора;

I_1, I_2' – фазные токи статора и ротора;

r_1, r_2' – активные сопротивления статора и ротора;

$x_{\sigma 1}, x_{\sigma 2}'$ – индуктивные сопротивления рассеяния статора и ротора;

x_1 – индуктивное сопротивление, соответствующее магнитной цепи АВГ;

$$s = 1 - \frac{p\Omega}{\omega_0} \text{ – скольжение;}$$

p – повышающий коэффициент редукции скорости от валопровода к ротору;

ω_0 – частота напряжения;

Ω – угловая скорость вращения вала.

Активная проводимость g_m отражает потери энергии в магнитной цепи.

Полагая, что валогенератор получает вращение от главного валопровода через повышающий редуктор с коэффициентом P , получаем скорость вращения ротора $p\Omega$. К выводам валогенератора подключается регулировочная батарея конденсаторов C , и через кабель и разделительный трансформатор r_k, x_k валогенератор подсоединяется к сборным шинам бортовой электроэнергетической системы с напряжением $\bar{U}$, рис.2,б.

Таким образом, АВГ работает с напряжением и частотой сети и в зависимости от величины емкости регулировочного конденсатора (емкостной проводимости $b_c = \omega C$) и скорости вращения Ω обменивается с сетью активной P и реактивной Q мощностями.

Вследствие насыщения магнитной цепи индуктивное сопротивление x_1 не остается постоянным и зависит от модуля напряжения (величины $|\Phi_2|$). Для целей анализа эту зависимость аппроксимируем выражением

$$x_1(|\Phi_2|) = \omega_0 L_1 \cdot e^{-a|\Phi_2|^2},$$

где a – коэффициент аппроксимации.

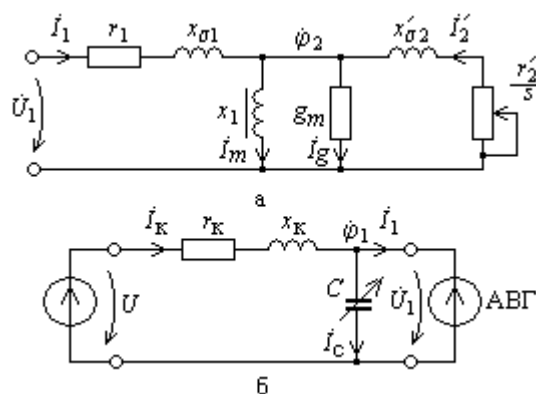


Рис.2. Асинхронный валогенератор:
а) схема замещения АВГ; б) схема включения АВГ к электроэнергетической системе судна

Согласно методу узловых потенциалов [6] получаем уравнения для определения потенциалов узлов Φ_1, Φ_2 :

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 \cdot \left(\frac{1}{Z_k} + jb_c + \frac{1}{Z_1} \right) - \Phi_2 \frac{1}{Z_1} &= \frac{\bar{U}}{Z_k}; \\ \Phi_1 \frac{-1}{Z_1} + \Phi_2 \cdot \left(\frac{1}{jx_1(|\Phi_2|)} + g_m + \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2'} \right) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где обозначены $Z_k = r_k + jx_k$,

$$Z_1 = r_1 + jx_{\sigma 1}, \quad Z_2' = \frac{r_2'}{s} + jx_{\sigma 2}'.$$

После решения уравнений (1) получаем потенциалы узлов цепи Φ_1, Φ_2 ; ток, отдаваемый в бортовую сеть $I_k = \frac{\Phi_1 - \bar{U}}{r_k + jx_k}$ и мощность валогенератора $\underline{S} = \bar{U} I_k^* = P + jQ$.

Расчет режимов асинхронного валогенератора

Ввиду нелинейной зависимости сопротивления намагничивания от потенциала $|\Phi_2|$ аналитическое решение уравнений (1) невозможно. Численное решение выполнено в среде *MathCad* при различных значениях скорости вращения валопровода Ω и емкостной проводимости b_c . Расчеты выполнены для асинхронного двигателя на напряжение $U = 380$ В с параметрами: $r_1 = r_2' = 90$ мОм; $L_{\sigma 1} = 4$ мГн; $L_{\sigma 2}' = 3$ мГн; $a = 0,007355$; $r_k = 90$ мОм; $L_k = 30$ мГн;

$g_m = 10 \text{ мСм}$; $L_1 = 0,5 \text{ Гн}$; $s_{\text{ном}} = 0,045$; $\Omega_{\text{ном}} = 26,5 \text{ с}^{-1}$; $k_p = 12$; $\omega_0 = 314 \text{ с}^{-1}$.

Рассчитанные активная и реактивная мощность являются функциями двух переменных: $P(\Omega, b_c)$, $Q(\Omega, b_c)$ и аппроксимированы *spline* – операторами в среде *MathCad*. На рис.3 показаны линии уровня активной мощности, Вт, на плоскости Ω , b_c . Рисунок показывает наличие вытянутой искривленной области максимальных значений активной мощности при скорости вращения вблизи $\Omega = 28 \text{ с}^{-1}$. Этот максимум существенно зависит от величины емкости: наибольшее значение мощности имеет место при $b_c = 0,55 \text{ См}$; $C = 1750 \text{ мкФ}$; $P_{\text{max}} = 18 \text{ кВт}$. На рис.4 показана линия, соответствующая локальным максимумам мощности.

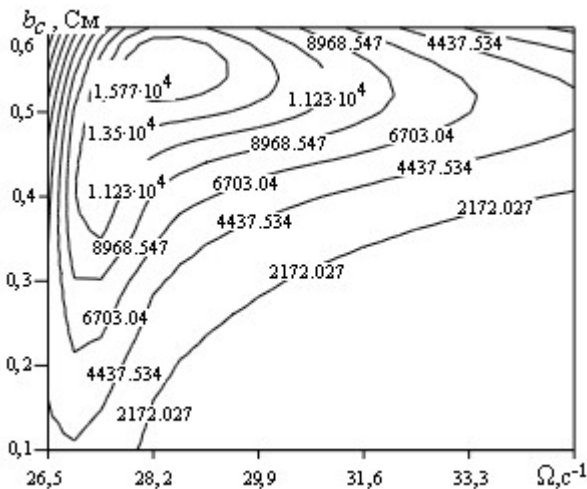


Рис.3. Линии уровня активной мощности АВГ, Вт

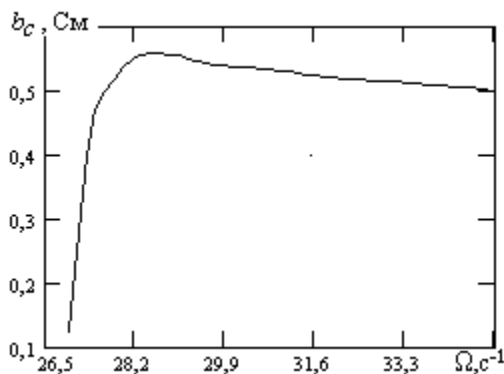


Рис.4. Линия максимальной активной мощности

На рис.5 показаны линии уровня реактивной мощности, ВАр, на плоскости Ω , b_c . Сравнение графиков линий уровня активной и реактивной

мощностей на рис.3, 5 показывает, что линия нулевого уровня реактивной мощности $Q(\Omega, b_c) = 0$ соответствует линии максимума графика активной мощности $P(\Omega, b_c) = \max$, рис.4.

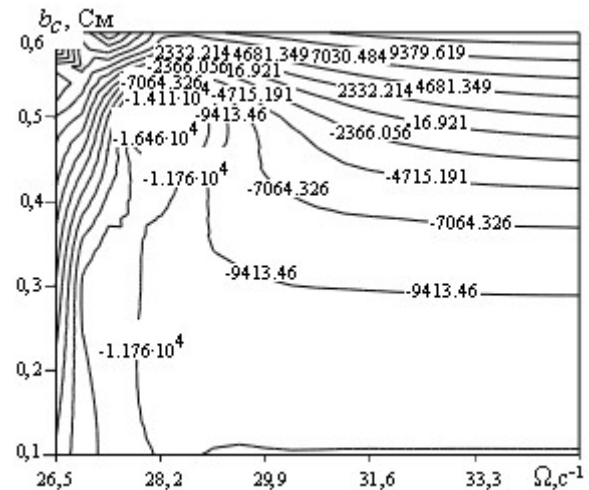


Рис.5. Линии уровня реактивной мощности, ВАр

Таким образом, при изменении скорости вращения валопровода главного двигателя и соответствующего изменения скорости вращения ротора АВГ регулированием емкости получаем возможность удерживать работу АВГ на локальном максимуме активной мощности и минимуме реактивной.

Изменяя емкость, можно передавать в сеть реактивную мощность или поглощать ее из сети ценой снижения активной мощности.

Моделирование работы АВГ при маневрировании судна и волнении моря

Скорость вращения гребного винта зависит от желаемой скорости хода судна и выхода винта из воды при качке из-за волнения моря. Желаемая скорость хода определяется условиями эксплуатации судна. Изменение скорости вращения винта из-за волнения связано с изменением средней плотности воды при подъеме винта из воды. Скорость вращения винта n при подъеме определяется решением уравнения [8, 9]

$$\frac{M}{\rho n^2 D^5} = -0,44 \frac{v_p}{nD} + 0,53,$$

где M , D – вращающий момент и диаметр винта; n – число оборотов, об/с; ρ – плотность воды; v_p – расчетная скорость винта. Решение этого уравнения при M

$=7,42 \cdot 10^4$ кг·м, $D=2$ м, $v_p=5,5$ м/с для грузового судна среднего водоизмещения дает выражение для n

$$n = 1,152 + \sqrt{1,327 + \frac{4,375 \cdot 10^3}{\rho_{cp}}}; \quad \Omega = 2\pi n.$$

Средняя плотность воды оценивается формулой $\left(1 - \frac{H(t)}{D}\right) \cdot \rho_{ном}$, где $H(t)$ – высота подъема винта над поверхностью воды, и изменяется от номинального значения $\rho_{ном}$ при полностью погруженном винте $H(t) = 0$ до нулевой при полном выходе винта $H(t) = D$.

Таким образом, при неизменном моменте с падением средней плотности воды (при выходе винта из воды) происходит увеличение числа оборотов винта. График зависимости количества оборотов от плотности изображен на рис.6.

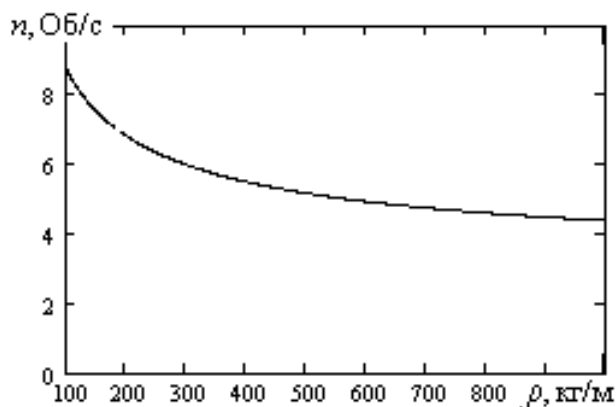


Рис.6. Зависимость числа оборотов винта от плотности воды

При полном выходе винта $H(t) \approx D$ чрезмерное увеличение числа оборотов предотвращает система регулирования главного двигателя. Оценим далее влияние вертикальной и килевой качки судна на волнении, рис.7.

Килевая качка характеризуется углом $\psi(t)$, вертикальная – высотой подъема $\xi(t)$. На гладкой поверхности воды осадка судна от поверхности до его днища обозначена h . При угле килевой качки ψ корма отклоняется вверх на величину $L \sin \psi$, где L – расстояние от положения центра тяжести до кормы. Если $L \sin \psi > h$ – винт выходит из воды, и скорость его вращения увеличивается. Высота подъема винта над поверхностью воды $H(t) = L \sin \psi - h$.

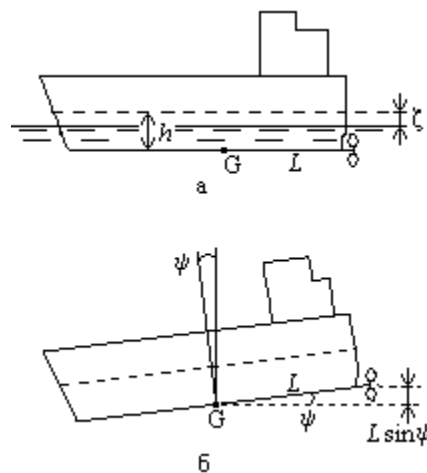


Рис.7. Высота подъема винта при волнении: а) вертикальная качка; б) килевая качка

Вертикальное перемещение судна ξ вследствие вертикальной качки добавляет к этому подъему еще ξ : $H(t) = L \sin \psi - h + \xi$. Кроме того, следует учитывать поверхность волны h_w , которая согласно [8] принимается

$$h_w(t) = h_{\max} \left(\sin \omega_k t + \frac{\pi h_{\max}}{\lambda} \cos 2\omega_k t \right),$$

где λ – длина волны, ω_k – кажущаяся частота волнения. Окончательно получаем высоту подъема винта

$$H(t) = L \sin \psi - h + \xi + h_w(t).$$

Параметры килевой и вертикальной качки $\psi(t)$ и $\xi(t)$ описываются уравнениями [8, 9]:

$$\left. \begin{aligned} A_{33}\ddot{\xi}_q + B_{33}\dot{\xi}_q + C_{33}\xi_q + A_{35}\ddot{\psi} + B_{35}\dot{\psi} + C_{35}\psi &= F_m e^{j\omega_k t}; \\ A_{53}\ddot{\xi}_q + B_{53}\dot{\xi}_q + C_{53}\xi_q + A_{55}\ddot{\psi} + B_{55}\dot{\psi} + C_{55}\psi &= M_m e^{j\omega_k t}, \end{aligned} \right\}$$

где A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} – коэффициенты инерционных, демпфирующих и восстанавливающих сил, $i, j = 3, 5$; F_m, M_m – амплитуды колебательных возмущений.

Последние уравнения решаются для модулей комплексных функций, т.е. принимается $F_m \sin(\omega_k t + \varphi)$; $M_m \sin(\omega_k t + \vartheta)$. Решение выполнено для обычных значений параметров среднего грузового судна в типичных условиях плавания в Черном море. На рис.8 изображены результаты расчета высоты подъема винта $\xi(t)$ при вертикальной качке и значения подъема винта в соответствии с выражением $L \sin \psi$ при

килевой качке (значения $\psi(t)$ показаны увеличенными в 20 раз). На этом же рисунке показан график поверхности волны $h_w(t)$. Результирующий график высоты подъема винта $H(t)$ по и график средней плотности воды $p_{cp}(t)$ изображены на рис.9.

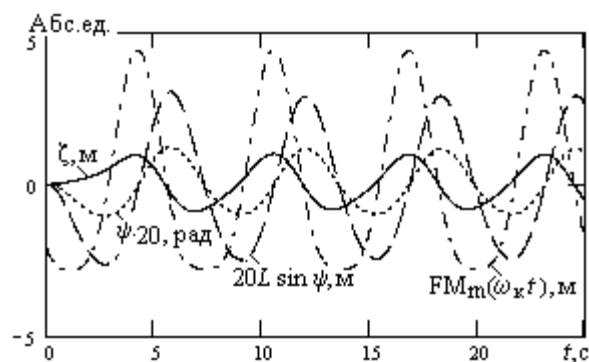


Рис.8. Типичные параметры морского волнения

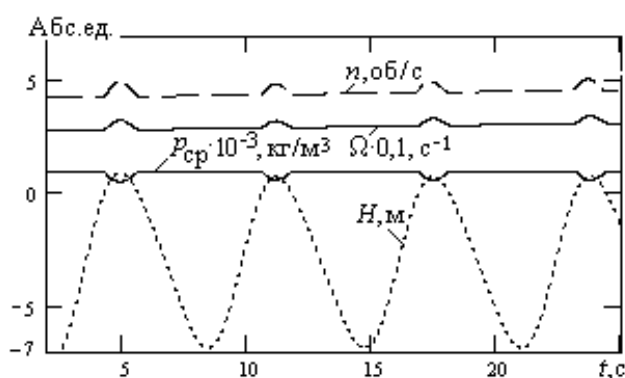


Рис.9. Параметры качки и скорость вращения валогенератора

Из рис.9 следует, что при прохождении волны высота подъема винта становится выше уровня воды, и средняя плотность воды $p_{cp}(t)$ уменьшается. Согласно зависимости скорости вращения винта от средней плотности воды скорость вращения $\Omega(t)$ в эти интервалы времени возрастает. В графиках $\Omega(t)$, $n(t)$ также отражено плавное увеличение скорости вращения, предпринимаемое в связи возможным маневрированием судна.

График зависимости оптимального значения емкости $C_{opt}(t)$ от скорости вращения $\Omega(t)$ согласно рис.4 изображен на рис.10. График показывает, что при плавном увеличении скорости маневрирования значение оптимальной емкости снижается. В интервалах времени

подъема винта из воды в связи с дополнительным увеличением скорости вращения происходит существенное уменьшение емкости.

На рис.11 показаны графики изменения активной и реактивной мощностей, передаваемых АВГ в бортовую сеть. Сравнение графиков показывает, что активная мощность существенно увеличивается при оптимальной емкости, а реактивная мощность снижается до нуля.

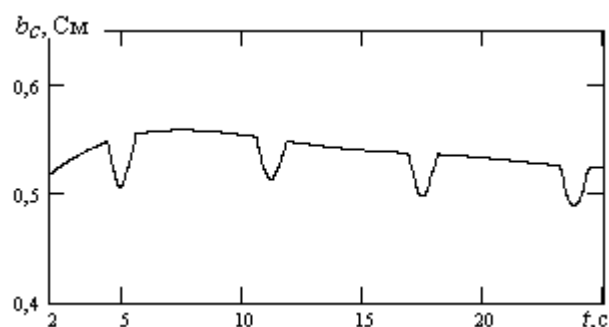


Рис.10. Оптимальная величина емкостной проводимости

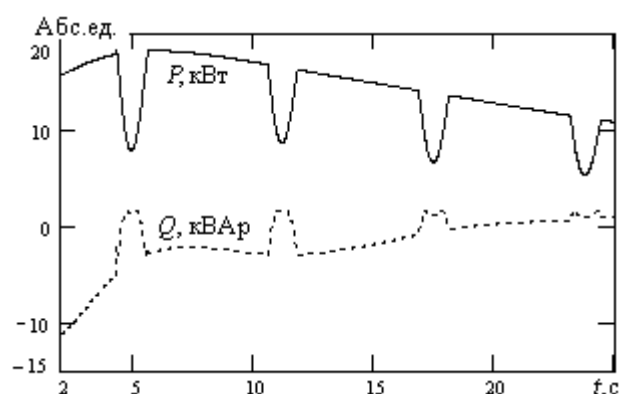


Рис.11. Активная и реактивная мощности, передаваемые валогенератором в электроэнергетическую систему судна

Заключение

В статье рассмотрен способ повышения эффективности судовой электроэнергетической системы в условиях маневрирования и волнения путем применения асинхронных валогенераторов. Сложность существующих схем включения АВГ обусловлена стремлением стабилизировать частоту и уровень напряжения до значений, принятых в электроэнергетической системе. В статье исследован вариант непосредственного включения асинхронного АВГ на главный распределительный щит.

В этих условиях АВГ возбуждается напряжением бортовой сети и работает с частотой и

величиной напряжения распределительного щита. Изменением параллельно подсоединенной емкости можно регулировать величину активной и реактивной мощности, передаваемой от АВГ в сеть.

В статье обоснован выбор оптимальной величины емкости для получения от валогенератора максимального значения активной мощности. Показано, что при маневрировании, связанном с увеличением скорости вращения главного двигателя, активная мощность снижается. Это же происходит и в условиях волнения, когда в определенные интервалы времени винт выходит из воды. Перспективным направлением исследований является построение системы управления величиной емкости в зависимости от скорости вращения валогенератора.

Список литературы

1. Сухарев Е.М. Судовые электрические станции, сети и их эксплуатация. – Л.: Судостроение, 1986. – 302 с.
2. Хайдуков О.П. Эксплуатация электроэнергетических систем морских судов. – М.: Транспорт, 1988. – 223 с.
3. Краснов В.В., Мещанинов П.А., Мещанинов А.П. Основы теории и расчета судовых электроэнергетических систем. – Л.: Судостроение, 1989. – 328с.
4. Воскобович В.Ю., Корнилова Т.Н., Павлова В.А. Электроэнергетические установки и силовая электроника транспортных средств. – СПб.: изд-во «Элмор», 2001. – 384 с.
5. Богомолов В.С. Судовые электроэнергетические системы и их эксплуатация. – М.: изд-во «Мир», 2006. – 320 с.
6. Торопцев Н.Д. Асинхронные генераторы автономных систем. – М.: изд-во «Знак», 2017. – 288с.
7. Пасс А.Е., Вишнеvский Л.В. Анализ судовых биروتативных валогенераторов / Кибернетика на морском транспорте. Респ. межведомств. науч. – техн. сборник. Вып. 10. – Киев, изд-во «Техніка», 1981. – С.76 – 87.
8. Справочник по теории корабля. Том 2. Статика судов. Качка судов / Под ред. Я.И.Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 440 с.
9. Костюков А.А. Теория корабля. – М.: изд-во «Морской транспорт», 1962. – 320 с.

References

1. Sukharev E.M. *Sudovye elektricheskie stantsii, seti i ikh ekspluatatsiya* [Ship electric stations, networks and their exploitation]. Leningrad: Izd. "Shipbuilding", 1986. – 302 p.
2. Khaidukov O.P. *Ekspluatatsiya elektroenergeticheskikh sistem morskikh sudov* [Exploitation of the

- electroenergy systems of marine ships]. Moscow: Izd. "Transport", 1988. – 223 p.
3. Krasnov V.V., Meshchaninov P.A., Meshchaninov A.P. *Osnovy teorii i rascheta sudovykh elektroenergeticheskikh sistem* [Bases of theory and calculation of the ship electroenergy systems]. Leningrad: Izd. "Shipbuilding", 1989. – 328 p.
4. Voskobovich V.Yu., Kornilova T.N., Pavlova V.A. *Elektroenergeticheskie ustanovki i silovaya elektronika transportnykh sredstv* [Electroenergy plants and power electronics of transport vehicles]. SPb: Izd. "Elmor", 2001. – 384 p.
5. Bogomolov V.S. *Sudovye elektroenergeticheskie sistemy i ikh ekspluatatsiya* [Ship electroenergy systems and their exploitation]. Moscow: Izd. "World", 2006. – 300 p.
6. Toroptsev N.D. *Asinkhronnye generatory avtonomnykh sistem* [Asynchronous generators of the autonomous systems]. Moscow: Izd. "Sign", 2017. – 288 p.
7. Pass A.E., Vishnevskii L.V. *Analiz sudovykh birotativnykh valogeneratorov* [Analysis of ship birotating shaftgenerators]. Cybernetics on a marine transport. Resp. science – techn. collection. № 10. Kiev, Izd. «Tekhnika», 1981. – P.76 – 87.
8. *Spravochnik po teorii korablya. Tom 2. Statika sudov. Kachka sudov* [Reference book on the theory of ship. Tom 2. Static of courts. Tossing of courts]. Leningrad: Izd. "Shipbuilding", 1985. – 440 p.
9. Kostyukov A.A. *Teoriya korablya* [Ships theory]. Moscow: Izd. "Sea Transport", 1962. – 320 p

УДК. 621.311.1

Применение резонансного метода передачи электроэнергии

В.В. Смирнов¹, А.А. Скидан, Э.Р. Джемилев²ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия., ¹svadick@mail.ru, ²a.a.skidan@sevsu.ru, ³edem9911@gmail.com.

Статья поступила 26.06.2020 г.; после доработки 29.06.2020 г.

Аннотация

Проведен анализ использования резонансной системы электроснабжения для создания сверхдальних линий электропередач. Предложены варианты передающего и приёмного резонансных контуров с высокочастотными трансформаторами и однопроводной линии. Рассмотрен метод настройки двухконтурной резонансной системы электроснабжения с учётом взаимной индукции обмоток высокочастотных трансформаторов.

Ключевые слова: однопроводная линия, резонанс, кабельная линия, потери электроэнергии, стоячие волны, высокочастотный трансформатор.

Application of the resonance method of electric power transmission

V. V. Smirnov¹, A.A. Skidan², E. R. Dzhemilev³FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,
Sevastopol, 299053, Russia. ¹svadick@mail.ru, ²a.a.skidan@sevsu.ru, ³edem9911@gmail.com.

Received 26.06.2020 y.; received in final form 29.06.2020 y.

Abstract

The analysis of the use of a resonant power supply system for creating ultra-long lines is carried out transmission line. Variants of transmitting and receiving resonant circuits with high-frequency are proposed transformers and single wire lines. A method for setting up a two-circuit resonant system is considered electricity supply taking into account the mutual induction of the windings of high frequency transformers.

Keywords single: wire line, resonance, cable line, power loss, standing waves, high-frequency transformer.

Введение

Варианты передачи электроэнергии с помощью постоянного или переменного тока разрабатываются и совершенствуются до сегодняшних дней, вся эта борьба происходит в концепции привычных двух-трёхпроводных высоковольтных линий электропередач.

Современная линия электропередачи, будь то подземная или надземная, в обычном понимании – это три (в случае трехфазной линии) провода от источника электроэнергии к потребителям. Сечение данных проводов на прямую зависит от величины нагрузки и тока – для 200-300 ватт домашней люстры достаточно проводов с сечением 0,75 миллиметра квадратных, для нагрузки в несколько киловатт уже требуются

провода от 2,5 кв. мм и выше, такое допустимо для разводки проводов. Допустим, сечение кабельной линии проложенной по дачному посёлку, может быть сопоставима, примитивно выражаясь, с диаметром пальца человека. Стоимость проводов и их вес пропорционально растут, а также растут омические потери энергии в них.

Такое ещё возможно при разводке проводов «в конце линий», но если бы провода ЛЭП от источника к потребителям соответствовали потребляемому току потребителей, то были бы они сечением тысячи миллиметров квадратных, что совершенно недопустимо. Поэтому для передачи одной и той же мощности, но по проводам меньшего сечения, используют повышенное напряжение – тысячи вольт. При постоянной

мощности напряжение увеличивается, а ток уменьшается: по закону Ома. Но и в данном случае сечение проводов на ЛЭП большое, масса и стоимость их огромны.

Как один из вариантов решения этой проблемы предполагается: на генерирующей стороне преобразовывать электрический ток в высокочастотный (частота не превышает 50 кГц), передать его на колебательный контур, настроенный на соответствующую частоту, и соединить

его с контуром на принимающей стороне. Соединить одним проводом, который имеет меньшее сечение по сравнению с тем, что использовался бы в привычной для понимания линии. В режиме резонанса в линии достигается напряжение до сотен тысяч вольт, но токи относительно невелики, поэтому Джоулевы потери на нагрев проводников в линии малы и поэтому не требуется большое сечение и масса провода.

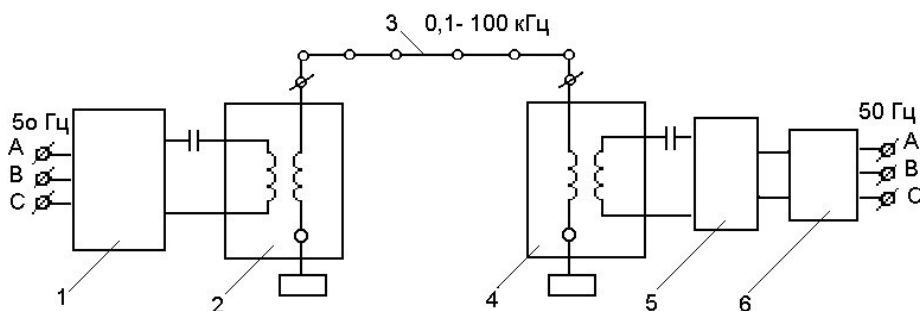


Рис.1. Электрическая схема РС с двумя высокочастотными (ВЧ) трансформаторами.

- 1 – генератор повышенной частоты;
- 2 – резонансный контур повышающего трансформатора;
- 3 – однопроводниковая линия;
- 4 – резонансный контур понижающего трансформатора;
- 5 – выпрямитель;
- 6 – инвертор.

С однопроводными резонансными линиями (системами) открываются возможности для создания сверхдальних линий электропередач и, в перспективе, замены существующих воздушных линий

на кабельные нового типа

Так будет решена одна из важнейших проблем электрификации – повышение надежности электроснабжения.

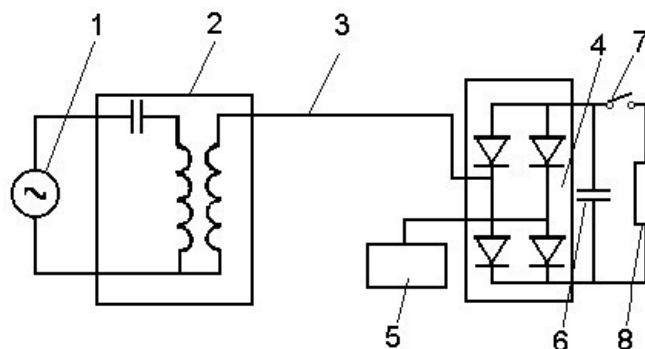


Рис. 2. Схема передачи электрической энергии с диодно-конденсаторным блоком:

- 1 – генератор повышенной частоты;
- 2 – резонансный контур повышающего трансформатора;
- 3 – однопроводниковая линия;
- 4 – преобразовательный мост;
- 5 – естественная ёмкость;
- 6 – конденсатор выпрямителя;
- 7 – ключ;
- 8 – нагрузка.

На рис. 3 видим распределение волн напряжения и тока в однопроводной линии, которая замкнута на землю с обеих сторон. Она представляет собой волноводную линию со сдвигом фаз между токами и напряжениями 90° . При монтаже на заземленных опорах, присоединенных к линии в точках с узлами напряжения. То факт,

что линия заземлена не будет искажать параметры этой линии и не окажет влияние на величину передаваемой мощности.

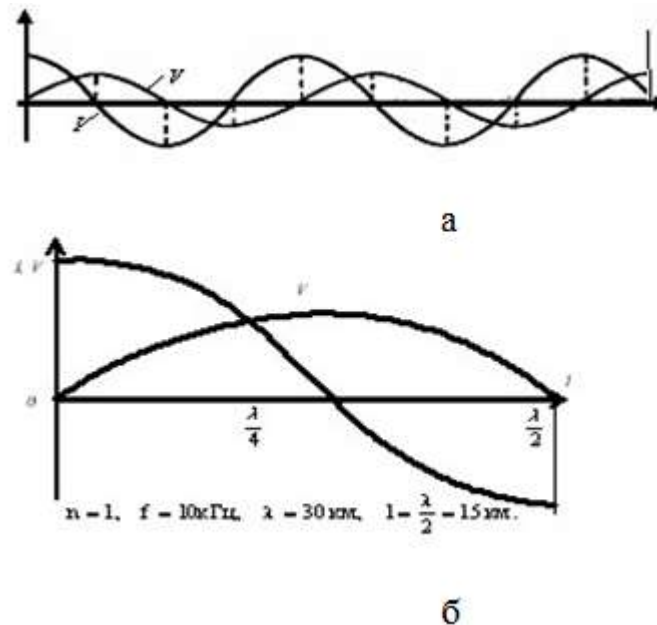


Рис 3. . Распределение напряжений и токов в линии, замкнутой с двух сторон на землю:
а – распределение стоячих волн тока и напряжения вдоль однопроводной линии;
б – распределение токов и напряжений в полуволновой однопроводной линии.

Стоячие волны в разомкнутой линии (рис. 4) появляются в результате сложения падающей и отраженной волн, имеющих похожие амплитуды. Фазы напряжения и тока во всех сечениях линии одинакова. Между напряжением и током существует сдвиг по фазе на 90° в пространстве и во времени. Когда во всей линии напряжение максимально, ток стремится к нулю и наоборот. Пространственный сдвиг будет выражаться в том, что в сечениях линии с пучностями напряжения наблюдаются узлы тока, а при узлах напряжения наблюдаются пучности тока. Фаза во всех сечениях линии одинакова. Это означает, что во всей линии напряжение равно нулю или максимально в один и тот же момент времени, но эти максимумы для разных сечений различны, так как амплитуда колебаний вдоль всей линии изменяется. То же самое происходит с волнами тока. Средняя мощность, отдаваемая генератором(источником) в разомкнутую однопровод-

ную линию или в линию, замкнутую на реактивное сопротивление, будет равна нулю. У линии работающей в режиме стоячих волн входное сопротивление имеет реактивный характер. Если в линии есть потери, то данная бегущая волна от источника компенсирует эти потери. При наличии в линии как бегущих так и стоячих волн ее входное сопротивление содержит активную и реактивную составляющие. В настоящее время длина линий электропередач зачастую не превышает 1000 км, а длина волны тока и напряжения при частоте 50 Гц составляет 6000 км. Полуволновая линия (рис. 5) длиной 1000 км может быть выполнена при частоте 150 Гц, даже в трехпроводном привычном исполнении. Данная линия будет передавать значительно большие мощности, чем при стандартной частоте. Однако современные линии электропередач проявляют свои резонансные свойства только в аварийных режимах (при обрыве линии у потребителей).

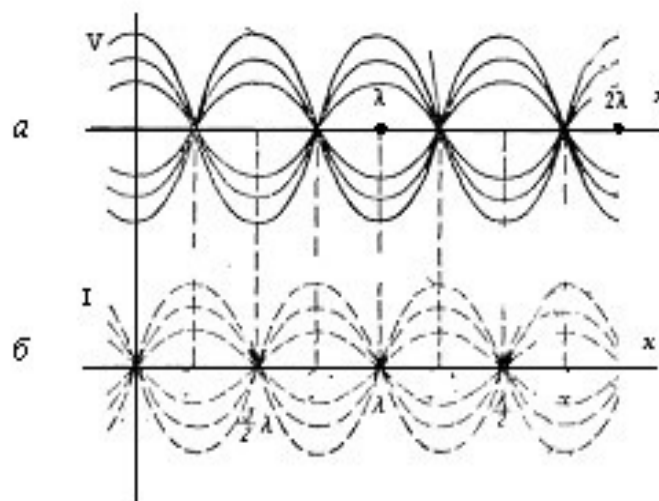


Рис. 4. Стоячие волны. Распределение волн:

а – напряжения;

б – тока в однопроводниковой линии в различные моменты времени

В данных линиях содержание алюминия и меди в проводах может быть радикально уменьшено за счёт снижения их сечения в десятки раз. Если линию электропередачи сделать в виде стального провода (для повышения прочности), который будет покрыт тонким слоем меди (для электропроводности), то такие линии станут совершенно непривлекательны для расхитителей цветного металла.

Из перечисленного следует, что потери электроэнергии в однопроводной линии малы по сравнению с двух-трехфазной линией. Большинство линий электропередач можно будет сделать подземными, заменив воздушные, тем самым исключив обрывы от погодных стихий, таких как ураганы или ледяные дожди, а также уменьшить огромные затраты на их ремонт и эксплуатацию.

Главные преимущества резонансной системы передачи электроэнергии:

- создание сверхдальних кабельных линий электропередач;
- потребители, где опоры воздушных линий либо тонут, либо всплывают; болотистые места, горы и другие удаленные и трудно доступные места, где освоение полезных ископаемых затруднено в связи с отсутствием электричества .
- современные ЛЭП проявляют резонансные свойства в аварийных режимах, что приводит к перенапряжению и разрушению изоляторов, а при обрыве одного провода ли-

нии стремительно изменяется частота и линия отключается;

- благодаря относительно малой ёмкости линии передача электроэнергии осуществляется по однопроводному высоковольтному кабелю не используя линейные реакторы;
- экономия электроэнергии при передаче. так как снижаются омические потери в линии;
- данная система позволяет доставлять потребителям качественную электроэнергию.

Она так же позволяет разделять частоты у генератора и потребителя, так как имеются вставки постоянного тока вначале и в конце данной линии:

- экономия материалов проводов и снижение стоимости монтажа линии.;
- снижение расходов на техническое обслуживание, отсутствие межфазных коротких замыканий;
- несанкционированное подключение к линиям и кража электроэнергии станут почти невозможны.

Интересный практический эксперимент – передача электроэнергии для оборудования электрохимической катодной защиты газопроводов, который осуществил Газпром. Дело в том, что на всех газо- и нефтепроводах обязательно через каждые 10 километров стоят станции катодной защиты, чуть с большим интервалом – автоматика, задвижки и т.д. Для питания этого оборудования вдоль трубы пускают трёхфазную ЛЭП, которая представляет собой головную боль для нефтяников и газовиков, поскольку

на большом протяжении она проходит по ненаселённым районам, сильно подвержена стихиям и труднодоступна для ремонта.

Для эксперимента был взят один из фазных проводов этой ЛЭП и использован как однопроводная линия на отдельном участке, продемонстрировав эффективность и огромную экономию меди, поскольку стандартно там идут 3 провода сечением по 70 «квадратов». Потом на этом же участке пустили ту же энергию по 1-миллиметровому проводу в коаксиальной оболочке, да ещё и с минимальными потерями около 2 процентов. То есть толстые медные и алюминиевые кабели оказались не нужны, а если тонкий провод закопать в землю, то и проблемы с защищённостью электроснабжения газопровода будут решены.

Заключение

Потребление электроэнергии в России и во всем мире растёт год от года. Это требует или строительства новых линий электропередач или модернизации уже существующих.

При этом весьма существенен расход электроэнергии на её транспортировку. При резонансной системе передачи электрической энергии токи в линии будут меньше, поэтому потери на нагрев проводника снизятся до технически возможного минимума. Так как в линиях электропередач резонансного типа по сравнению с классическими при одинаковой пропускной способности существенно снижается требуемый для этого минимальный диаметр используемых проводов, то это обеспечивает значительную экономию и финансовых и материальных ресурсов. Особенно, если учесть, что суммарная протяжённость высоковольтных ЛЭП в России составляет около полумиллиона километров. Рассматриваемый тип линии электропередачи способен обладать большей устойчивостью в работе по сравнению с уже существующими и в будущем занять достойное место в развитии электроэнергетики России.

Список литературы

1. Стребков Д.С. Резонансные системы распределения электрической энергии. «ЭЛЕКТРО-ЭНЕРГИЯ. Передача и распределение», №3, 2010 г., с. 72—75.
2. Стребков Д.С. Высокотемпературная квазисверхпроводимость проводников для ёмкостных токов. Доклады РАСХН, №4, 2005 г., с. 56—

58.

References

1. Strebkov D. S. Resonant systems of distribution of electric energy. "ELECTRO-ENERGY. Transmission and distribution", No. 3, 2010, pp. 72-75.
2. Strebkov D. S. high temperature kVA-ServerProtect conductors for capacity-tion currents. RASKhN reports, no. 4, 2005, pp. 56-58

УДК.620.92

Оценка состояния и перспективы развития солнечной энергетики в Республике Крым

С.С. Туленков¹, И.А. Кочетов², В.А. Тунда³, В.В. Кувшинов⁴, Ю.Я. Пивень⁵

ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия. ¹ tulenkov_2013@mail.ru, ² kochetov.vano@mail.ru, ³ jast_go@mail.ru,
⁴ kuvshinov.vladimir@gmail.com, ⁵ juriypiven@rambler.ru

Статья поступила 15.06.2020 г.; после доработки 18.06.2020 г.

Аннотация

На сегодняшний день активно внедряют электростанции на альтернативных видах энергии. Республика Крым имеет огромные запасы альтернативных источников энергии, особенно энергии солнца. Крым по количеству солнечных дней в году занимает лидирующее место в стране. В связи с этим произведена оценка состояния солнечной энергетики в Республике Крым на 2020 год, а также рассмотрены перспективы ее развития.

Ключевые слова: ресурсы, солнечная энергетика, Республика Крым, электростанция, альтернативные источники.

Assessment of the state and prospects of solar energy development in the Republic of Crimea

S.S. Tulenkov¹, I.A. Kochetov², V.A. Tunda³, V.V. Kuvshinov⁴, U.Y. Piven⁵

FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,
Sevastopol, 299053, Russia. ¹ tulenkov_2013@mail.ru, ² kochetov.vano@mail.ru, ³ jast_go@mail.ru,
⁴ kuvshinov.vladimir@gmail.com, ⁵ juriypiven@rambler.ru

Received 15.06.2020 y.; received in final form 18.06.2020 y.

Abstract

To date, they are actively introducing power plants using alternative energy sources. The Republic of Crimea has huge reserves of alternative energy sources, especially solar energy. In this regard, an assessment was made of the state of solar energy in the Republic of Crimea for 2020, and prospects for its development were also considered.

Keywords: resources, solar energy, Republic of Crimea, power stations, alternative sources.

Введение

На сегодняшний день во всем мире наблюдается увеличение производства электроэнергии. Лидерами являются такие страны, как Китай, Соединенные Штаты, Индия, Россия и Япония (рис. 1) [1]. Мощные электростанции имеют хорошие экономические показатели и производят огромное количество электроэнергии.

Однако их использование наносит большой вред окружающей среде. Наиболее распространенными являются тепловые электростанции (рис. 2) [2].

Процесс выработки электроэнергии на ТЭС связан с сжиганием природного топлива. При

сжигании топлива выделяются побочные продукты горения, которые попадают в окружающую среду и загрязняют ее.

В таблице 1 приводится сравнительная оценка количества побочных продуктов горения для разных типов ТЭЦ.

Поэтому сейчас широко внедряют электростанции на альтернативных видах энергии. Наиболее распространенными являются солнечные, ветровые и гидроэлектростанции. Так же используются приливные, волновые, геотермальные, биогазовые электростанции.

Единицы: TWh

Максимальный ▾

Китай	7,092
Соединенные Штаты	4,429
Индия	1,643
Россия	1,128
Япония	1,102
Канада	663
Германия	647
Бразилия	596
Южная Корея	593
Франция	571
Саудовская Аравия	351
Великобритания	334

Рис. 1. Страны-лидеры по производству электроэнергии на 2018 год

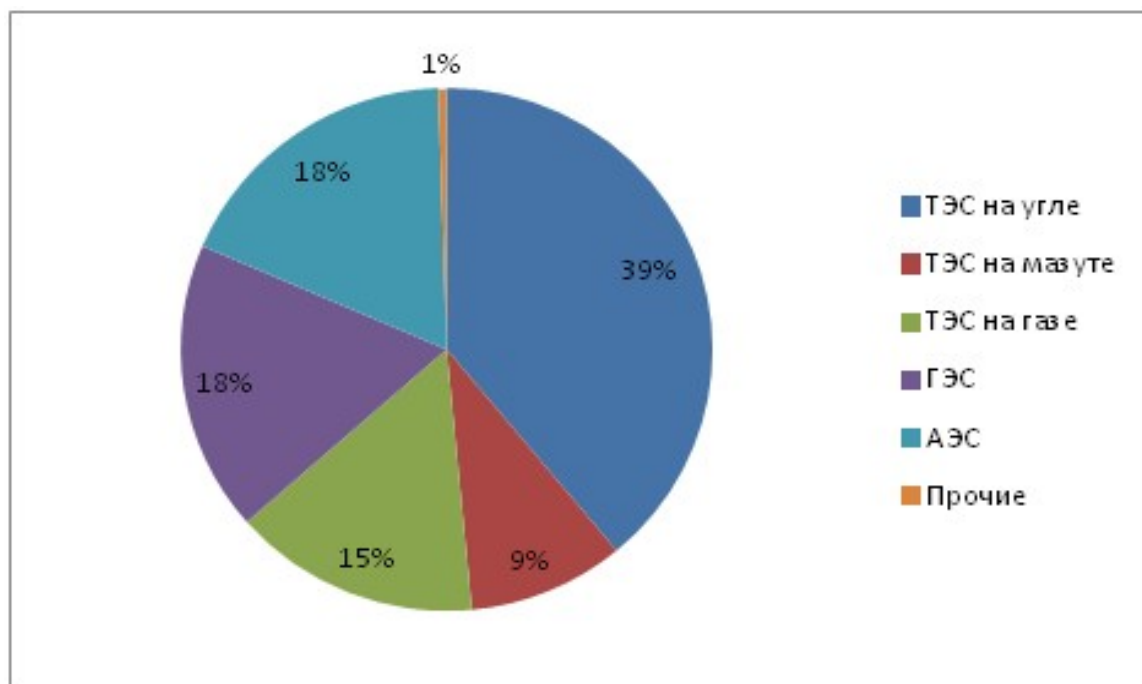


Рис. 2. Структура мирового производства электроэнергии на 2019 год

Таблица 1. Сравнительная оценка

Вещество, тонны.	У голь- ная ТЭЦ	М азут- ная ТЭЦ	Га- зовая ТЭЦ
Углекислый газ	1 0 млн	6 млн	2 млн
Окислы серы	1 24 тыс	84 тыс	нет
Окислы азота	3 4 тыс	22 тыс	24 тыс
Неуловимые золы	7, 3 тыс	1, 3 тыс	нет
Канцерогенные вещества	0, 012	0, 013	нет
Пятиокись ванадия	3 7	55 0	нет
Твердые отходы	8 0 тыс	не т	нет

Анализ проблемы и постановка задачи

В связи с распространением тенденции на использование альтернативных источников электроэнергии, появилась необходимость оценки возможности развития в Республике Крым существующих электростанций на альтернативных источниках энергии. Так как по количеству солнечных дней в году республика занимает лидирующее место в стране, то целесообразно будет рассмотреть именно солнечную энергетику. Крым обладает солнечными электростанциями, современными технологическими гелиоустановками в селах, здравницах, на базах, которые носят экспериментально-научный характер. Еще со времен СССР здесь разрабатывались проекты электростанций, а также объектов энергетики, носящих научный характер. Однако многочисленные программы солнечных станций в том время не получали достаточного финансирования, что привело к замедлению перспектив по развитию солнечной энергетики[3].

Поэтому цель данной статьи – оценить текущее состояние солнечной энергетики в Крыму, а также оценить перспективы ее развития.

Оценка текущего состояния солнечной энергетики в Республике Крым

В данный момент на территории Крыма расположены пять солнечных электростанций [4]. Рассмотрим их более подробно.

«Перово» - солнечная электростанция расположена возле села Ключи, Перовского сельского совета в Крыму. В таблице 2 приведена

краткая информация по данной станции.

Таблица 2. Электростанция Перово

Проектная мощность	105,56 МВт/пик
Технология	поликристаллическая
Количество модулей	455532
Крепление	наземное стационарное
Площадь земельного участка	200 гектар
Сокращение выбросов	107069 тонн CO ₂ в год
Дата завершения проекта	декабрь 2011

«Николаевка» - солнечная электростанция, расположенная в симферопольском районе. В таблице 3 приведена краткая информация по данной станции. В августе 2013 года начались пусконаладочные работы. С 1 августа 2015 года работает в режиме опытной эксплуатации.

Таблица 3. Электростанция Николаевка

Проектная мощность	69,7 МВт/пик
Технология	поликристаллическая
Количество модулей	290048
Крепление	наземное стационарное, четыре ряда
Площадь земельного участка	116 гектар
Сокращение выбросов	72000 тонн CO ₂ в год
Дата завершения проекта	август 2013

«Охотниково» - солнечная электростанция, расположенная возле села Охотниково в Крыму. В таблице 4 приведена краткая информация по данной станции.

«Митяево» - солнечная электростанция, расположенная возле села Митяево в Крыму. В таблице 5 приведена краткая информация по данной станции.

«Родниковое» - солнечная электростанция, расположенная возле села Родниковое в Крыму. В таблице 6 приведена краткая информация по

данной станции.

Таблица 4. *Электростанция Охотниково*

Проектная мощность	82,65 МВт/пик
Технология	поликристаллическая
Количество модулей	355902
Крепление	наземное стационарное
Площадь земельного участка	160 гектар
Сокращение выбросов	83832 тонн CO ₂ в год
Дата завершения проекта	октябрь 2011

Таблица 5. *Электростанция Митяево*

Проектная мощность	31,55 МВт/пик
Технология	поликристаллическая
Количество модулей	134288
Крепление	наземное стационарное
Площадь земельного участка	59 гектар
Сокращение выбросов	32001 тонн CO ₂ в год
Дата завершения проекта	апрель 2012

Таблица 6. *Электростанция Родниковое*

Проектная мощность	7,5 МВт/пик
Технология	поликристаллическая
Количество модулей	30704
Крепление	наземное стационарное
Площадь земельного участка	15 гектар
Сокращение выбросов	7607 тонн CO ₂ в год
Дата завершения проекта	февраль 2011

Электростанция работает на общую энергосистему и обеспечивает близлежащие села: Родниковое, Аркадьевку, Кубанское и Новый Мир.

Общее энергопотребление на полуострове составляет 1000–1100 МВт. Суммарная мощность всех солнечных электростанций составляет 296,96 МВт/пик. Это составляет 27% от общего энергопотребления. Но следует учесть, что на работу солнечных электростанций огромное влияние оказывают погодные условия.

Большая часть производителей гарантирует работу солнечных модулей в течение 25 лет, при этом снижение мощности не будет превышать 20% к концу этого срока. Поэтому на данных станциях существует большой запас времени на эксплуатацию солнечных панелей.

Перспективы развития солнечной энергетики в Республике Крым

Из всех видов альтернативных источников энергии наибольший потенциал имеет именно солнечная энергетика.

Солнечные панели на электростанциях Крыма произведены из полупроводникового кремния высокой очистки. Это значительно увеличивает технологическое использование и адаптацию данных панелей. Также такие станции обладают возможностью наращивания мощностей.

Стоит отметить, что данные станции очень выгодны в эксплуатации. Они легко монтируются и их легко обслуживать. Для этого необходимо малое количество профессионального персонала, в отличие от большинства других типов электростанций. Очень важным является тот факт, что период эксплуатации солнечных панелей составляет 25 лет

Так как Крым является рекреационной зоной, то большое внимание уделяется экологической составляющей при выработке электроэнергии. Наиболее актуален этот вопрос для южного берега Крыма.

Солнечные электростанции не производят никаких выбросов в окружающую среду. Основными негативными последствиями их использования являются затенение и занятие территорий. Республика Крым имеет большое количество неосвоенных земель, которые пригодны для строительства солнечных электростанций.

Так же важное значение имеет географическое расположение крымского полуострова. Важной характеристикой является продолжительность солнечного сияния (рис.3). В течении года солнце светит на южном берегу Крыма 2250 часов, в равнинном Крыму, подгорье и вершинах

гор солнце светит 2280-2470 часов [6].

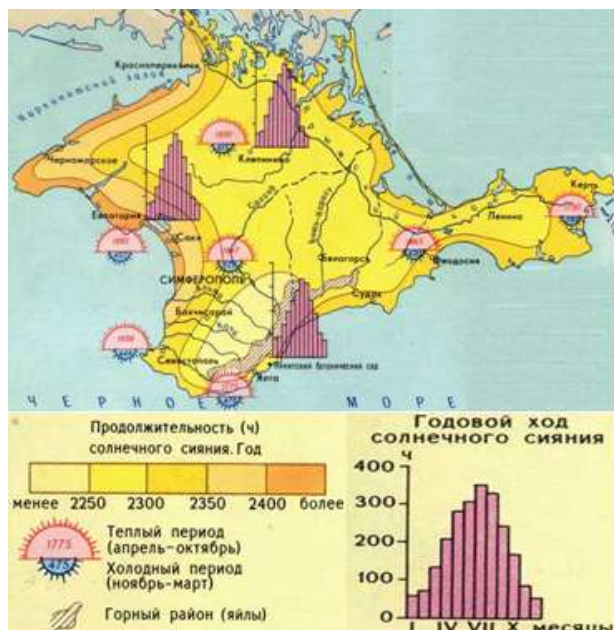


Рис. 3. Солнечное сияние в Республике Крым

От географического расположения зависит количество солнечной энергии, которая приходит на один метр квадратный и может быть в дальнейшем преобразована в электроэнергию (рис. 4).

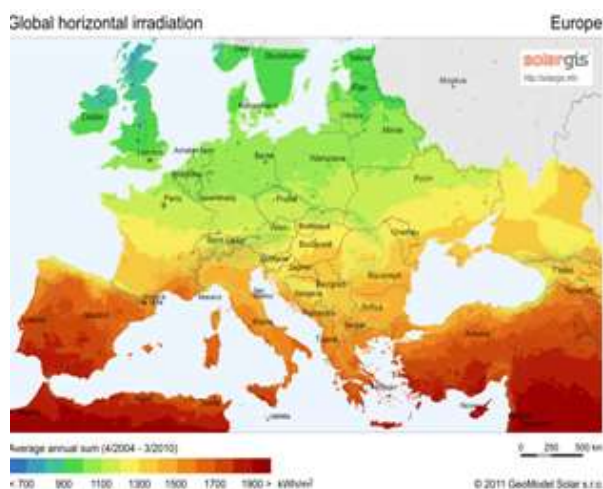


Рис. 4. Распределение солнечной энергии в Европе

Так как сейчас в Российской Федерации идет развитие альтернативной энергетики, то в Крыму можно проводить испытания перспективных разработок в сфере солнечной энергетики, так как для этого есть все необходимые условия.

Большие перспективы имеют частные солнечные электростанции. Их просто устанавли-

вать и обслуживать. Если будут со стороны государства предприняты шаги для развития данного направления, например, кредитования с выгодными условиями, то данное направление разовьется укоренными темпами.

Выводы

Проанализировав предложенную работу, можно сделать следующие основные выводы:

- Республика Крым имеет достаточную инфраструктуру и ресурсы для развития солнечной энергетики, при этом на данный момент используется лишь небольшая часть технического возможного потенциала солнечной энергии, что дает возможность наращивать солнечную генерацию;
- по количеству солнечных дней Крым занимает лидирующее место в стране, что делает его отличной базой, для внедрения новых научных технологий в области солнечной энергетики и создавать экспериментальные площадки для исследований;
- при должной поддержке со стороны государства, можно достичь большого прогресса в развитии частных солнечных электростанций, при этом солнечные панели на действующих солнечных электростанциях вскоре исчерпают свой гарантированный срок эксплуатации в среднем на 30%, что создает возможность использовать финансовые средства инвесторов из других регионов;
- общая генерируемая мощность солнечных электростанций Крыма составляет 296,96 МВт/пик, при общем энергопотреблении 1000-1100 МВт, что дает большие перспективы для увеличения генерируемой мощности, солнечные электростанции просты в монтаже и обслуживании, а также имеют возможность быстрого наращивания количества установленных солнечных панелей;
- солнечная энергетика является экологически чистой, что очень важно для Республики Крым, так как она является рекреационной зоной.

Список литературы

1. Energetika [Электронный ресурс]: Статический Ежегодник мировой энергетики 2019. – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://yearbook.enerdata.ru/electricity/world-electricity-production-statistics.html>. – Загл. с экрана.
2. TutorOnline [Электронный ресурс]: Электроэнергетика. Экологический аспект. –

Электрон. дан. – Режим доступа: <https://yearbook.enerdata.ru/electricity/world-electricity-production-statistics.html>. - Загл. с экрана.

3. Виссарионова В.И. Солнечная энергетика. Учебное пособие. Методические рекомендации. –М.: МЭИ, 2008. – 276 с.
4. activ solar [Электронный ресурс]: Реализованные PV проекты – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20161129052815/http://www.activsolar.com/ru/products/pvprojects/реализованные-проекты>. - Загл. с экрана.
5. Дьяков А.Ф. Малая энергетика России: проблемы и перспективы. - М.: «Энергопрогресс: энергетика», 2003. - 128 с.
6. Crimea.ru [Электронный ресурс]: Климат. – Электрон. дан. – Режим доступа: http://www.crimea.ru/item_info_big.htm?id=1168 - Загл. с экрана.

References

1. Energetika [Electronic resource]: static Yearbook of world energy 2019. - Electron. den. - access Mode: <https://yearbook.enerdata.ru/electricity/world-electricity-production-statistics.html> - an empty space on the screen.
2. TutorOnline [Electronic resource]: electric power industry. Ecological aspect. - Electron. Dan. – Access mode: <https://yearbook.enerdata.ru/electricity/world-electricity-production-statistics.html> - an empty space on the screen”.
3. Vissarionov V. I. solar energy. Textbook. Methodological recommendations. - Moscow: MEI, 2008. - 276 P.
4. Activ solar [Electronic resource]: implemented photovoltaic projects-Electron. Dan. -DOS-tup mode: <https://web.archive.org/web/20161129052815/http://www.activsolar.com/ru/products/pvprojects/реализованные-проекты> - an empty space on the screen.
5. Dyakov A. F. Malaya Energetika Rossii: Problemy I perspektivy-M.: "Energoprogress: Energetika", 2003, 128 P.
6. Crimea.ru [Electronic resource]: climate. - Electron. Dan. - Access mode: http://www.crimea.ru/item_info_big.htm?id=1168 -an empty space on the screen

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 620.92

Использование гелиоустановок для сушки биомассы в процессе получения синтез-газа

В.М. Зайченко¹, И.Г. Жиганов², В.В. Кувшинов³, Е.Г. Какушина⁴, М.Р. Найдук⁵

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412, Россия, ¹zaitch@oivtran.ru
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ²jiganov@mail.ru, ³kuvshinov.vladimir@gmail.com, ⁴littie@mail.ru,
⁵MRNaydukk@sevsu.ru

Статья поступила 15.06.2020 г.; после доработки 24.06.2020 г.

Аннотация

Авторами работы предложено совмещать биогазовую систему с тепловой солнечной установкой, используемой для предварительной обработки (сушки) преобразовываемой в синтез-газ биомассы. Для работы такой системы используются отходы сельскохозяйственной и деревообрабатывающей промышленности, которые могут быть преобразованы в пиролизный газ.

Ключевые слова: биоэнергетика, синтез-газ, солнечная установка, воздействие на окружающую среду, газообразные продукты, процесс термической обработки различных видов сырья, комбинированная солнечно-биоэнергетическая установка.

Use of solar installations for drying biomass in the process of synthesis gas production

V. M. Zaychenko¹, I. G. Zhiganov², V.V. Kuvshinov³, E.G. Kakyshina⁴, M.R. Nayduk⁵

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (OIVT RAS),
Moscow, 125412, Russia, ¹zaitch@oivtran.ru
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
¹kuvshinov, ²jiganov@mail.ru, ³kuvshinov.vladimir@gmail.com, ⁴littie@mail.ru, ⁵MRNaydukk@sevsu.ru

Received 15.06.2020 y.; received in final form 24.06.2020 y.

Abstract

The authors of the work proposed to combine a biogas system with a thermal solar installation used for pre-treatment (drying) of biomass converted to synthesis gas. This system uses waste from the agricultural and woodworking industries, which can be converted into pyrolysis gas.

Keywords: bioenergy, synthesis gas, solar installation, environmental impact, gaseous products, heat treatment of various types of raw materials, combined solar-bioenergy installation.

Введение

В современном мире одним из перспективных направлений развития энергетики является

использование биомассы в качестве топлива. Применение местных энергетических ресурсов с экономической точки зрения более выгодно, чем использование привозных ископаемых видов

топлива. Целесообразным способом использования различных видов биомассы для энергетических целей является переработка исходного сырья в энергетический высококалорийный газ, а затем его использование в качестве топлива [1].

Сложившаяся ситуация заставляет искать решения внедрения новых технологий. Существует несколько способов преобразования органического материала в топливный газ [2]. Пиролиз является одним из эффективных методов термохимической переработки биомассы и позволяет получать твердое, жидкое и газообразное топливо практически из любого сырья, содержащего органические компоненты. Процесс пиролиза заключается в нагревании углеводородного сырья в бескислородной среде и сопровождается деструкцией высокомолекулярных соединений с образованием неконденсируемых газов (H_2 , CO , C_nH_m , CO_2 , N_2) и летучих, представляющих собой парообразную смесь пирогенетической воды, смол и различных кислот. Технология пиролиза позволяет получать газообразные, твердые и жидкие продукты. Увеличение степени конверсии сырья в газ может быть достигнуто благодаря высокотемпературной термической обработке жидкой фракции [3,5].

В литературных источниках описана технология термохимической переработки органического материала, заключающаяся в двух стадийной пиролизической конверсии биомассы в синтез-газ. Преимущество этой технологии заключается в высокой степени конверсии обрабатываемого сырья и отсутствии жидкой фракции в получаемом газе [6]. Технология включает две стадии переработки. Первая стадия основана на пиролизе биомассы, вторая заключается в высокотемпературном превращении парообразных продуктов пиролиза на поверхности пористого древесного угля в синтез-газ. Исследования проводились в соответствии с данной технологией. При этом для переработки биомассы таким способом на нагрев и переработку тратится большое количество энергии, которую получают используя традиционные виды топлив. Авторами работы предложено для предварительной обработки (сушки) преобразовываемой в синтез-газ биомассы использовать солнечную энергию, т.е. совмещать биогазовую систему с тепловой солнечной установкой, представленной плоским солнечным коллектором [7].

Для получения синтез-газа из различных видов биомассы были отобраны образцы материалов двух видов: отходы целлюлозно-бумажного производства, а именно опил, кора и скоп, а

также отходы сельскохозяйственного производства, такие как багасса и пергаментная оболочка кофейных зерен (далее шелуха). Эти виды отходов содержат органические вещества и при эффективной переработке могут служить источником для производства синтез-газа [4].

Проблема утилизации органических отходов очень важна с точки зрения охраны окружающей среды. Сельскохозяйственная, деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность формируют значительное количество отходов, которые складываются, занимая большие площади и отрицательно воздействуя на окружающую среду [5].

Целлюлозно-бумажное производство, являясь отраслью лесной промышленности, включает в себя заготовку древесины, различные виды механической обработки и химической переработки. Опил образуется как при лесопильных, так и при деревообрабатывающих процессах, в результате распиловки древесины на пильной установке. Объемы снимаемой с бревен коры всегда значительны, поскольку окорка древесины – обязательный процесс её обработки перед дальнейшим использованием. Скоп образуется в цехе очистки промышленных стоков в результате обезвоживания осадка, образованного в процессе отстаивания сточных вод целлюлозно-бумажного комбината в первичных отстойниках [8].

Среди сельскохозяйственных отходов в качестве исследуемого сырья выделены тростниковая багасса и пергаментная шелуха кофе, поскольку они производятся в больших масштабах. Производство кофейных зерен занимает важное место в мировой экономике, поскольку кофе является одним из самых распространенных продуктов питания, а также одним из главных экспортных товаров. Крупнейшими странами-производителями кофе являются Бразилия, Колумбия, Вьетнам. При обработке кофейных зерен образуются значимые объемы отходов. Собранные кофейные плоды очищаются от внешней мягкой оболочки с помощью сухой или влажной обработки. Оставшиеся пергаментные оболочки удаляются методом лущения. Образующаяся шелуха была отобрана в качестве материала для исследования [10].

Одной из важных задач является утилизация отходов, образующихся в сахарной промышленности. Лидерами по производству сахарного тростника являются Бразилия, Индия и КНР. При выработке одной тонны сахара-сырца образуется свыше тонны побочного продукта-ба-

гассы. Багасса является целлюлозным материалом, волокнистой частью сахарного тростника, остающейся после его прессования и извлечения сока [3].

Описание характеристик исследуемого материала и лабораторной установки

В таблице 1 приведены характеристики исследуемых материалов в пересчете на сухое состояние: элементный состав, зольность и теплота сгорания. Элементный состав определялся с использованием элементного анализатора Vario Macro Cube. Влажность и зольность определялись с помощью термогравиметрического анализа (ТГА) с использованием термоанализатора SDT Q600/

Примечание: Q_Н – низшая теплота сгорания, МДж/кг, Q_В – высшая теплота сгорания, МДж/кг.

Экспериментальные данные получены на лабораторной установке, аналогичной описанной в работе [11]. На рис.1. изображена схема установки, которая включает реактор с двумя чашами, конденсатор, систему отвода и анализа газообразных продуктов, образующихся в результате двухстадийной пиролитической конверсии исходного сырья.

Реактор в виде стальной трубы с внутренним диаметром 37 мм и длиной 1000 мм помещался в двухсекционную печь, оборудованную двумя автономными нагревателями.

Исходное сырье находилось в нижней части реактора. Биомасса была предварительно высушена при температуре 103 ± 2 °С, при этом для предварительной сушки предложено использовать экспериментальную солнечную установку, схема приёмной поверхности которой, используемой для нагрева представлена на рис. 2. Влажность образцов перед экспериментом составляла 1-2 %. Пористый древесный уголь помещался в верхнюю часть реактора [9]. Перед экспериментом верхняя часть реактора нагревалась до температуры 1000°С, которая удерживалась далее на постоянном уровне. После этого нижнюю часть реактора нагревали до температуры 960°С. Темп нагрева составлял 7°С/мин.

Газообразные и парообразные продукты, образующиеся в процессе пиролиза, проходили через пористую углеродную среду с фиксированной температурой и поступали в конденсатор. В результате гомогенных и гетерогенных химических реакций в высокотемпературной зоне пиро-

лизные газы разлагались. Объём неконденсируемых газов измерялся эвдиометрическим методом. Состав собранного газа определялся с помощью анализатора газа MRU Vario Plus Industrial. На основе экспериментальных данных был произведен расчет теплотворной способности газовой смеси.

Таблица 1. Характеристики исследуемых материалов

Материал	Элементный состав, %					Зольность, %	Теплота сгорания, МДж/кг	
	N	C	H	S	O		Q _Н	Q _В
Опил	0.09	51.14	6.14	0.87	41.22	0.54	19.26	20.66
Кора	0.04	72.18	9.94	0.00	17.35	0.49	32.81	35.06
Скоп	0.08	46.45	5.86	0.46	36.44	11.7	17.86	19.19
Шелуха	0.35	49.48	6.34	0.04	41.69	2.10	18.76	20.20
Багасса	0.46	43.55	5.25	0.09	48.79	1.86	14.86	16.04

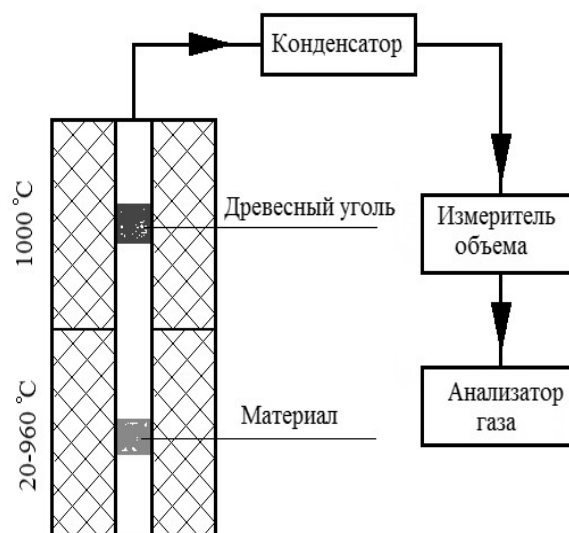


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

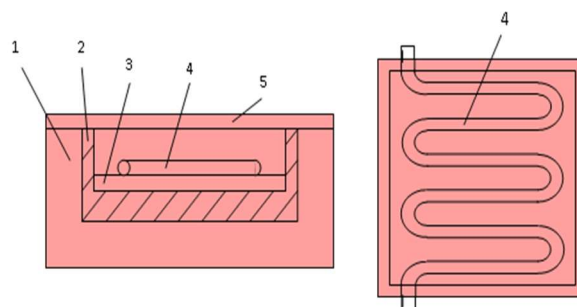


Рис. 2. Плоский солнечный коллектор (змеевиковый тип): 1– корпус; 2– изоляция; 3– абсорбер; 4– трубная система; 5– прозрачное покрытие.

Результаты исследований

В таблице 2 приведены характеристики газовой смеси, полученной путем двухстадийной пиролитической конверсии сырья, такие как процентное содержание горючих компонентов, удельный объемный выход газа и теплотворная способность.

Примечание: Q_H – низшая теплота сгорания, МДж/кг, Q_B – высшая теплота сгорания, МДж/кг. Газовая смесь, полученная этим методом, состоит из водорода и монооксида углерода – 96-99%. Экспериментальные данные показывают влияние выбора сырья на состав и объем газовых смесей. Результаты измерений для опила совпадают с ранее проведенными аналогичными измерениями для древесных пеллет.

На рис.3 показана степень энергетической конверсии для исследуемых материалов, определенная как отношение высшей теплоты сгорания синтез-газа, полученного из 1 кг рабочей массы исходного сырья, к высшей теплоте сгорания рабочей массы исходного сырья.

Можно отметить, что степень энергетической конверсии варьируется в пределах от 0,5 до 1,0 в зависимости от вида исходного материала.

Наибольший выход газа на один килограмм был получен в результате термохимической переработки коры. Синтез-газ состоит из водорода и монооксида углерода для испытуемых образцов, за исключением коры, в практически в равных частях. Для коры отношение объемного содержания водорода и монооксида углерода является наибольшим из всех исследуемых образцов.

Как было показано выше (рис. 2) для предварительной термической обработки биомассы использовалась солнечная тепловая установка. Эта система состоит из плоского гелиоколлектора, абсорбер которого имеет змеевиковую трубную систему. Такая конструкция позволяет преобразовывать поток солнечной радиации в тепловую энергию, получая довольно высокие температуры нагрева (табл.3). Для сушки биомассы в конструкции, приведенной на схеме на рис. 1, используемые температуры составляют до 101-103 °C.

Среднее значение коэффициента тепловых потерь за время работы установки с 11.00 до 15.00 (при относительно равномерном нагреве абсорбера) составляет.

Определенные экспериментально значения находятся в пределах среднестатистических значений коэффициента тепловых потерь для одно стекольных плоских солнечных коллекторов =6,0 – 8,0 Вт/м² К.

Таблица 1. Характеристики газовой смеси

Материал	Содержание горючих газов, %			Теплота сгорания, МДж/м ³		Удельный объемный выход газа, м ³ /кг
	H ₂	CO	CH ₄	Q _H	Q _B	
Опил	49.58	49.22	0.42	10.92	11.84	1.27
Кора	71.49	25.25	3.09	11.19	12.61	1.48
Скоп	52.63	46.46	0.40	10.90	11.87	1.23
Шелуха	48.47	50.25	0.25	10.87	11.77	1.29
Багасса	47.22	51.68	0.26	10.92	11.79	1.29

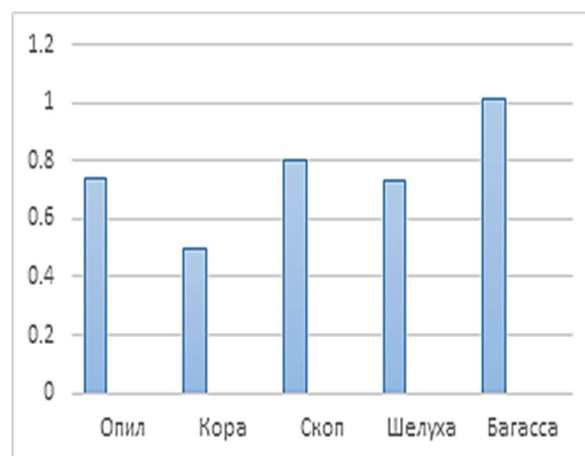


Рис. 3. Степень энергетической конверсии при пиролитической переработке различных видов биомассы.

В таблице 3 приведены данные экспериментальных режимов при нулевой циркуляции теплоносителя и соответствующие значения коэффициентов тепловых потерь U_L и максимальной равновесной температуры абсорбера t_m .

Таблица 3. Экспериментальные данные режима нулевой циркуляции.

Параметры	Время суток					
	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00
t_m (°C)	35	78	92	105	109	102
t_a (°C)	20	21	22	23	23	22
$I=I_S R_S + I_d$ (Вт/м ²)	596	651,8	766,5	766,5	651,8	596,2
$(\tau\alpha)$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
U_L (Вт/м ² К)	29,3	8,57	8,21	7,01	6,68	5,58

	(разогрев)					
--	------------	--	--	--	--	--

Выводы

Образование отходов – неотъемлемая характеристика лесного и сельскохозяйственного производства, а утилизация отходов является серьезной проблемой. Использование технологии двухэтапной пиролизической конверсии биомассы в газообразное топливо позволяет получать синтез-газ из отходов деревообрабатывающей, кофейной и сахарной промышленности. Удельный выход газа, его теплотворная способность, а также соотношение между объёмным содержанием водорода и монооксида углерода меняются в зависимости от вида исходного сырья. Такой метод может рассматриваться как перспективный метод утилизации такого вида отходов.

Использование в биоэнергетической установке плоского солнечного коллектора позволяет использовать для нагрева и сушки биомассы солнечную энергию. При этом происходит экономия традиционного топлива и замена его возобновляемой энергией.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 33 «Углеродная энергетика: химические аспекты».

Список литературы

1. Батенин В. М. Пиролизическая конверсия биомассы в газообразное топливо // В. М. Зайченко, В. Ф. Косов, В. А. Синельщиков // Доклады академии наук. 2012. Том 446, № 2, С. 179 – 182.
2. Лавренов В. А. Двухстадийная пиролизическая конверсия различных видов биомассы в синтез-газ. / О. М. Ларина, В. А. Синельщиков, Г. А. Сычев // Теплофизика высоких температур. 2016. Том 54, № 6, С. 950 – 956.
3. Кувшинов В. В. Биогазовые технологии в сельском хозяйстве. Проблемы и перспективы развития в республике Крым. / И. Г. Жиганов, В. В. Смирнов, А. А. Важеннин, Э. Л. Хайбулаев // В сборнике. международной научно-практической конференции - Экологическая промышленная и энергетическая безопасность '09. 2018. С. 637-642.
4. Гурьев В. В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики Крым и г. Севастополя. / Е. Г. Какушина, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // Энергетические установки и технологии. 2019. Том 5, № 2, С. 90-93.
5. Жиганов И. Г. Комбинированная солнечно-био-

- энергетическая установка для сельского хозяйства республики Крым. / В. В. Кувшинов, А. А. Ненько, Д. С. Здарьев // Энергетические установки и технологии. 2019. Том 5, № 2, С. 94-98.
6. Кувшинов В. В. Использование солнечных электростанций для обеспечения энергетической безопасности Крымского региона. / Ф. М. Аль-Руфаи и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том 55, № 4, С. 252–255.
7. Кувшинов В. В. Система хранения для солнечных станций. / Коломийченко В. П., Какушина Е. Г. и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том 55, № 3, С. 153–158.
8. Кувшинов В. В. Исследование характеристик фотоэлектрической решетки с изменением поверхностной освещенности решетки. / Абдали Л. М., Какушина, Е. Г., Крит, Б. Л., Морозова, Н. В., Кувшинов В. В. // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том 55, № 4, С. 223–228.
9. Вологдин С. В. Анализ различных сценариев энергоснабжения Крыма с учетом режимов работы солнечной электростанции. / Якимович Б. А., Кувшинов В. В., Абдали Л. М., Какушина, Е. Г. и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том 55, № 4, С. 229–234.
10. Гурьев В. В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики Крым и г. Севастополя / Какушина Е. Г., Якимович Б. А., Кувшинов В. В. // Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 90-93.
11. Зайченко В. М. Направления развития энергетики. / Чернявский А. А., Кувшинов В. В., Какушина Е. Г., Абейдулин С. А. // Энергетические установки и технологии. 2019 - Т. 5. № 3. С. 53-61.

References

1. Batenin V. M. Pyrolytic conversion of bio-mass into gaseous fuel // V. M. Zaichenko, V. F. Kosov, V. A. sinelschikov // Reports of the Academy of Sciences. 2012. Volume 446, No. 2, pp. 179-182.
2. Lavrenov V. A. two-Stage pyrolytic conversion of various types of biomass into synthesis gas. / O. M. Larina, V. A. sinelschikov, G. A. Sychev // Thermophysics of high temperatures. 2016. Volume 54, No. 6, pp. 950-956.
3. Kuvshinov V. V. Biogas technologies in agriculture. Problems and prospects of development in the Republic of Crimea / I. G. Zhiganov, V. V. Smirnov, A. A. Vazhenin, E. L. Khaibulaev // In the collection. international scientific and practical conference-Environmental industrial and energy security ' 09. 2018. p. 637-642.
4. Guryev V. V. Development of renewable sources of electricity in the power system of the Republic of Crimea and Sevastopol. / E. G. Chekushina, B. A. Yakimovich, V. Kuvshinov // Energy installations and technologies. 2019. Volume 5, No. 2, pp. 90-93.
5. Zhiganov I. G. Combined solar-bioenergetic installation for rural housing of the Republic of Crimea. /

- V. V. Kuvshinova, A. A. Nenko, D. S. Zdariev// Energy installations and technologies. 2019. Volume 5, No. 2, pp. 94-98.
6. Kuvshinov V.V. The use of solar power plants to ensure energy security of the Crimean region. / F.M. Al-Rufai and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, No. 4, pp. 252–255.
 7. Kuvshinov V.V. Storage system for solar stations. / Kolomiychenko V.P., Kakushina E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, No. 3, pp. 153–158.
 8. Kuvshinov V.V. Study of the characteristics of the photoelectric grating with a change in the surface illumination of the grating. / AbdAli L. M., Kakushina, E. G., Crete, B. L., Morozova, N.V., Kuvshinova V.V.// Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, No. 4, pp. 223–228.
 9. Vologdin S.V. Analysis of various scenarios of Crimea's energy supply, taking into account the operating modes of the solar power station. / Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., AbdAli L.M., Kakushina, E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume 55, No. 4, pp. 229–234.
 10. Guryev V.V. Development of renewable energy sources in the energy system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol / Kakushina E.G., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V.// Power plants and technologies - 2019.V. 5. No. 2. pp. 90-93.
 11. Zaichenko V.M. Directions of energy development. / Chernyavsky A.A., Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Abeydulin S.A.// Power plants and technologies. 2019 - T. 5. No. 3. pp. 53-61.

УДК 539.374

Основы технической теории упругопластичного изгиба балок, выполненных из материалов, по-разному реагирующих на растяжение и сжатие

Корнеева Н.К.¹, Пичугова Л.Н.², Скрыбина Е.В.³, Глушкова Е.В.⁴, Ядров А.В.⁵ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, korneeva_nk@mail.ru, kebpf2015@mail.ru, skryabina_ev@mail.ru, glusev@mail.ru, artyadrov@mail.ru

Статья поступила 14.07.2020 г.; после доработки 17.07.2020 г.

Аннотация

Конструкционные материалы предназначены для обеспечения достаточной механической прочности, конструктивной компоновки и физико-химической защиты основных узлов реактора и АЭС в целом. Поэтому вопросы радиационной стойкости конструкционных материалов занимают все большее значение при производстве реакторов. Действие интенсивного радиационного облучения на конструкционные материалы приводит к структурным превращениям, оказывающие отрицательное влияние в первую очередь на механические свойства и коррозионную стойкость и как следствие, к различной реакции на растягивающие и сжимающие нагрузки. Этот эффект можно свести к явлению «разномодульности» материалов. В статье обобщены известные классические результаты Эйлера и Бернулли для изгибаемых балочных элементов в упругой и упругопластической постановке на случай упомянутой разномодульности.

Ключевые слова: конструкционные материалы, изгиб, растяжение и сжатие, реактор, разномодульность материалов, теория Эйлера и Бернулли.

Fundamentals of the technical theory of elastic plastic bending of beams made of materials that react differently to tension and compression

Korneeva N.K.¹, Pichugova L.N.², Skryabina E.V.³, Glushkova E.V.⁴, Yadrov A.V.⁵Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, korneeva_nk@mail.ru, kebpf2015@mail.ru, skryabina_ev@mail.ru, glusev@mail.ru, artyadrov@mail.ru

Received 14.07.2020 y.; received in final form 17.07.2020 y.

Abstract

Structural materials are designed to provide sufficient mechanical strength, structural layout and physical and chemical protection of the main units of the reactor and the NPP as a whole. Therefore, the issues of radiation resistance of structural materials are of increasing importance in the production of reactors. The effect of intense radiation exposure on structural materials leads to structural transformations that have a negative impact primarily on mechanical properties and corrosion resistance, and as a result, to various reactions to tensile and compressive loads. This effect can be reduced to the phenomenon of "heterogeneity" of materials. The article summarizes the well-known classical results of Euler and Bernoulli for bent beam elements in elastic and elastic-plastic formulation for the case of the mentioned heterogeneity.

Keywords: structural materials, bending, stretching and compression, reactor, materials heterogeneity, Euler and Bernoulli theory.

Введение

В последнее время заметно усилился интерес к материалам, различно сопротивляющимся

растяжению и сжатию (условно будем их называть «разномодульными»). К таковым относятся

все хрупкие материалы: многие высоколегированные стали и сплавы, чугуны, керамика, бетоны, горные породы, термореактивные пластмассы и композиты на их основе, а также ряд пластичных материалов: продукция порошковой металлургии, некоторые термопласты, грунты и т.п. Более того, с различием диаграмм при растяжении и сжатии приходится считаться даже для малоуглеродистых сталей в следующих трех случаях:

1. Имеют место трещины нормального отрыва, не чувствительные к сжатию;
2. Деформирование является повторно-переменным упругопластическим, когда проявляется эффект Баушингера.

Суть эффекта Баушингера (назван по фамилии И. Баушингера, обнаруживший его в процессе исследования каменной соли) заключается в самом уменьшении сопротивления кристаллического материала пластической деформации после предварительной малой пластической деформации противоположного знака. Эффект Баушингера - проявление неупругости материала в зоне перехода к упругим пластическим деформациям.

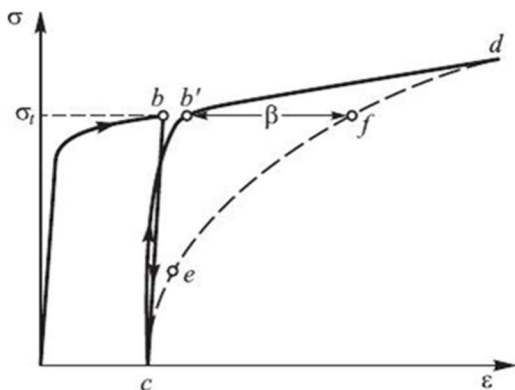


Рис. 1. Кривая деформации

Кривая деформации на рисунке показывает предварительное нагружение (например, растяжение) образца до небольших значений пластической деформации и дальнейшую разгрузку. В случае повторного нагружения в противоположном направлении (сжатии), в результате эффекта Баушингера, материал деформируется легче, нежели бы он деформировался в ходе нагружения того же направления, что и предыдущее.

Эффект наблюдается при небольших значениях предварительной деформации (до 1%) и уменьшается вследствие увеличения её величины.

3. При потере устойчивости, на что еще в

начале этого века обращал внимание Карман.

К сказанному добавим, что облучение конструкционных сталей также провоцирует у них эффект разномодульности, не учитываемый в настоящее время в расчетах на прочность.

Однако конструкционные материалы в ходе облучения подвергаются структурным превращениям, которые оказывают негативное влияние в первую очередь на механические свойства и коррозионную стойкость. Нейтронное облучение имеет самое сильное влияние по сравнению с другими видами облучения.

На рисунке 2 показан образец радиационных повреждений, которые возникают в процессе соударения нейтронов высоких энергий с атомами кристаллической решетки.

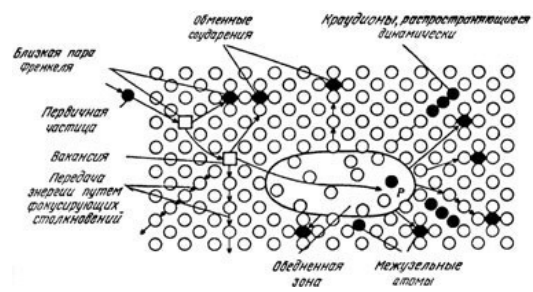


Рис. 2. Образец радиационных повреждений конструкционного материала.

Модель радиационных повреждений, которые возникают в процессе соударения нейтронов с атомами кристаллической решетки (модель Зеегера)

При структурных изменениях происходят изменения механических свойств. В итоге, если температура ниже температуры рекристаллизации – облучение низкой температуры – металл упрочняется, но лишается вязкости и пластичности.

В процессе облучения очень быстро падает коррозионная стойкость металлов, а также сплавов. Вода с водяным паром представляют собой теплоносители в водном и водопаровом трактах АЭС. В результате радиолитического изменения состава электролита, то есть идет разрушение молекул воды с формированием ионов и атомов кислорода, водорода и щелочных гидроксид-ионов OH^- . Конструкционные реакторные материалы, которые подвергаются облучению, работают вместе с водой и паром. Образовавшийся кислород окисляет металл, а водород его наводороживает, чем в дополнение охрупчивает. Благодаря радиолитическому разложению воды и увеличению концентра-

ции гидроксид-ионов растворяются поверхностные оксидные пленки, которые в обычных условиях защищают металл от коррозии.

Постановка задачи

Задачей данной работы заключается в получении практически удобных расчетных формул технической теории упругопластического изгиба балочных элементов в случае разномодульных материалов, обобщая классические результаты Эйлера и Бернулли для упругих сред с одинаковой реакцией на растяжение и сжатие.

Решение задачи

1. Обозначим символами E^+ и E^- секущие модули упругости для случаев растяжения и сжатия. Как и при классических подходах, вводим традиционные допущения:

- справедлива гипотеза плоских сечений, основное предположение гипотезы которой заключается в том, что деформации стержня имеют одинаковый характер, как внутри, так и на поверхности. Значит, сечения, плоские и нормальные к оси стержня до деформации, остаются такими же плоскими и нормальными к его оси и после деформации. Это и есть смысл гипотезы плоских сечений;
- поперечные волокна не давят друг на друга;
- след плоскости действия внешних сил является осью симметрии сечения.

Опуская громоздкие выкладки, приводим имеющийся традиционный вид (1), итоговое условие разрушения растянутых волокон балки, выполненной из разномодульного материала:

$$\sigma_{\max}^+ = \frac{M_x^{\max}}{W_x^*} = \sigma_b^+, \quad (1)$$

где σ_b^+ - предел прочности при растяжении (в случае сжатия соответствующая характеристика будет σ_b^-);

x - нейтральная ось сечения, не совпадающая с главной центральной осью сечения, которую обозначим через x_0 ;

M_x - изгибающий момент, действующий относительно оси x ;

W_x^* - модифицированный (или приведенный) момент сопротивления изгибу, уже завися-

щий в отличие от классической теории, от степени разномодульности:

$$\xi = \frac{E^+}{E^-}.$$

Величина W_x^* для прямоугольного сечения размерами $h \times b$ определяется так:

$$W_x^* = \frac{y_1 b h^2}{6},$$

$$y_1 = \frac{2}{(1 + \sqrt{\xi})}. \quad (2)$$

В случае трубчатого сечения аналогично находим:

$$W_x = y_2 \frac{\pi R^3}{4} (1 - \alpha^4),$$

$$y_2 = \frac{(1 + \xi)^2 - \beta(1 - \xi)^2}{2\xi(1 - \xi)(1 + \frac{e}{R})}, \quad (3)$$

$$e_2 = x - x_0 = \frac{4 R (1 + \xi)}{3 \pi (1 - \xi)} \left(1 + \frac{\alpha^2}{1 + \alpha}\right),$$

$$\alpha = \frac{r}{R}.$$

Здесь внутренний и наружный радиусы трубы, обозначены через эксцентриситеты. Формулы получены при допущении

$$\left(\frac{e_2}{R}\right)^2 \ll 1.$$

2. Закон Гука при изгибе балок, выполненных из разномодульных сред, также удалось привести к классическому виду:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_x}{E^* I_{x_0}},$$

$$E^* = \frac{1}{I_{x_0}} (E^+ I_x^+ + E^- I_x^-), \quad (4)$$

где ρ - радиус кривизны нейтрального слоя;

I_{x_0} - момент инерции сечения относительно оси x_0 ;

E^* модифицированный модуль упругости (или модуль Кармана);

Величины I_x^+, I_x^- , имеющие размерность

момента инерции, для прямоугольного и трубчатого сечения таковы:

$$I_x^\pm = \frac{b(\frac{h}{2} \pm e_1)^3}{3},$$

$$e_1 = \frac{0,5h(1 - \sqrt{\xi})}{(1 + \sqrt{\xi})}, \quad (5)$$

$$I_x^\pm = \frac{\pi R^4}{\gamma} (1 - \alpha^4) \pm 1,5e_2 R^3 (1 - \alpha^3). \quad (6)$$

3. В привычной записи получена также и итоговая формула, позволяющая найти предельное значение для изгибающего момента $\overline{M}_x$ вызывающего наличие бесконечно больших пластических деформаций как в растянутой, так и в сжатой зоне опасного сечения:

$$\overline{M}_x = \sigma_T^+ \overline{W}_x^*.$$

Здесь σ_T^+ – предел текучести при растяжении;

$\overline{W}_x^*$ – пластический момент сопротивления изгибу в случае разномодульной среды. Для прямоугольного и кольцевого сечений его значения таковы:

$$\overline{W}_x^* = \frac{\delta_1 b h^2}{4},$$

$$\sigma_1 = \frac{2}{(1 + \sqrt{\xi})}, \quad (7)$$

$$\overline{W}_x^* = \frac{\delta_2 4R^3 (1 - \alpha^3)}{3},$$

$$\delta_2 = \frac{(1 + \sqrt{\xi})}{(1 + \xi)}. \quad (8)$$

Формулы получены при допущении

$$\sqrt{\xi} = \frac{\sigma_T^+}{\sigma_T^-}.$$

Заключение

Если балочный элемент выполнен из разномодульного материала, имеющего отличающиеся между собой диаграммы растяжения и сжатия, то его упругое сопротивление чистому и поперечному изгибу следует оценивать по формулам традиционного вида (1) и (4). Однако при этом необходимо пользоваться такими модифицированными величинами, как приведенный момент сопротивления $\overline{W}_x^*$ и модуль Кармана E^* .

Эти характеристики удалось определить для

прямоугольного и трубчатых сечений (формулы (2),(3),(5),(6)) если же распространить концепцию разномодульности на идеальные упругопластические среды, то предельную грузоподъемность изгибаемых балочных элементов следует находить по формулам (7),(8).

Список литературы

1. Амбарцумян С. А. Разномодульная теория упругости. М.: Наука. 1982. 317 с.
2. Амбарцумян С. А., Хачатрян А. А. Основные уравнения теории упругости для материалов, разносопротивляющихся растяжению и сжатию // Инж. журнал МТТ. 1966. № 2.
3. Быков Д. Л. О некоторых соотношениях между инвариантами напряжений и деформаций в физически-нелинейных средах // В кн.: Упругость и неупругость. Вып. 2. М.: Изд-во МГУ. 1971. С. 114-128.
4. Москвитин В.В. Циклическое нагружение элементов конструкций. М.: Наука. 1988 г. – 344 с
5. Тюмис Ю.М., Азматов Х.Х. Математическое моделирование технического деформирования. Известия МГТУ «МАМИ» №2 (12), 2011, 195-201 с.
6. Черепанов Г. П. О распространении трещин в сплошной среде // Прикладная математика и механика. Т. 31. № 3. 1967. Б.Б.Шапиро Г. С. О деформациях тел, обладающих различным сопротивлением растяжению и сжатию // Инж. журнал МТТ. 1966. №2.
7. Hutchinson J. W. Plastic stress and strain fields at crack tip // J. Mech. and Phys. Solids. 1968. V. 16. № 5. P. 337 - 347. 60. Irwin G. R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack transversing a plate I // J. Appl. Mech. 1957. V. 24. № 3. P. 361 -364. 61. Jones R. M., Nelson D. A. R. Material models for non-linear deformation of graphite // AIAA Journal. 1976. Vol. 14. № 6. b2. Jones R. M., Nelson D. A. R. Theoretical-experimental correlation of material models for non-linear deformation of graphite // AIAA Journal. 1976. Vol. 14. № 10. (Рус. перев.: Ракетная техника и космонавтика. 1976. № 10.)

References

1. Ambartsumyan S. A. Raznomodulnaya theory of elasticity. Moscow: Nauka, 1982. 317 p.
2. Ambartsumyan S. A., Khachatryan A. A. Basic equations of the theory of elasticity for materials that are resistant to stretching and compression // Inzh. Zhurnal MTT. 1966. no. 2.
3. Bykov D. L. on some relations between stress and strain invariants in physically nonlinear media // In: Elasticity and inelasticity, Vol. 2. Moscow: MSU

- Publishing house, 1971, Pp. 114-128.
4. Moskvitin V. V. Cyclical loading of structural elements. Moscow: Nauka, 1988-344 s.
 5. Temis Yu. M., Akhmetov Kh. Mathematical modeling of technical deformation. Izvestiya MSTU "MAMI" №2 (12), 2011, 195-201 C.
 6. Cherepanov G. P. on the propagation of cracks in a continuous medium / / Applied mathematics and mechanics, Vol. 31, no. 3, 1967. Shapiro G. S. on deformations of bodies possessing different resistance to stretching and compression / / Inzh. Zhurnal MTT. 1966. no. 2.
 7. Hutchinson J. W. Plastic stress and strain fields at crack tip // J. Mech. and Phys. Solids. 1968. V. 16. № 5. P. 337 - 347. 60. Irwin G. R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack transversing a plate I I J. Appl. Mech. 1957. V. 24. № 3. P. 361 -364. 61 .Jones R. M., Nelson D. A. R. Material models for non-linear deformation of graphite //AIAA Journal. 1976. Vol. 14. № 6. b2. Jones R. M., Nelson D. A. R. Theoretical-experimental correlation of material models for non-linear deformation of graphite // AIAA Journal. 1976. Vol. 14. № 10. . (Рус. перев.: Рак

УДК 631.029

Определение оптимальных условий использования радиационно-защитного материала композита на основе WC

Н.И. Черкашина¹

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. ¹selyanskij-as@ya.ru

Статья поступила 10.09.2020 г.; после доработки 15.09.2020 г.

Аннотация

Рассмотрены радиационно-защитные свойства композитного материала (WC), его зависимость от методов и условий измерения, для сравнения брался эталон из алюминия. Исследованы зависимости кратности ослабления от геометрических условий и определена оптимальная геометрия для достижения максимальной защиты от излучения.

Ключевые слова: нанопорошок, композиционные материалы, кратность ослабления, карбид вольфрама.

Determination of optimal conditions for the use of radiation-protective composite material based on

N.I. Cherkashina

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russia

¹selyanskij-as@ya.ru,

Received 10.09.2020 y.; received in final form 15.09.2020 y.

Abstract

The radiation-protective properties of a composite material (WC) and its dependence on measurement methods and conditions are considered. an aluminum standard was used for comparison. The dependences of the attenuation multiplicity on geometric conditions are investigated and the optimal geometry for achieving maximum radiation protection is determined.

Keywords: nanopowder, composite materials, attenuation ratio, tungsten carbides.

Введение

Важным средством обеспечения индивидуальной радиационной безопасности сотрудников, работающих в зоне действия источников излучения или радиоактивного загрязнения является защитная одежда, которая в зависимости от области применения должна обеспечивать высокий уровень биологической защиты персонала. На сегодняшний день многие современные материалы, используемые для защитных костюмов, представляют собой высоконаполненные композиционные материалы на основе полимера (резины, каучук, пластика и др.) со специальным наполнителем из

соединений поглотителя. В качестве таких наполнителей используют такие металлы как свинец, барий, кадмий, молибден, вольфрам, их карбиды, лантаноиды, и различные другие соединения [1-4].

Объектом исследования является исследование влияния на радиационно-защитные свойства материала на основе нанопорошка карбида вольфрама (WC) геометрических условий измерения.

В данной работе исследован материал, в основу которых входит: поливинилацетатный клей ГОСТ 30535-97 и нанопорошок карбида вольфрама [5]. Используемый материал, для изготовления композиционного изделия (клей, ацетон,

модификатор) отвешивали в требуемых количествах и помещали каждый материал в отдельную тару.

Соблюдая соотношение были приготовлены образцы с различным содержанием модификатора. Перемешивание модификатора (концентрация 10, 15, 20, 25, 30 %) и клея производили не менее 5 минут. Далее отмеренное количество ацетона по частям смешивали с клеем, и перемешивали, добавляя по частям модификатор. Перемешивание вели до получения смеси однородного цвета, и полного равномерного распределения модификатора в смеси.

Полученной смесью заполняли формы (чашки Петри). Внутренняя поверхность форм непосредственно перед заливкой в них композитной смеси смочена водой и уложена фильтровальной бумагой. По окончании заливки формы с образцами оставляли в помещении лаборатории при комнатной температуре на 12 – 18 часов. Образцы помещались в темное место во избежание попадания солнечных лучей и излишней влаги.

Постановка цели и задач научного исследования

Цель работы – выбор оптимальных геометрических условий измерения для композитного материала на основе нанопорошка карбида вольфрама, изучение его радиационно-защитных свойств.

В работе показан выбор оптимального состава наполнителей гетерогенных радиационно-защитных материалов для заданного изотопного состава радиоактивных загрязнений.

Приведены результаты расчетно-экспериментального исследования ослабляющей способности гетерогенных радиационно-защитных материалов с различными наполнителями в зависимости от выбранной геометрии.

Методика эксперимента

Измерения проводились на радиометре КРК-1, который предназначен для измерения концентрации бета-активных изотопов в твердых, жидких и газообразных веществах. Радиометр применяется для измерения удельной бета-активности твердых материалов, объемной бета-активности питьевой воды и воды второй очереди, а также концентрации (объемной активности) бета-активных газов (β -газов) и бета-активных аэрозолей (β -золей) в воздухе помещений.

Помещали в чашку свинцового домика контролируемую пробу, вставляли чашку в третью

сверху канавку держателя свинцового домика и закрывали боковую дверцу свинцового домика.

Определяли по логарифмическому индикатору устройства счетного УСЦ-01 ожидаемую скорость счета $n_{ож}$, на основе которой поставили переключатель ТАЙМЕР в одно из положений, определяющих время измерения $t_{тайм}$ пробы.

Число импульсов от пробы $N_{пр}$ за время $t_{тайм}$, определяемое положением переключателя ТАЙМЕР, повторно измерялось 8-10 раз импульсов $N''_{пр}$. После этого рассчитывалось среднее число импульсов $N_{пр}$ за 1000 с по формуле 1.1:

$$N_{пр} = \frac{N'_{пр} + N''_{пр}}{2} \quad (1.1)$$

где $N'_{пр}$ и $N''_{пр}$ – это повторные измерения набранного числа импульсов, имп.

После этого измеряли число фоновых импульсов $N_{ф}$ за время, равное времени измерения пробы $t_{тайм}$, проделав следующие операции. Положили в чашку свинцового домика, в зависимости от применяемой методики, чистый от радиоактивности или сорбент (анионо или катионообменную ткань), или аэрозольный фильтр, или фильтровальную бумагу, затем необходимо вставить чашку в свинцовый домик в канавку держателя, на который производилось измерение пробы, и определить число фоновых импульсов $N_{ф}$ за время, равное времени измерения пробы, $t_{тайм}$.

Скорость счета n бета-частиц, испускаемых контролируемой пробой определяли по формуле 1.2:

$$n = \frac{N_{пр} - N_{ф}}{t_{тайм}} \quad (1.2)$$

где $N_{ф}$ – число импульсов фона;

$N_{пр}$ – число импульсов от пробы;

$t_{тайм}$ – время измерения, определяемое положением переключателя ТАЙМЕР.

Обработка результатов измерения

Изначально задавались условиями: источник ^{209}Tl с энергией 0,51 МэВ, $\Delta\beta = 17,5 \text{ мг/см}^2$ и препарат с $r_s = 8 \text{ мм}$ является тонким и точечным, истинная скорость счета на КРК-1-01 составила 1500 имп/мин, расстояние от источника до детектора 18 см, толщина окна счетчика 4 мг/см², $\epsilon = 0,99$.

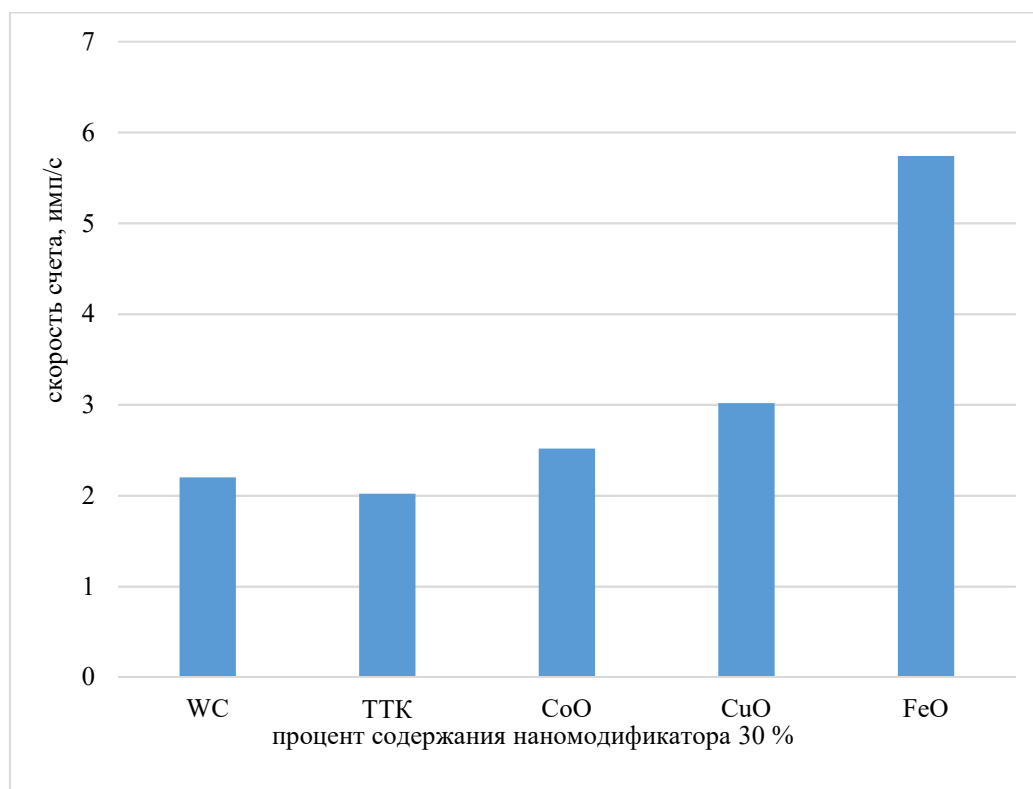


Рис. 1 Изменение скорости счета (имп/с) от материала наномодификатора при концентрации 30 %

На рисунке 1 представлена диаграмма изменений скорости счета (имп/с) образцов от материала наполнителя.

Наиболее оптимальными модификаторами композитного материала, улучшающие радиационно-защитные свойства оказались карбид вольфрама, нанопрошок ТТК. При добавлении упомянутых материалов наблюдаются наилучшие результаты (при добавлении 30 % нанопрошка наблюдается увеличение радиационно-защитных характеристик в 9,36 раза) [6-8]. Дальнейшее увеличение концентрации наномодификаторов во всех образцах приводило к снижению коэффициента ослабления за счет эффекта отражения и возникновения ложных импульсов.

Нанопрошочки оксида меди и железа пока-

зали наименьшую радиационно-защитную способность.

Для более детального изучения влияния наномодификаторов необходимо провести ряд исследований, направленных на различные свойства композитных образцов в зависимости от условий измерений.

Для материала карбида вольфрама были получены значения параметров слоя половинного ослабления излучения $\Delta\beta$, плотность поглотителя ρ , эффективная толщина поглощающей среды $d_{\text{эфф}}$, коэффициенты поглощения излучения линейный $\mu_{\text{лин}}$ и массовый $\mu_{\text{масс}}$, значения которых представлены в таблице 1.

Таблица 1. Полученные физические характеристики радиационно-защитного материала на основе карбида вольфрама в зависимости от процентного содержания

Материал композитного наполнителя	Расчетные параметры радиационно-защитного материала					
	$n_{\text{изм}}$, имп/мин	n_0 , имп/мин	$n_{\text{ф}}$, имп/мин	$n_{\text{итог}}$, имп/мин	$\Delta\beta$, мг/см ²	ρ , г/см ³
WC-10%	144	90,7	67,7	5	88,866078	2,646
WC-20%	141,85	88,335	67,7	0	86,548898	3,377
WC-30%	136,9	82,89	67,7	9	81,213993	4,108

	A, расп/мин	д _{погл} , см	д _{эфф} , см	μ _{масс} , г/см ²	μ _{лин} , см ⁻¹	
WC-10%	3015,8186	0,2646	10,26465	0,07718	0,0291	
WC-20%	2892,5602	0,3377	10,337725	0,06048	0,0179	
WC-30%	2685,7717	0,4108	10,4108	0,04972	0,0121	

Как видно из таблицы плотность тридцати процентного образца на 55% больше чем у десяти процентного, коэффициент линейного ослабления отличается в 2,4 раз. Слой половинного ослабления излучения при равных условиях измерения образцов у WC-30 % в полтора раза меньше, чем у WC-10 %.

Для сравнения с легкоплавкими материа-

лами на рисунке 2 представлены кривые для материала карбида вольфрама 30 % и Al той же толщины в зависимости от геометрических условий измерений (расстояние от материала над образцом до детектора h находится в диапазоне от 1 см до 9 см).

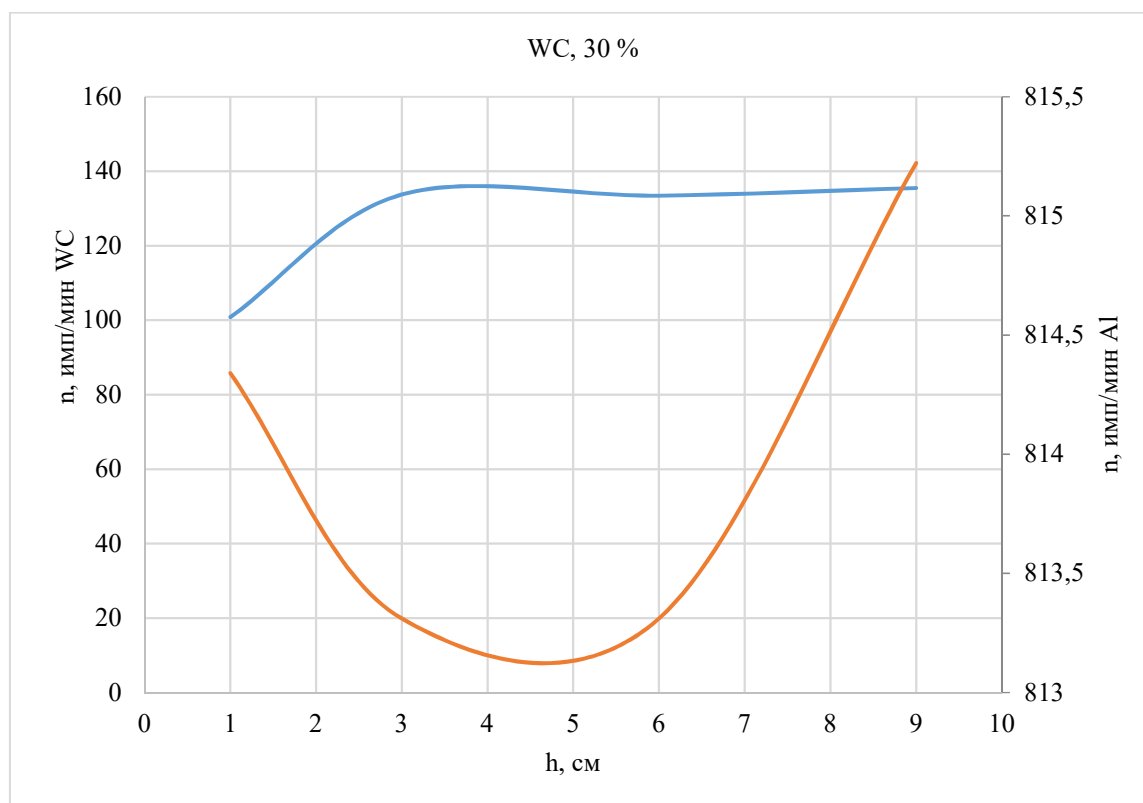


Рис.2. Зависимость изменения измеренной скорости счета для материала карбида вольфрама 30 % и Al в зависимости от геометрических условий измерений

Из рисунка 2 видно, что образец из тугоплавкого материала изменяет свои параметры в диапазоне скоростей счета от 100 имп/мин до 135 имп/минуту (в полтора раза превышающие фон), т.е. нахождение материала над источником практически не зависит от расстояния в диапа-

зоне от 3 см до 9 см. Для легкоплавкого материала значения существенно превышают фон (более чем в 10 раз), и на графике видно, что оптимальной геометрией является диапазон от 3 см до 6 см, при другом расстоянии эффект рассеивания излучения увеличивается.

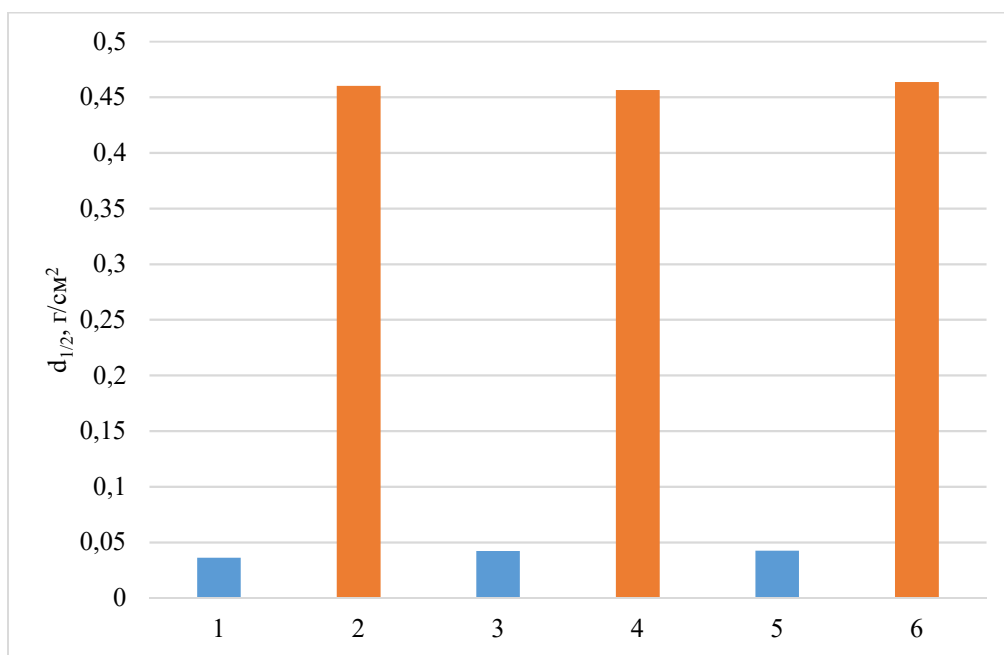


Рис.3. Сравнительная диаграмма слоя половинного ослабления излучения материалов – для $h = 1$ см: 1 – WC 30 %; 2 – Al; для $h = 6$ см: 3 – WC 30%; 4 – Al; для $h = 9$ см: 5 – WC 30%; 6 – Al.

Если сравнивать образцы радиационно-защитного композитного материала с концентрацией от 10 % до 30 %, то у всех слоев половинного ослабления в десять раз меньше чем у образцов из алюминия.

Выводы

Таким образом, в результате исследования влияния наномодификаторов на радиационно-защитные свойства образцов, можно сделать следующие выводы:

- в работе показан выбор оптимального состава наполнителей гетерогенных радиационно-защитных материалов для заданного изотопного состава радиоактивных загрязнений;
- дальнейшее увеличение концентрации наномодификаторов более 30 % приводит к значительному росту стоимости материала при увеличении кратности ослабления не более чем 1,5 раза;
- приведены результаты расчетно-экспериментального исследования ослабляющей способности гетерогенных радиационно-защитных материалов с различными наполнителями в зависимости от выбранной геометрии.
- рассмотрены радиационно-защитные свойства композитного материала (WC), его зависимость от методов и условий измерения,

для сравнения брался эталон из алюминия;

- исследованы зависимости кратности ослабления от геометрических условий и определена оптимальная геометрия для достижения максимальной защиты от излучения.

Список литературы

1. Павленко, Г.Г. Бондаренко, О.В. Куприева, Р.Н. Ястребинский, Н.И. Черкашина. Модифицирование поверхности гидроксида титана боросиликатом натрия // Перспективные материалы. 2014, №6. – с. 19 – 24.
2. Русских И.М., Селезнев Е.Н., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Экспериментально-теоретическое исследование органометаллических радиационно-защитных материалов, адаптированных к источникам излучения со сложным изотопным составом // Ядерная физика и инжиниринг, 2014, том 5, №5. – с.449–455.
3. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Лукьяненко В.Ю., Михайлова А.Ф., Русских И.М., Селезнев Е.Н., Козлов А.В. Оптимизация состава радиационной защиты // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика 2015. № 4. –С. 36–42.
4. P.V. Matyukhin, V.I. Pavlenko, R.N. Yastrebinskii, N.I. Cherkashina. The high-energy radiation effect on the modified iron-containing composite material // Middle-East Journal of Scientific Research. 2013, v. 17(9), p. 1343-1349.
5. Method and device for obtaining a powder from particles of tungsten or tungsten compounds with a size in the nano-, micron- or subvicon range: Pat/ EP 3138932 Al, EC, GalugaAndrey, Baranov Georgij,

- Gavrish Vladimir, Smirnov Sergei, Losenko-vAleksandr, VostrogutovStanislav – № 15002564.1 заявл. 01.09.2015 опубл. 08.30.2017 Бюл. 2017/10.
6. Черкашина Н.И. Расчетно-экспериментальное исследование композитных материалов для защиты от излучения/ Черкашина Н.И., Гавриш В.М., Чайка Т.В. и др.//Энергетические установки и технологии, 2019. - Т. 5, № 4. С. 130-135.
 7. Gavrish V., Baranov G, Derbasova N., Chayka T. Radioprotective materials with tungsten nanopowder additives IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 12. Сер. "XII International Conference Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials" 2017. – Pp. 012013.
 8. Tungsten nanoparticles influence on radiation protection properties of polymers. Gavrish V.M., Baranov G.A., Chayka T.V., Derbasova N.M., Lvov A.V., Matsuk Y.M. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 11. Сер. "International Scientific Conference on Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials 2015, RTEP 2015" – 2016. – C. 012028.
 2019. - Vol. 5, No. 4. Pp. 130-135.
 7. Gavrish V., Baranov G, Derbasova N., Chayka T. Radioprotective materials with tungsten nanopowder additives IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 12. Сер. "XII International Conference Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials" 2017. – Pp. 012013.
 8. Tungsten nanoparticles influence on radiation protection properties of polymers. Gavrish V.M., Baranov G.A., Chayka T.V., Derbasova N.M., Lvov A.V., Matsuk Y.M. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 11. Сер. "International Scientific Conference on Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials 2015, RTEP 2015" – 2016. – Pp. 012028.

References

1. Pavlenko, G. G. Bondarenko, O. V. Kupreeva, R. N. Yastrebinsky, N. And. Cherkashina. Modification of the surface of titanium hydride with sodium borosilicate // Perspective materials. 2014, №6. – Pp. 19 – 24.
2. Russian I. M., Seleznev E. N., Tashlykov O. L., Shcheklein S. E. Experimental and theoretical study of organometallic radiation-protective materials adapted to radiation sources with complex isotopic composition // Nuclear physics and engineering, 2014, vol. 5, no. 5. - p. 449-455.
3. Tashlykov O. L., Shcheklein S. E., Lukyanenko V. Yu., Mikhailova A. F., Russian I. M., Seleznev E. N., Kozlov A.V. Optimization of radiation protection composition // News of higher educational institutions. Nuclear power engineering 2015, no. 4, Pp. 36-42.
4. P.V. Matyukhin, V.I. Pavlenko, R.N. Yastrebinskii, N.I. Cherkashina. The high-energy radiation effect on the modified iron-containing composite material // Middle-East Journal of Scientific Research. 2013, v. 17(9), p. 1343-1349.
5. Method and device for obtaining a powder from particles of tungsten or tungsten compounds with a size in the nano-, micron- or submicron range: Pat/ EP 3138932 Al, EC, GalugaAndrey, Baranov Georgij, Gavrish Vladimir, Smirnov Sergei, Losenko-vAleksandr, VostrogutovStanislav – № 15002564.1 заявл. 01.09.2015 опубл. 08.30.2017 Бюл. 2017/10.
6. Cherkashina N. I. Calculation and experimental study of composite materials for radiation protection/ Cherkashina N. I., Gavrish V. M., Chaika T. V. and others/ / Power installations and technologies,

ISSN 2413-5526

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»
Том 6 № 3**

**SCIENTIFIC MAGAZINE
«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»
Vol. 6 No 3**

Учредитель и издатель:

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053, Российская Федерация

Адрес редколлегии:

ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. Севастополь, 299015, Российская Федерация
E-mail nauchnyyzhurnal@mail.ru
тел. +7(8692) 71-01-64.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнения, высказываемые авторами в публикуемых статьях, не всегда совпадают с мнением редакции. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Энергетические установки и технологии» обязательна.

Научный журнал «Энергетические установки и технологии» издается в авторской редакции.

Компьютерная верстка: *Е.А. Нестерова*.

Подписано к печати 28.09.2019. Изд. № 39/20. Зак. 26/20. Тираж 65 экз.
Объем 12,5 п.л. Усл. печ. л. 11,62. Уч.-изд. л. 12,25. Формат бумаги 60 x 84 1/8

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»