

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

На правах рукописи

УДК 620.92+621.382

Жидиляева
Наталья Ивановна

**АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕИМУЩЕСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ
ДЕГРАДАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ ИХ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени
магистра технических наук

по специальности 1-38 80 04 Технологии приборостроения

Минск 2018

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **ЦЫРЕЛЬЧУК Игорь Николаевич**,
кандидат технических наук, доцент, декан факультета инновационного и непрерывного образования учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **БОНДАРИК Василий Михайлович**,
кандидат технических наук, доцент, декан факультета доуниверситетской подготовки и профессиональной ориентации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «27» июня 2018 года в 10⁰⁰ часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П.Бровки, 6, копр. 1, ауд. 415, тел. 293-20-80, e-mail: kafpiks@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении нескольких веков развитие человечества, в плане энергопотребления, не встречало серьёзных проблем и происходило исключительно за счёт увеличения добычи таких ископаемых как нефть, газ и уголь, однако их запасы ограничены.

Фотовольтаический способ преобразования солнечного излучения признан одним из наиболее перспективных способов получения экологически чистой электроэнергии. Создание фотовольтаических устройств в высокоразвитых странах Европы, США и Японии выделилось в самостоятельную отрасль электронной промышленности (PV-industry), развивающуюся ускоренными темпами. Так как стоимость энергии, добытой с использованием традиционных видов топлива постоянно растёт, а стоимость энергии, получаемой от фотоэлектрических станций (ФЭС) постоянно снижается можно предполагать, что в ближайшее время по уровню себестоимости данный вид энергии сможет конкурировать с традиционными.

Одним из важнейших параметров фотоэлектрических модулей, наряду с пиковой мощностью, является параметр долговечной стабильности электрических характеристик. Этот параметр в настоящее время оценивается как гарантия сохранения пиковой мощности на уровне 90 % от номинала после эксплуатации в течении 10 лет и 80 % от номинала в течении 25 лет. Долговременная стабильность зависит от ряда факторов, которые в зависимости от географического положения:

- факторы, обусловленные качеством разработки и конструкции; определяются многими физическими, химическими, электрическими, оптическими и механическими свойствами применяемых материалов и солнечных элементов;
- факторы, обусловленные качеством изготовления; определяются качеством контроля технологического процесса, особенно, как правило, операции пайки и монтажа соединительной коробки;
- факторы, обусловленные качеством монтажа в системе; определяются степенью согласования элементов в системе, правильным выбором компонентов, в том числе кабелей, соединительных разъёмов, электронных устройств, выбором монтажной конструкции;
- реальные климатические факторы и чрезвычайные ситуации.

На сегодняшний день существует большое количество работ и нормативной документации по методикам прогнозированию выработки электроэнергии ФЭС, оценки надежности, испытаниям, как на этапе производства, так и на этапе эксплуатации и другим аспектам, позволяющим оценить эффективность применения солнечных электростанций (СЭС) в целом. Вместе с тем, в связи с трудностью определения преимущественного фактора деградации для определенной географической области в публикациях присутствуют коррелирующие между собой, но всё же отличающиеся данные по скоростям деградации СЭ, СМ, СБ. Все вышесказанное определило направленность данной работы: определение преимущественных факторов деградации для Республики Беларусь и установление её гелиоэнергетического потенциала.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Несмотря на то, что первые ФЭС появились уже более 40 лет назад, а объемы выработки электроэнергии от них растут с каждым годом, вопрос установления статистических моделей деградации ФЭС в зависимости от их местоположения остается открытым. В первую очередь это обусловлено различным вкладом механизмов, определяющих уменьшение характеристик входящих в состав ФЭС модулей, инверторов, соединительных элементов и др. Важным является постоянное повышение КПД солнечных элементов (СЭ) и применения новых материалов.

Все указанные факторы необходимо учитывать при оценке уровня выработки электроэнергии ФЭС в Республике Беларусь.

Степень разработанности проблемы

В настоящее время в Республике Беларусь не существует единой системы сертификации составляющих ФЭС компонентов: модулей, инверторов, панелей. Также отсутствуют полноценные исследования о влиянии климатических условий РБ на параметры деградации СБ. Указанные параметры необходимо использовать при оценке жизненного цикла СЭС.

Разработка тематики диссертационной работы осуществлялась на основе литературного обзора работ российских и белорусских ученых: Ж.И. Алфёрова, Е.И. Терукова, В.Ф. Гременка, М.С. Тиванова, В.Б. Залесского, В.В. Хорошко и др. Среди зарубежных авторов: В.Л. Strawnberry, Р. Yang, Shmidt J и др.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является разработка и анализ преимущественных климатических факторов, определяющих изменения электрических характеристик ФЭС.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы **следующие задачи:**

- аналитическое исследование методик испытаний ФЭС и составляющих её модулей;
- установление с помощью ускоренных испытаний основных механизмов и параметров деградации солнечных элементов, работающих в составе солнечных модулей;
- определение гелиоэнергетического потенциала ФЭС, с установленной мощностью до 150 кВт для условий Республики Беларусь.

Область исследования

Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-38 80 04 Технологии приборостроения. **Объектом** исследования являются фотоэлек-

трические преобразователи, модули, батареи. **Предметом** работы являются динамика изменения электрических характеристик ФЭС.

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу работы легли практический опыт магистранта в сфере электронных систем на возобновляемых источниках энергии, документация и информационные ресурсы разработчиков систем. **Теоретической основой исследований**, проведенных в работе, являются общенаучные методы сравнительного анализа, методы оценки количественной и качественной эффективности ФЭС в РБ.

Методологической основой исследования являются публикации отечественных и зарубежных исследователей полупроводниковых ФЭС, технической и иной документации. В магистерской диссертации используются следующие общенаучные методы: структурный и сравнительный анализ, метод формализации. В диссертации используется системный подход к разработке методологии оценки жизненного цикла ФЭС. В основу изложения научных результатов положена гипотетико-дедуктивная схема научного исследования.

Научная новизна и значимость полученных результатов заключается в использовании преимущественных факторов деградации ФЭС, определении влияния технологических особенностей изготовления модулей ФЭС на изменение их электрических характеристик с течением времени, гелиоэнергетического потенциала ФЭС, с установленной мощностью до 150 кВт в климатических условиях Республики Беларусь.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Установлены основные механизмы деградации ФЭС: рассогласование коэффициентов термического расширения материалов фотоэлектрических модулей, воздействие УФ-излучения, недостатки конструкции соединительных элементов, что приводит к уменьшению электрических характеристик в среднем на 1% в год.

2. Проведены ускоренные испытания солнечных элементов с КПД 21 %, что позволило установить: фоточувствительность образцов, модель деградации электрических характеристик, заключающаяся в линейном уменьшении фототока и увеличении последовательного сопротивления.

3. На примере проекта стационарной ФЭС, устанавливаемой под углом 35° к горизонту и азимутом 12°, установленной мощностью 140 кВт, разработана модель выработки электроэнергии и периода окупаемости.

Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что в ней предложен подход к построению методик оценки эффективности применения ФЭС в Республике Беларусь на основе исследований влияния климатических условий эксплуатации.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что на основе предложенных методов возможна оценка эффективности применения ФЭС с учетом разнообразных факторов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследования были применены на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем в учебном процессе.

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 54-ой научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, Беларусь, 2018 г.), на IV международной научно-практической конференции Big Data and Advanced Analytics (Минск, Беларусь, 2018), на международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современных исследований» (Омск, Россия, 2018) и на международной научно-практической конференции «Вопросы современных научных исследований» (Омск, Россия, 2018).

Публикации

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в восьми опубликованных работах общим объемом 1,7 авторского листа.

Структура и объем работы

В первой главе приведен обзор конструкций фотоэлектрических преобразователей и разработка фотоэлектрических модулей. **Во второй главе** проведены исследования деградации солнечных элементов и модулей под влиянием, проведена оценка гелиоэнергетического потенциала СЭС в Республике Беларусь. **В третьей главе** был проведен анализ сценария работы ФЭС мощностью 114 кВт и с учетом влияния ультрафиолетового излучения, термоциклирования и др. эксплуатационных факторов. **В приложении** представлены публикации автора и акт внедрения.

Работа состоит из введения, трёх глав и заключения, библиографического списка. Общий объем диссертации – 77 страниц. Работа содержит 35 рисунков и 10 таблиц. Библиографический список включает 219 наименований. Список собственных публикаций включает 8 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрены физические принципы использования энергии Солнца как основного источника для электронных систем на возобновляемых источниках энергии и перспективы развития данного направления, указаны основные области проводимых исследований, а также описано обоснование актуальности темы.

В **общей характеристике работы** показана актуальность проводимых исследований, степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации, обозначена область исследований, научная (теоретическая и практическая) значимость исследований, а также апробация работы.

В **первой главе** проведен анализ моделей солнечных элементов (СЭ). В качестве основных приведены модели СЭ на основе поли, монокристаллического, и аморфного кремния.

Проведен литературный обзор за период 1990-2015 с информацией об эксплуатации ФЭС. Выделены основные механизмы изменения электрических характеристик модулей, инверторов. Исследования позволили установить, что средняя скорость уменьшения КПД ФЭС составила 0,8 %. При этом стоит отметить значительный процент случаев, при которых происходит полная потеря модуля из-за внезапно наступающих отказов.

Проведена классификация различных стресс-тестов модулей, позволяющих установить срок службы и прогнозировать падение мощности с течением времени.



Рисунок 1 – Тестовые последовательности при испытаниях модулей

Несмотря на прогресс, достигнутый за последнее десятилетие, некоторые интересные вопросы, такие как линейность и точное воздействие климата, не были установлены. Тем не менее в последние годы быстро растет число публикаций, посвященных долгосрочной деятельности, что отражает важность данной темы.

Во второй главе рассмотрены результаты проведенных ускоренных испытаний фотоэлектрических преобразователей. В эксперименте использовались монокристаллические СЭ класса А с КПД 20,6 % производства CNH Solar. Исходные параметры: КПД – 20,7 %; U_{oc} – 0,65 В; I_{sc} – 9,65 А; U_{mpp} – 0,55 В; I_{mpp} – 9,16 А. Испытания проводились при температуре 150 °С в течении 200 часов с периодическим измерением характеристик через каждые 50 часов. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерений

Время, ч	U_{oc} , мВ	I_{sc} , А	$ff, \%$	$\eta, \%$
50	680	9,25	78	19,2
100	675	9,12	72	17,5
150	677	8,78	70	16,4
200	670	8,7	68	15,8

По результатам испытаний можно отметить, что старение солнечных элементов при проведении ускоренных испытаний происходит преимущественно за счёт старения контактов и как следствие увеличения последовательного сопротивления, что обусловило потерю 16 % в точке максимальной мощности, а также деградации на 10 % за счет уменьшения фототока СЭ.

В третьей главе приводятся результаты моделирования сценариев эксплуатации ФЭС с мощностью 140 кВт. В таблице 2 приведен состав оборудования для формирования ФЭС. Цены указаны по состоянию на 15.05.2018.

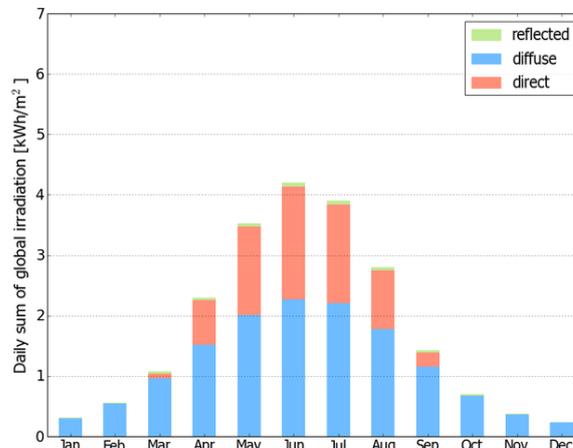
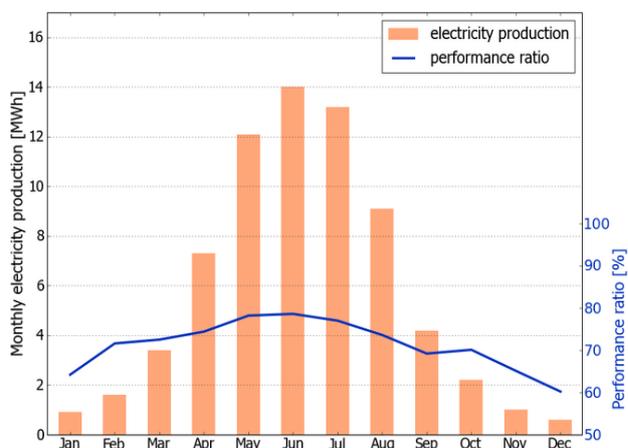
Таблица 2 – Состав оборудования

№ п/п	Наименование	Кол-во, шт	Цена, евро
1	Фотоэлектрический модуль	491	99500
2	Инвертор Fronius Eco 27.0-3-S LAN	2	6490
3	Каркас для фотоэлектрических модулей	1	8450
4	Счетчик Fronius smart meter 50kA-3	1	250
Итого			114700

Устанавливаемая ФЭС имеет стационарный угол 35° и азимут 12°. В таблице 3 и на рисунке 1 представлены сведения по выработке электроэнергии, основанные на среднеарифметических данных по уровням инсоляции в области установки за 30 лет, а также технических характеристиках оборудования.

Таблица 3 – Планируемая выработка электроэнергии

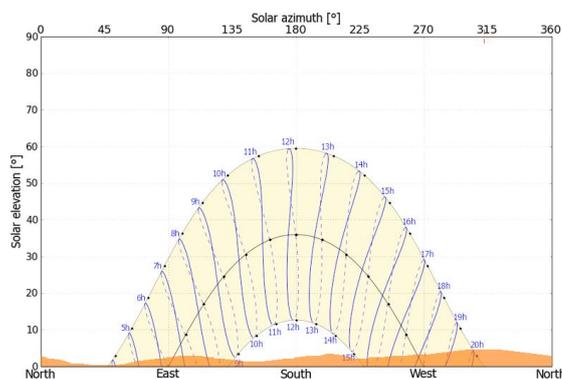
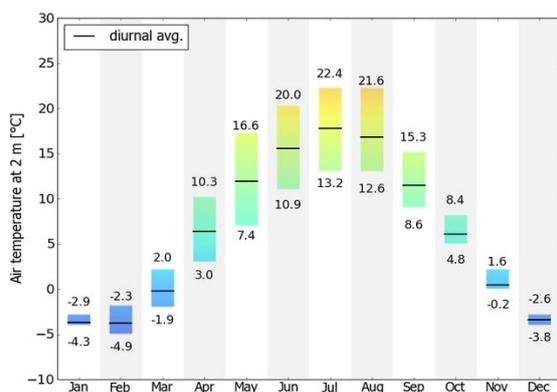
Месяц	Выработка, кВт	Потери на экпл, кВт	Удельный годовой процент, %
Январь	882	6,3	1,3
Февраль	1610	11,5	2,3
Март	3416	24,4	4,9
Апрель	7266	51,9	10,5
Май	12082	86,3	17,4
Июнь	13986	99,9	20,1
Июль	13160	94,0	18,9
Август	9058	64,7	13,0
Сентябрь	4168	29,9	6,0
Октябрь	2184	15,6	3,1
Ноябрь	1022	7,3	1,5
Декабрь	616	4,4	1



а – среднемесячная выработка от ФЭС; б – уровень инсоляции на ФЭС

Рисунок 1 – Прогнозируемые данные ФЭС

Как видно из рисунка 1а подавляющее большинство выработки приходится на период апрель-сентябрь. Температурные диапазоны эксплуатации ФЭС приведены на рисунке 2. На основании себестоимости и с учетом того факта, что применение ФЭС планируется для собственных нужд, срок окупаемости составляет 10,5 лет.



а – среднемесячные диапазоны температур; б – угол Солнца от азимута
Рисунок 2 – Прогнозируемые данные ФЭС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Литературный обзор научных статей с информацией об эксплуатации ФЭС позволил выделить основные механизмы изменения электрических характеристик модулей, инверторов. Исследования позволили установить, что средняя скорость уменьшения КПД ФЭС составила 0,8 %. При этом стоит отметить значительный процент случаев, при которых происходит полная потеря модуля из-за внезапно наступающих отказов. Проведена классификация различных стресс-тестов модулей, позволяющих установить срок службы и прогнозировать падение мощности с течением времени.

2. По результатам испытаний можно отметить, что старение солнечных элементов при проведении ускоренных испытаний происходит преимущественно за счёт старения контактов и, как следствие, увеличения последовательного сопротивления, что обусловило потерю 16 % в точке максимальной мощности, а также деградации на 10 % за счет уменьшения фототока СЭ.

3. Проведен расчет гелиоэнергетического потенциала СЭС на примере фотоэлектрической станции мощностью 140 кВт. Показано, что срок ее окупаемости составляет 10,5 лет.

4. Показано, что с развитием солнечной энергетики и ростом мощностей солнечных электростанций, их конструкция должна определяться не только целевыми энергетическими показателями, но и надёжностью конструкции этой электростанции. Установлено, что даже элементы, которые имеют высокие показатели средней наработки на отказ, при больших количествах используемых элементов не обеспечивают высокие показатели надёжности. Даны рекомендации по внедрению «умных» модулей, способных выявлять вышедшие из строя элементы и восстанавливать нормальную работу солнечных электростанций.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно–компьютерных систем учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в учебный курс «Электронные системы на возобновляемых источниках энергии».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в сборниках научных трудов

1. Компьютерное моделирование проектных решений в учебном процессе и научных исследованиях / С.М. Боровиков, Н.И. Цырельчук, С.С. Дик, Н.И. Жидиляева// Дистанционное обучение – образовательная среда XXI века: материалы X Междунар. науч-метод. конф. (Республика Беларусь, Минск, 7-8 декабря 2017 года) / редкол.: Б.В. Никульшин [и др.]. – Минск: БГУИР, 2017. С. 100-101
2. Учебное программное средство для оценки надежности электронной системы методом анализа множества ее технических состояний / С.М. Боровиков, А.И. Цырельчук, Н.И. Жидиляева, Н.И. Цырельчук// Дистанционное обучение – образовательная среда XXI века: материалы X Междунар. науч-метод. конф. (Республика Беларусь, Минск, 7-8 декабря 2017 года) / редкол.: Б.В. Никульшин [и др.]. – Минск: БГУИР, 2017. С. 164-165
3. Photovoltaic Degradation rates: on the way of improvement/ N.I. Zhidiliaeva, I.N. Tsyrelchuk//Big Data and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов IV Междунар. науч.-практ.конф. (Республика Беларусь, Минск, 3-4 мая 2018 года)/ редкол.: М.П. Батура [и др.]. – Минск, БГУИР, 2018. С. 79-85
4. Влияние ошибок при пайке солнечных элементов на скорость деградации их электрических характеристик / В.В. Хорошко, А.А. Фещенко, А.Н. Марков, Н.А. Голубов, Е.Г. Домбровский, Н.И. Жидиляева//Международная конференция «Актуальные вопросы современных исследований». – Омск: Научный центр «Дельта», 11 июня 2018 (в печати)
5. Потенциал применения солнечных электростанций в климатических условиях Республики Беларусь / В.В. Хорошко, А.А. Фещенко, А.Н. Марков, Н.А. Голубов, Е.Г. Домбровский, Н.И. Жидиляева// XXVI Международная научно-практическая конференция «Вопросы современных научных исследований». – Омск: Научный центр «Орка», 12 июня 2018 (в печати)

Тезисы конференций

6. Photovoltaic Degradation Rates / Н.И. Жидиляева// Материалы работы 54-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск: БГУИР, 7-11 мая 2018 (в печати)
7. Экономическое обоснования использование солнечных электростанций/ А.А. Фещенко, А.Н. Марков, Н.И. Жидиляева// Материалы

работы 54-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск: БГУИР, 7-11 мая 2018 (в печати)

8. КПД солнечных элементов на территории Республики Беларусь /Н.И. Жидиляева, В.Ю. Осадчук, Е.Г. Домбровский // Материалы работы 54-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск: БГУИР, 7-11 мая 2018 (в печати)

РЭЗІЮМЭ

Жыдзіляевай Наталлі Іванаўны

Аналіз размеркавання пераважных механізмаў дэградацыі сонечных электрастанцый у залежнасці ад іх геаграфічнага становішча

Ключавыя словы: фотаэлектрастанцыя (ФЭС), фотавальтаіка, дэградацыя

Мэта працы: распрацоўка і аналіз пераважных кліматычных фактараў, якія вызначаюць змены электрычных характарыстык ФЭС.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: навуковая навізна і значнасць атрыманых вынікаў заключаецца ў выкарыстанні пераважных фактараў дэградацыі ФЭС, вызначэнні ўплыву тэхналагічных асаблівасцяў вырабу модуляў ФЭС на змяненне іх электрычных характарыстык з цягам часу, геліаэнергетычнага патэнцыялу ФЭС, з усталяванай магутнасцю да 150 кВт ў кліматычных умовах Рэспублікі Беларусь.

Устаноўлены асноўныя механізмы дэградацыі ФЭС: разузгадненне каэфіцыентаў тэрмічнага пашырэння матэрыялаў фотаэлектрычных модуляў, ўздзеянне УФ-выпраменьвання, недахопы канструкцыі злучальных элементаў, што прыводзіць да памяншэння электрычных характарыстык у сярэднім на 1% у год. Праведзены паскораныя выпрабаванні сонечных элементаў з ККД 21%, што дазволіла ўсталяваць: фотаадчувальным узораў, мадэль дэградацыі электрычных характарыстык, якая складаецца ў лінейным памяншэнні фототока і павелічэнні паслядоўнага супраціву. На прыкладзе праекта стацыянарнай ФЭС, якая ўстанаўліваецца пад вуглом 35° да гарызонту і азімутам 12° , усталяванай магутнасцю 140 кВт, распрацавана мадэль выпрацоўкі электраэнергіі і перыяду акупнасці.

Ступень выкарыстання: атрыманыя вынікі ўкаранёны ў навучальны працэс на кафедры праектавання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм ўстановы адукацыі “Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі” у рамках вучэбнай дысцыпліны “Электронныя сістэмы на аднаўляльных крыніцах энергіі”.

Вобласць уывання: электронныя сістэмы на аднаўляльных крыніцах энергіі.

РЕЗЮМЕ

Жидиляевой Натальи Ивановны

Анализ распределения преимущественных механизмов деградации солнечных электростанций в зависимости от их географического положения

Ключевые слова: фотоэлектростанция (ФЭС), фотовольтаика, деградация

Цель работы: разработка и анализ преимущественных климатических факторов, определяющих изменения электрических характеристик ФЭС.

Полученные результаты и их новизна: научная новизна и значимость полученных результатов заключается в использовании преимущественных факторов деградации ФЭС, определении влияния технологических особенностей изготовления модулей ФЭС на изменение их электрических характеристик с течением времени, гелиоэнергетического потенциала ФЭС, с установленной мощностью до 150 кВт в климатических условиях Республики Беларусь.

Установлены основные механизмы деградации ФЭС: рассогласование коэффициентов термического расширения материалов фотоэлектрических модулей, воздействие УФ-излучения, недостатки конструкции соединительных элементов, что приводит к уменьшению электрических характеристик в среднем на 1% в год. Проведены ускоренные испытания солнечных элементов с КПД 21 %, что позволило установить: фоточувствительность образцов, модель деградации электрических характеристик, заключающаяся в линейном уменьшении фототока и увеличении последовательного сопротивления. На примере проекта стационарной ФЭС, устанавливаемой под углом 35° к горизонту и азимутом 12° , установленной мощностью 140 кВт, разработана модель выработки электроэнергии и периода окупаемости.

Степень использования: Полученные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках учебной дисциплины «Электронные системы на возобновляемых источниках энергии».

Область применения: электронные системы на возобновляемых источниках энергии.

SUMMARY

Zhidiliaeva Natalia Ivanovna

Distribution of Predominant Solar Power Plant Degradation Mechanisms Analyses Based on their Geographical Location

Keywords: photo power plant (PPP), photovoltaics, degradation

The object of study: development and analysis of predominant climatic factors determining the changes in the PPP electrical characteristics.

The results and novelty: the scientific novelty and significance of the results are the primary factors of PPP degradation use, determination of PPP modules manufacturing technological features influence on their electrical characteristics change over time, PPP potential detection provided that the installed capacity is up to 150 kW in the climatic conditions of the Republic of Belarus.

The basic mechanisms of PPP degradation are established: mismatch of thermal expansion coefficient of photovoltaic module materials, exposure to UV radiation, connecting elements design defects leading to a decrease in electrical characteristics by an average of 1% per year. Accelerated tests of solar cells with an efficiency of 21 % were carried out, which made it possible to establish the following: the photosensitivity of samples, electrical characteristics degradation model consisting in a linear decrease in the photocurrent and an increase in the series resistance. A model of power generation and payback period were developed on the example of the project of a stationary PPP with a capacity of 140 kW, installed at an angle of 35° to the horizon and an azimuth of 12°.

Degree of use: the results are implemented into the educational process at the Information and Computer-aided Systems Design Department of the educational establishment “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics” as a curriculum part curriculum of the educational discipline “Electronic Systems on Renewable Energy Sources”.

Sphere of application: electronic systems based on renewable energy sources.