

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

*На правах рукописи*

УДК 621.3.049.77

ФЕЩЕНКО  
Артем Александрович

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ  
СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ НА ОСНОВЕ  
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание степени  
магистра технических наук

по специальности 1-38 80 04 Технология 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 кафедры проектирования информационно-компьютерных систем, декан факультета инновационного и непрерывного обучения учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **ПОЛУБОК Владислав Анатольевич**,  
кандидат технических наук, ведущий инженер-программист Республиканского унитарного предприятия «Центр информационных технологий Национального статистического комитета Республики Беларусь»

Защита диссертации состоится «26» июня 2018 года в 10<sup>00</sup> 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**

В связи с увеличением потребления электроэнергии и ограниченности запасов традиционных источников энергии – угля и нефти, появляется необходимость разработки и применения альтернативных источников энергии. Среди разнообразия экологически чистых источников энергии, преобразование солнечного излучения в электричество представляется наиболее привлекательным и перспективным с точки зрения энергетических технологий будущего. Полное количество солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли за неделю, превышает энергию всех мировых запасов нефти, газа, угля и урана.

По данным Европейской ассоциации фотоэнергетики и Greenpeace, к концу 2030 года мощность фотоэлектрических систем в мире достигнет 1800 ГВт. Таким образом, солнечная энергия сможет обеспечивать электричеством более 4 миллиардов человек и создать миллионы рабочих мест.

Способность точно прогнозировать выработку электроэнергии с течением времени имеет жизненно важное значение для роста фотоэлектрической промышленности. Точная оценка снижения мощности с течением времени, также известная как скорость деградации, имеет важное значение для прогнозирования объема вырабатываемой энергии. В финансовом отношении деградация фотоэлектрической системы важна, поскольку более высокая степень деградации приводит к уменьшению вырабатываемой мощности и, следовательно, снижает будущие объемы вырабатываемой энергии. Кроме того, неточности в определенных показателях деградации приводят к увеличению финансовых рисков. Изучение преимущественных механизмов деградации посредством экспериментов и моделирования может привести к улучшению качества изготовления солнечных элементов и батарей в целом.

Для дальнейшего развития солнечной энергетики необходимо, с одной стороны, обеспечить высокую надёжность солнечных батарей, что позволит увеличить срок службы солнечных станций и снизить затраты на производство солнечной энергии, с другой стороны, необходимо внедрять технологии, которые могли бы за сравнительно небольшое время обеспечить масштабное производство для покрытия больших площадей.

Основным направлением диссертационной работы являлась разработка метода прогнозирования, который позволял бы за более короткий период времени дать ответ на вопрос, о поведении функциональных параметров экземпляра в будущем при длительном функционировании солнечной батареи.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Падение мощности вырабатываемой энергии солнечными модулями проявляется в виде постепенного ухода одного или нескольких функциональных параметров за пределы нормы. Известно, что для солнечных батарей деградация параметров является процессом постепенным, поэтому проблема повышения пара-

метрической надежности солнечных батарей является актуальной. Постепенные отказы могут быть предсказаны, и, следовательно, могут быть отобраны солнечные батареи с требуемой параметрической надежностью. Решение этой задачи актуально для случаев, когда заданная наработка солнечных батарей является длительной, сравнимой с указанной в технической документации и выше.

В настоящее время в мировой и отечественной практике прогнозирование постепенных процессов деградации солнечных батарей является важной научной задачей современной фотовольтаики и имеет большое практическое значение, так как открывает возможность использования полученных результатов для прогнозирования объема вырабатываемой электроэнергии солнечными батареями.

### **Степень разработанности проблемы**

Разработка имитационной модели деградации фотоэлектрических панелей на основе поликристаллического кремния осуществлялось на основе литературного обзора работ российских и белорусских ученых: В.Ф. Гременок, М.С. Тиванов, В.Б. Залесский, Н.Н. Баранов, Бариков М.Я, А.И. Непомнящих, Б.А. Красин, И.Е. Васильева, И.А. Елисеев, В.П. Еремин, В.А. Федосенко, В.В. Синицкий, а так же зарубежных авторов: А. Гётцбергер, Ф. Кастен, Т. Юнг, Ф. Фапенхольф, М. Гаразо, А.Хеналь, З. Флек и др.

В современной технической литературе все больше внимания уделяется исследованиям параметров деградации солнечных панелей на основе поликристаллического кремния. Однако механизмы влияния разнообразных климатических факторов изучены не до конца. Предложенное исследование направлено на установление преимущественных факторов деградации СБ на основе поликристаллического кремния

### **Цель и задачи исследования**

Целью работы является выявление основных процессов, приводящих к деградации выходных характеристик солнечных элементов и батарей на основе анализа данных, полученных экспериментальным путем, которые бы позволили оценить влияние конструктивно-технологических параметров и условий эксплуатации на деградацию солнечных элементов и длительность жизненного цикла солнечных электростанций.

Поставленная цель работы определяет **следующие основные задачи:**

1. Провести обзор моделей солнечных элементов на основе полупроводников, проанализировать данные о параметрах деградации солнечных элементов и батарей.
2. Исследовать характеристики солнечных элементов и изменение их электрических параметров в условиях имитационного моделирования климатических условий влияющих на деградацию СБ.
3. Сравнить результаты расчета и измерения в различных условиях, а также сравнение полученных результатов с результатами, имеющимися в литературе.

## **Область исследования**

Содержание диссертации соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-38 80 04 «Технология приборостроения».

## **Теоретическая и методологическая основа исследования**

В основу диссертации легли работы белорусских и зарубежных ученых в области исследования солнечных элементов в составе солнечных батарей.

*Информационная база* исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

## **Научная новизна**

*Научная новизна:* состоит в разработке методик ускоренных испытаний солнечных элементов и батарей на основе поликристаллического кремния, что позволит предсказать выходные характеристики солнечных элементов и батарей в начальный момент времени с прогнозом на 20 лет.

*Теоретическая значимость* работы заключается в детальном анализе деградационных процессов фотоэлектрических панелей на основе поликристаллического кремния.

*Практическая значимость* прогнозирования деградации солнечных панелей на основе поликристаллического кремния, позволит оптимизировать процесс изготовления и внедрения солнечных панелей как одного из видов источника энергии для промышленности.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Имитационная модель деградации электрических характеристик солнечных батарей и модулей на основе поликристаллического кремния, объясняющих влияние термического и термоциклического воздействия на выходные параметры солнечных модулей.

2. Методика прогнозирования постепенной деградации солнечных батарей, основанная на использовании реакции функциональных параметров на воздействие имитационных факторов: температуры и влаги, что позволяет прогнозировать уменьшение выработки электроэнергии модулями с течением времени.

3. Экспериментальные данные ускоренных испытаний солнечного модуля УФ-излучением, показывающие скорость деградации фототока солнечного модуля, за счёт изменения спектра пропускания инкапсулирующего слоя, что позволяет прогнозировать выходные характеристики солнечных модулей с течением времени.

## **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 54-ой научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, Беларусь, 2018 г.), 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**

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 5 печатных работах. Из них 2 статьи в сборниках материалов научных конференций и 3 статьи в международных научно-практических конференциях.

Общий объем публикаций по теме диссертационной работы составляет 0,8 авторского листа.

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

**В первой главе** приведен обзор разновидностей солнечных элементов на основе полупроводников, а также строение солнечных панелей на основе монокристаллического и поликристаллического кремния р-типа. Проанализированы темпы деградации солнечных батарей в различных климатических условиях.

**Во второй главе** проведен анализ современных методов и средств прогнозирования надежности солнечных батарей. Применен метод индивидуального прогнозирования для оценки надежности СБ

**В третьей главе** было реализовано имитационное моделирование параметров деградации СБ на основе поликристаллического кремния, основанное на обширных исследованиях, которые касаются механизмов деградации.

**В приложении** представлены акт внедрения, копии публикаций, справка по антиплагиату, графический материал.

Общий объем диссертационной работы составляет 98 страниц. Из них 72 страниц основного текста, 37 иллюстраций на 33 страницах, 2 таблицы на 2 страницах, библиографический список из 73 наименования на 6 страницах, список собственных публикаций соискателя из 5 наименований на 1 странице, 4 приложений на 26 страницах

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено использование солнечного излучения как альтернативного источника энергии и перспективы развития данного направления, указаны основные направления исследований, проводимых по данной тематике, 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** были приведены структурированные показатели параметров деградации полученные из литературных источников: Показаны нескольких основных причинах деградации солнечных батарей, выпущенных в 2000-х и ранних 2010-х годах, а именно:

- 1) клеточные межсоединения становятся более резистивными, из-за коррозии и усталости соединительных лент и соединений пайки;
- 2) создается зависимость между теплом и сопротивлением, что увеличивает тяжесть температурного циклирования и приводит к еще более высокому сопротивлению за счет нагревания
- 3) ухудшение пропускания солнечного излучения к СЭ за счет деградации инкапсулирующего слоя СБ.

Аналогичным образом, в исследованиях Национальной лаборатории возобновляемой энергии (NREL), показало, что основными причинами деградации солнечной батареи в полевых условиях были вызваны поломкой элемента/межсоединения (40,7%) и коррозией (45,3%).

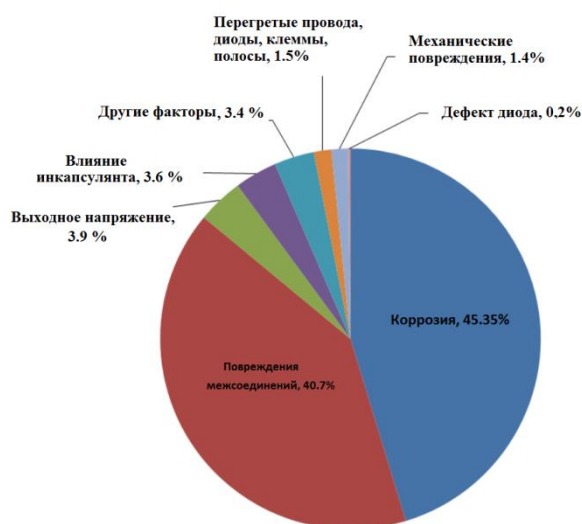


Рисунок 1 – Основные причины деградации солнечных батарей

Поскольку кремниевые солнечные элементы являются наиболее разработанной технологией, существуют большие объёмы данных по испытаниям превыша-

ющих показатель в 20 лет. За этот период неоднократно была зафиксирована повышенная скорость деградации всей системы по сравнению с деградацией СЭ. Коэффициент деградации элемента был незначительным: от 0,8 до 1 % в год, а скорость деградации системы в целом была около 2 % в год

**Во второй главе** было установлено, что значительная доля отказов СБ обусловлена дефектами, возникающими на различных стадиях технологического процесса производства.

При воздействии на СБ эксплуатационных или испытательных нагрузок создаются условия, в которых наличие дефектов приводит к возникновению или ускорению физико-химических процессов, приводящих к отказам.

Отказы СБ могут иметь как внезапный, так и постепенный характер. В отличие от внезапных отказов, суть которых определена документом, постепенные отказы, обусловленные монотонными изменениями функциональных параметров во времени, развиваются постепенно и могут быть предсказаны. Следовательно, могут быть отобраны СБ с требуемой параметрической надежностью.

Основными причинами, вызывающими возникновение постепенных отказов СБ, являются:

- производственный разброс функционального параметра, обусловленный чисто технологическими причинами;
- уход функционального параметра от типового значения из-за процессов деградации (старения), обусловленными естественными физико-химическими процессами, происходящими в структуре СБ и контактных соединениях;
- отклонение функционального параметра от типового значения под воздействием дестабилизирующих факторов (температуры, влажности и др.).

Ввиду наличия производственного (технологического) разброса функциональный параметр СБ уже может заметно отличаться от типового значения. В процессе эксплуатации, а также под воздействием дестабилизирующих факторов может произойти дальнейшее изменение этого параметра. В итоге его значение может достигнуть критической границы и затем выйти за нее. В результате наступит постепенный отказ.

Примерно 80 процентов отказов происходит в виде постепенного ухода функциональных параметров за пределы установленных норм, т.е. в виде постепенных отказов. В отличие от внезапных отказов, постепенные отказы, могут быть предсказаны и, следовательно, спрогнозированы. Это позволит организовать процесс отбора экземпляров с требуемой параметрической надежностью на интересующий будущий момент времени.

Была предложено для прогнозирования параметрической надежности СБ использовать метод имитационных воздействий. Показана целесообразность применения этого метода на этапах, когда СБ уже изготовлены: выходной отбраковочный контроль у изготовителя, входной контроль, выполняемый потребителем.

Определена общая концепция проведения исследований. Она включила комплекс теоретических и экспериментальных работ, основными из которых являются следующие:



– теоретическое обоснование возможности использования температуры в качестве имитационного фактора, по реакции на воздействие которого можно в начальный момент времени спрогнозировать постепенный отказ и дать заключение о параметрической надежности конкретного экземпляра СБ для заданной наработки;

– экспериментальное установление статистической аналогии (корреляции) между изменениями функциональных параметров, возникающими при длительной наработке и обратимыми изменениями этих параметров, вызываемыми действием имитационного фактора в начальный момент времени ( $t=0$ );

– экспериментальное подтверждение гипотезы о возможности использования температуры в качестве имитационного воздействия;

– определение области практического применения температуры как имитационного воздействия в задачах индивидуального прогнозирования параметрической надёжности СБ;

Задачи по прогнозированию надежности можно разбить на два этапа.

1. Выбор модели прогнозирования. В качестве моделей прогнозирования используют математические выражения, с помощью которых будут определяться прогнозные значения функционального параметра  $y_j$ -го экземпляра.

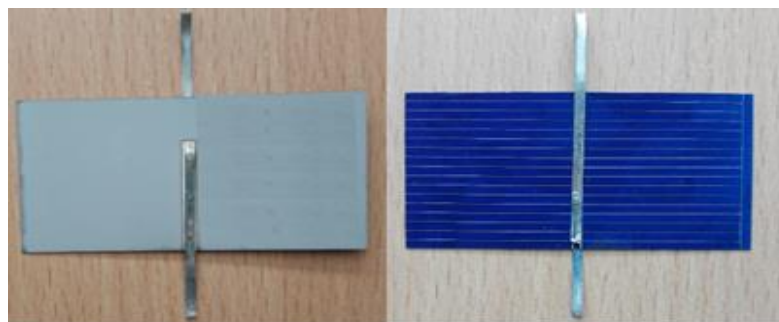
2. Экстраполяция процесса. Состоит в предположении, что за пределами предыстории функциональный параметр  $y$  будет изменяться по такому же закону, как и на участке предыстории. Заканчивается экстраполяция расчетом с помощью выбранной модели прогнозирования прогнозного значения  $y$  для  $j$ -экземпляра. При необходимости оценивается достоверность прогнозирования. Обычно находится доверительный интервал для величины  $y^{(j)}(t_{пр})$ , т.е. кроме точечного прогноза указывают также интервальный прогноз.

**В третьей главе** установлено, что термические воздействия на солнечный элемент обусловлена конструкцией межсоединений СЭ. Термический цикл происходит по крайней мере один раз в день в самом модуле.

В областях, где интенсивность облучения может резко меняться в течение дня, модуль может испытывать тысячи термических циклов на протяжении всей своей жизни. Термический цикл в первую очередь затрагивает районы, где есть несоответствия в коэффициенте теплового расширения (КТР). Поскольку материалы растягиваются и сжимаются в разных количествах, области, где они связаны друг с другом становятся стрессовыми.

Существует четырехкратная разница между КТР кремниевой СЭ и металлическими лентами которые используются в СЭ. Ленточная связь должна быть тщательно разработана и изготовлена для обеспечения надежного модуля.

Лента припаивается вдоль длины СЭ (рисунок 2). Лента должна быть припаяна к элементу при повышенных температурах. Когда солнечный элемент остывает до температуры окружающей среды, несовпадение коэффициента теплового расширения между материалами приводит соединения в стресс. Этот процесс должен выполняться в жестких параметрах, поскольку пайка может вызвать термически индуцированные микротрещины.



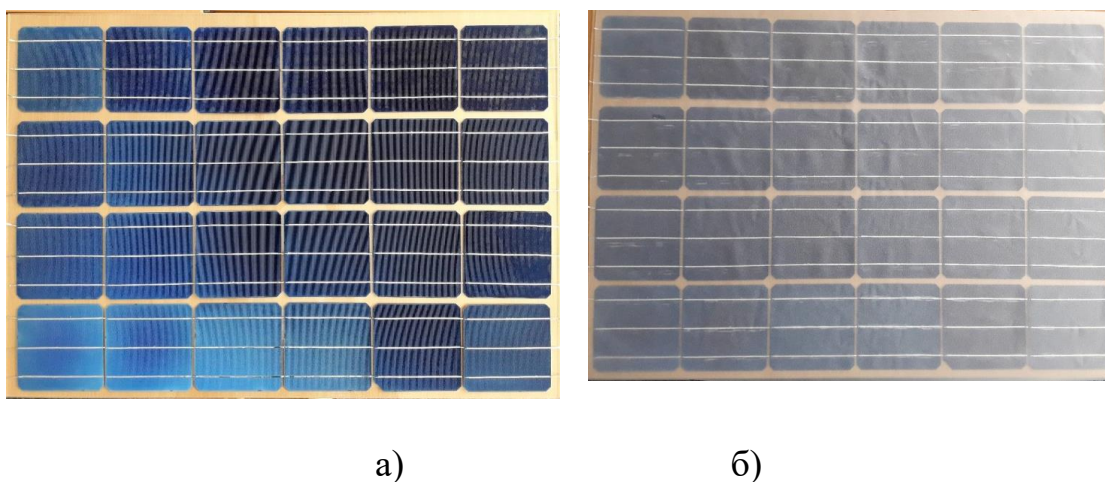
**Рисунок 2 – Солнечный элемент с припаянными контактными дорожками**

В дальнейшем микротрещины, которые формируются под лентой, могут привести к полному разрушению контактной площадки (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Состояние контактной площадки после термических циклов**

Модули используют слои инкапсулянта для удержания остальных слоев вместе, электрически изолируя элементы и защищая от определенных воздействий окружающей среды (рисунок 4). Многие инкапсулянты имеют в составе УФ-поглотители, которые являются фотоактивными и блокируют разрушительное солнечное излучение. Но к сожалению, защитный слой имеет конечный срок службы, потому что он подвержен фототермической окислительной деградации с течением времени. Снижение защитного экранирования влияет выходные характеристики всей установки

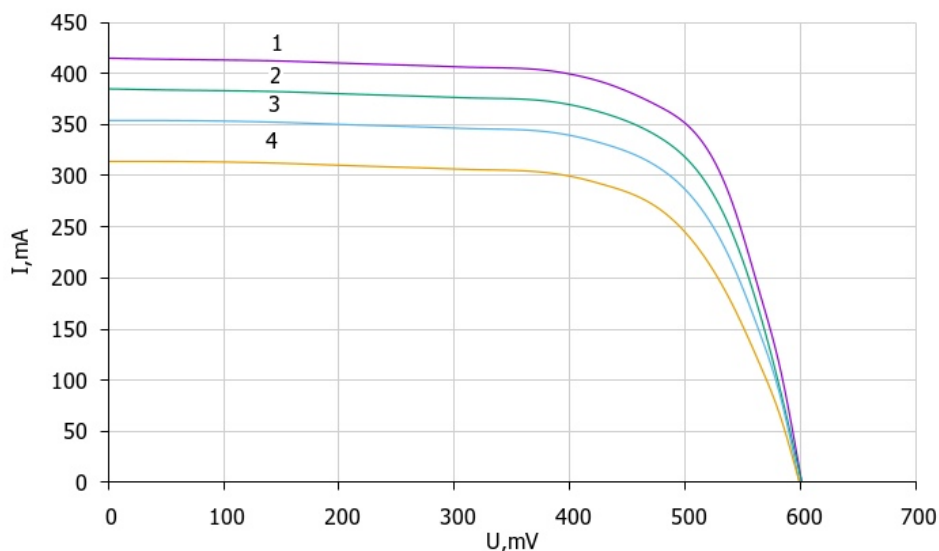


**а – инкапсулянт до экспериментов, б – инкапсулянт после экспериментов**

**Рисунок 4 – Исследуемый солнечный модуль**

Инкапсулянт расположен между стеклом и солнечным элементом и между солнечным элементом и нижним слоем. Поскольку свойства инкапсулянта могут изменяться в течении времени, они влияют на общее количество света, которое пропускается и, следовательно, на количество произведенной энергии. Это визуально смотрится как «пожелтение»; в крайних случаях инкапсулянт может превращаться в янтарный коричневый цвет. Как правило, пожелтение инкапсулянтов вызвано фототермической генерацией радикалов внутри пластика.

Были проведены ускоренные испытания инкапсулянта при контролируемой температуре  $80^{\circ}\text{C}$ . Важным следствием этого эксперимента является, выявление зависимости пропускной способности инкапсулирующего слоя от времени проведения испытаний. Из рисунка 5 видно, чем дольше находится СБ в климатической камере, тем ниже у нее  $I_{sc}$ , а коэффициент заполнения остается неизменным. Исходя из этих наблюдений можно сделать вывод, что деградация инкапсулирующего слоя никак не влияет на характеристики солнечного элемента, а ухудшения параметров солнечной батареи, связано с падением пропускной способности инкапсулирующего слоя.



*1 – ВАХ солнечного элемента до эксперимента; 2 – после 600 часов эксперимента; 3 – после 1500 часов эксперимента; 4 – после 3000 часов эксперимента*

**Рисунок 5 – Влияние деградации инкапсулирующего слоя на выходные характеристики солнечной батареи**

Полученные данные должны учитываться при имитационном моделировании параметров деградации солнечных батарей на основе поликристаллического кремния. Так как они влияют на количество вырабатываемой энергии солнечными батареями и позволяют спрогнозировать КПД в текущий момент времени с прогнозом на 20 лет.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

## Основные научные результаты диссертации

1. Кремниевые солнечные элементы являются наиболее разработанной технологией и самыми распространёнными элементами для СБ, в связи с этим были проведены большие объёмы экспериментов над ними. За время испытаний неоднократно была зафиксирована повышенная скорость деградации всей системы по сравнению с деградацией СЭ. Коэффициент деградации элемента был незначительным: от 0,8 до 1 % в год, а скорость деградации системы в целом была около 2% в год.

2. Была обнаружено, что постепенная долговременная деградация СБ коррелировала линейно с воздействием ультрафиолета. Так же было установлено, что со временем увеличивалось последовательное сопротивление СМ и как следствие уменьшение коэффициента заполнения модуля (FF), что подтвердили аналогичные испытания. При этом взаимосвязи внешнего вида поликристаллических СЭ с электрическими характеристиками обнаружено не было.

3. Климатические факторы оказывают значительное влияние на коррозию металлов, а следовательно и на деградацию СБ. Водяной пар диффундирует через заднюю стенку модуля и образуется влага. Это приводит к ослаблению связей контактов и алюминиевой металлизации на задней стороне. Это, в свою очередь, уменьшает возможность переноса заряда в конечном счете снижая производительность модуля, также это может ускорить коррозию металла и привести к снижению эффективности. В конце концов влага может изменять скорость поверхностной рекомбинации

4. Модули используют слои инкапсулянта для удержания остальных слоев модуля вместе, свойства инкапсулянта могут меняться с течением времени, сильно влияя на общее количество света, которое поглощается и, следовательно, на количество произведенной энергии.

## 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. Фещенко, А.А. Экономическое обоснование использования солнечных электростанций /А.А. Фещенко, А.Н. Марков, Н.И. Жиделяева // Материалы работы 54-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск: БГУИР, 7 – 11 мая 2018 – с.91 – 92.

2. Фещенко, А.А. Прогнозирование деградации солнечных элементов/ А.Н.

Марков, А.А. Фещенко, Е.Г. Домбровский // Материалы работы 54-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск: БГУИР, 7–11 мая 2018 – с. 56 – 57

3 Хорошко, В.В. Световая деградация электрических характеристик поликристаллических солнечных элементов / Хорошко В.В., Фещенко А.А., Марков А.Н., Домбровский Е.Г. // II Международная научно-практическая конференция. Актуальные исследования и инновации. – Самара, 2018 – с.13 – 16.

4 Хорошко, В.В. Влияние ошибок при пайке солнечных элементов на скорость деградации их электрических характеристик / Хорошко В.В., Фещенко А.А., Марков А.Н., Голубов Н.А., Домбровский Е.Г., Жидиляева Н.И. // Международная конференция «Актуальные вопросы современных исследований». – Омск: Научный центр «Дельта», 11 июня 2018 (в печати)

5 Хорошко, В.В. Потенциал применения солнечных электростанций в климатических условиях Республики Беларусь / Хорошко В.В., Фещенко А.А., Марков А.Н., Голубов Н.А., Домбровский Е.Г., Жидиляева Н.И. // XXVI Международная научно-практическая конференция «Вопросы современных научных исследований». – Омск: Научный центр «Орка», 19 июня 2018 (в печати)

## РЭЗІЮМЭ

**Фешчанка Арцёма Аляксандравіча**

### **Імітацыйнае мадэляванне дэградацыі сонечных батарэй на аснове полікрышталічнага крэмнія**

Ключавыя словы: сонечная батарэя, мадэль, мадэляванне.

**Мэта працы:** мэта работы заключалася ў выяўленні асноўных працэсаў, якія прыводзяць да дэградацыі сонечных элементаў і батарэй на аснове аналізу дадзеных атрыманых практычным шляхам, і пабудове мадэляў, якія б дазволілі ацаніць уплыў канструктыўна-тэхналагічных параметраў і ўмоў эксплуатацыі на дэградацыю сонечных элементаў і працягласць жыццёвага цыклу сонечных электрастанцый.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** кліматычныя фактары аказваюць значны ўплыў на карозію металаў і гідроліз пластмас. Вадзяной пар дыфундуе праз заднюю сценку тыповага модуля і ў EVA (этиленвинилацетат) утворацца інкапсулянт. Гэта прыводзіць да паслаблення сувязяў кантактаў і алюмініевай металізацыі на заднім боку. Гэта, у сваю чаргу, памяншае магчымасць пераносу зараду ў канчатковым рахунку зніжаючы прадукцыйнасць модуля, таксама гэта можа паскорыць карозію металу і прывесці да зніжэння эфектыўнасці. У рэшце рэшт, хоць вада не лёгка рассейваецца ў крэмнію, яна можа змяняць хуткасць павярхоўнай рэкамбінацыі

Крамянёвыя сонечныя элементы з'яўляюцца найбольш распрацаванай тэхналогіяй і самымі распаўсюджанымі элементамі для СБ, у сувязі з гэтым былі праведзены вялікія аб'ёмы эксперыментаў над імі. За час выпрабаванняў неаднаразова была зафіксавана падвышаная хуткасць дэградацыі ўсёй сістэмы ў параўнанні з дэградацыяй СЭ. Каэфіцыент дэградацыі модуля быў нязначным: ад 0,8 да 1% у год, а хуткасць дэградацыі сістэмы ў цэлым была каля 2% у год.

**Ступень выкарыстання:** Атрыманыя вынікі ўкаранёны ў навучальны працэс на кафедры праектравання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм ўстанова адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі» ў навучальны курс «Электронныя сістэмы на аднаўляльных крыніцах энергіі».

**Вобласць прымянення:** энергетыка Рэспублікі Беларусь, аднаўляльныя крыніцы энергіі.

## РЕЗЮМЕ

**Фещенко Артема Александровича**

### **Имитационное моделирование деградации солнечных батарей на основе поликристаллического кремния**

**Ключевые слова:** солнечная батарея, модель, моделирование.

**Цель работы:** Цель работы заключалась в выявлении основных процессов, приводящих к деградации солнечных элементов и батарей на основе анализа данных полученных практическим путем, и построении моделей, которые бы позволили оценить влияние конструктивно-технологических параметров и условий эксплуатации на деградацию солнечных элементов и длительность жизненного цикла солнечных электростанций.

**Полученные результаты и их новизна:** Климатические факторы оказывает значительное влияние на коррозию металлов. Водяной пар диффундирует через заднюю стенку типичного модуля и в EVA (этиленвинилацетат) образуется инкапсулянт. Это приводит к ослаблению связей контактов и алюминиевой металлизации на задней стороне. Это, в свою очередь, уменьшает возможность переноса заряда в конечном счете снижая производительность модуля, также это может ускорить коррозию металла и привести к снижению эффективности. В конце концов, хотя вода не легко рассеивается в кремнии, она может изменять скорость поверхностной рекомбинации.

Кремниевые солнечные элементы являются наиболее разработанной технологией и самыми распространёнными элементами для СБ, в связи с этим были проведены большие объёмы экспериментов над ними. За время испытаний неоднократно была зафиксирована повышенная скорость деградации всей системы по сравнению с деградацией СЭ. Коэффициент деградации модуля был незначительным: от 0,8 до 1 % в год, а скорость деградации системы в целом была около 2% в год.

**Степень использования:** 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»;

**Область применения:** энергетика Республики Беларусь, возобновляемые источники энергии.

## SUMMARY

**Feshchenko Artem Alexandrovich**

### **Simulation modeling of degradation of solar cells based on polycrystalline silicon**

**Keywords:** solar battery, model, modeling.

**Purpose of the work:** The purpose of the work was to identify the main processes that lead to the degradation of solar cells and batteries based on the analysis of data obtained in a practical way, and to construct models that would allow us to assess the effect of structural and technological parameters and operating conditions on the degradation of solar cells and the duration of the life cycle solar power stations.

**The results obtained and their novelty:** Climatic factors has a significant effect on the corrosion of metals and the hydrolysis of plastics. Water vapor diffuses through the back wall of a typical module and an encapsulant is formed in EVA (ethylene vinyl acetate). This leads to a weakening of the bonds of contacts and aluminum metallization on the back side. This, in turn, reduces the possibility of charge transfer, ultimately reducing the performance of the module, also it can accelerate metal corrosion and lead to a decrease in efficiency. After all, although water does not easily dissipate in silicon, it can change the rate of surface recombination

Silicon solar cells are the most developed technology and the most common elements for the SAT, in connection with this, large volumes of experiments were carried out on them. During the tests, the increased rate of degradation of the entire system was repeatedly recorded, compared with the degradation of the solar cell. The coefficient of degradation of the module was insignificant: from 0.8 to 1% per year, and the degradation rate of the system as a whole was about 2% per year.

**Degree of use:** The results are introduced into the educational process at the Department of Information Systems Design of the Educational Establishment «Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics» in the training course «Electronic Systems on Renewable Energy Sources» ;

**Scope:** energy of the Republic of Belarus, renewable energy sources.