

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

*На правах рукописи*

УДК 620.92+621.382

**СЮМАК  
Илья Юрьевич**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ ДВУХСТОРОННИХ  
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание степени  
магистра технических наук

по специальности 1-38-80-04 Технология приборостроения

Минск 2019

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

Научный руководитель: **ХОРОШКО Виталий Викторович**,  
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **ДРИГО Александр Леонидович**,  
директор унитарного предприятия «ИЦТ Горизонт»

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

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. Развитие технологий добычи труднодоступных месторождений, с учётом постоянно растущего энергопотребления, позволят лишь на незначительный промежуток времени отодвинуть будущие проблемы и к концу XXI века ожидается существенное удорожание традиционных источников энергии.

В то же самое время существует огромный источник экологически чистой энергии, использование которой может позволить человеку решать значительное количество задач по обеспечению энергетической и экологической безопасности. Таким источником энергии является Солнце. Даже для регионов Беларуси годовое количество солнечной энергии, падающей на горизонтальную площадку находится на уровне  $1180 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ .

Фотовольтаический способ преобразования солнечного излучения признан одним из наиболее перспективных способов получения экологически чистой электроэнергии. Создание тонкопленочных 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 солнечных батарей постоянно снижается можно предполагать, что в ближайшее время по уровню себестоимости данный вид энергии приблизится к традиционным.

На сегодняшний момент существует большое количество работ по методикам оценки надежности, испытаниям, как на этапе производства, так и на этапе эксплуатации и другим аспектам, позволяющим оценить эффективность применения солнечных электростанций (СЭС) в целом. Значительную информацию исследователи имеют возможность получать с помощью программного обеспечения, интегрированного СЭС. Среди основных авторов на территории СНГ стоит отметить работы Ж.И. Алфёрова, Е.И. Терукова, В.П. Афанасьева, А.А. Шерченкова и др. Среди зарубежных авторов: V.J. Strawberry, P. Yang, Shmidt J и др.

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 гелиоэнергетического потенциала Республики Беларусь, определение параметров деградации солнечных модулей, установление влияния технологических особенностей изготовления модулей на общую скорость деградации СЭС.

### **Актуальность темы исследования**

В наземных условиях уровень излучения лишь изредка превышает  $1500 \text{ Вт/м}^2$ , а в условиях Республики Беларусь в среднем не достигает и  $1200 \text{ Вт/м}^2$ . В то же время СЭ могут работать в условиях гораздо большей освещенности. Концентрация солнечной энергии позволяет снизить площадь солнечных панелей, а применение двухсторонних СЭ получать электроэнергию и от отраженного от поверхности Земли света. Если СМ изготовлен из высококачественных СЭ на основе монокристаллического кремния, то увеличение уровня освещенности приводит к пропорциональному увеличению тока короткого замыкания ( $I_{кз}$ ) и незначительному росту напряжения холостого хода ( $U_{oc}$ ) при неизменном значении коэффициента заполнения ВАХ ( $ff$ ).

В случае поликристаллических СЭ существует несколько факторов, снижающих КПД: рекомбинация на границах зерен; наличие примесей железа, уменьшающих время жизни неосновных носителей заряда. Поэтому, при проектировании СМ, работающих с концентраторами, необходимо знать процессы рекомбинации в полупроводниковых структурах.

Одной из важнейших тенденций развития являются постоянное повышение КПД солнечных элементов (СЭ) и применения новых материалов. Надежность солнечных панелей и стабильность их характеристик на протяжении всего периода эксплуатации является важнейшей составляющей прогресса фотовольтаики. При увеличении КПД происходит увеличение плотности тока, что предъявляет повышенные требования к качеству паяных соединений, а наличие ошибок пайки может привести к преждевременной деградации электрических характеристик СМ или его выходу из строя.

Все указанные факторы необходимо учитывать при расчете окупаемости установки СЭС в Республике Беларусь. Разработка методик, учитывающих деградационные процессы также является актуальной задачей.

### **Степень разработанности проблемы**

В настоящее время в Республике Беларусь не существует единой системы сертификации составляющих СБ 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.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертации является разработка методик ускоренных испытаний двухсторонних СЭ, а также определение параметров деградации электрических характеристик, необходимых для долгосрочного прогнозирования параметрической надежности элементов и модулей.

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

– экспериментальное установление предельных режимов ускоренных испытаний СЭ;

– определение параметров деградации солнечных модулей, состоящих из двухсторонних элементов;

– установление влияния технологических особенностей изготовления модулей на общую скорость деградации СЭС.

**Объектом** исследования являются двухсторонние солнечные элементы и панели.

**Предметом** работы являются электрические характеристики СЭ и СМ.

**Область исследования.** Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-38 80 04 Технология приборостроения

#### **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 СЭС в РБ.

**Методологической основой исследования** являются публикации отечественных и зарубежных исследователей полупроводниковых СЭ/СМ, 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 СЭС. В основу изложения научных результатов положена гипотетико-дедуктивная схема научного исследования.

**Информационная база** исследования сформирована на основе открытой информации, предоставляемой производителями СЭС, нормативно-правовых документов, сведений из ресурсов Интернет, а также материалов научных изданий, конференций и семинаров.

**Инструментальной базой** исследований являются пакеты прикладных программ, приложения серверного программного обеспечения систем обеспечения безопасности, системы управления базами данных *Postgre SQL*, *Microsoft SQL Server*, программные средства управления и мониторинга систем.

**Научная новизна и значимость полученных результатов** заключается в определении световой деградации двухсторонних СЭ, определении влияния технологических ошибок изготовления СМ на деградацию их электрических характеристик, разработка методики оценки окупаемости СЭС.

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

1. Экспериментально установлены предельные режимы ускоренных испытаний элементов и модулей: автомодельность эксперимента соблюдается при температурах испытаний 130-150 °С и одновременно при освещении в пределах 2500-3000 Вт/м<sup>2</sup>, что позволяет достигнуть ускоряющего коэффициента ~ 230.

2. Экспериментально установлены параметры световой деградации двухсторонних СЭ на основе поликристаллического кремния: при увеличении уровня освещенности от 500 до 2000 Вт/м<sup>2</sup> происходит линейное уменьшение КПД с 12,5 до

10,4 % для лицевой стороны из-за рекомбинации носителей заряда на границах зёрен, что позволяет учитывать эти данные при прогнозировании выработки электроэнергии.

3. Установлено влияние систематического термоциклирования для элементов и модулей: возникновение в результате испытаний до 50% потери площади пайки контактных площадок на лицевой или оборотной стороне любого СЭ в модуле приводит к ускорению деградации электрических характеристик модуля за счёт уменьшения коэффициента заполнения ВАХ до 4,5 раз.

**Теоретическая значимость** диссертации заключается в том, что в ней предложены методы и подходы к долговременному прогнозированию надежности СЭ и СМ.

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

#### **Апробация и внедрение результатов исследования**

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

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 55-ой научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, Беларусь, 2019 г.), на международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современных исследований» (Омск, Россия, 2019).

#### **Публикации**

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в четырех опубликованных работах общим объемом 0,8 авторского листа.

#### **Структура и объем работы**

Работа состоит из введения, трёх глав и заключения, библиографического списка. Общий объем диссертации – 89 страниц. Работа содержит 35 рисунков и 10 таблиц. Библиографический список включает 110 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено использования 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** проведен анализ моделей солнечных элементов. Потенциал развития солнечной энергетики заключен в использовании тонкопленочной технологии, однако, препятствием на пути массового внедрения этой технологии является, в том числе, не высокая надёжность солнечных батарей этого типа. Предельное время жизни солнечного элемента обусловлено деградацией основного барьера, однако существует ряд эффектов, которые выводят из строя батарею существенно раньше.

Обобщена история деградации с использованием полевых тестов, зарегистрированных в литературе период 1975-2019 гг. Стоит отметить, что достижения, обусловленные постоянным повышением КПД модулей, повысили и требования к качеству паяных соединений модулей, элементам заземления и др.

Несмотря на прогресс, достигнутый за последнее десятилетие, некоторые интересные вопросы, такие, как линейность и точное воздействие климата, не были до конца решены. Тем не менее в последние годы быстро растет число публикаций, посвященных долгосрочному прогнозированию, что подтверждает данной темы.

Во **второй главе** были проведены испытания изготовленных фотоэлектрических (солнечных) модулей. Для изготовления солнечных модулей(СМ) использовались следующие типы солнечных элементов(СЭ): класса Б на основе поликристаллического кремния размерами  $52 \times 26 \text{ мм}^2$  (рисунок 1); класса А на основе монокристаллического кремния размерами  $156 \times 156 \text{ мм}^2$ . Для монокристаллического кремния образцы были получены скрайбированием без шунтирования до размеров  $52 \times 52 \text{ мм}^2$ . Для обоих типов СЭ были изготовлены модули по 24 элемента, соединенных последовательно: таким образом, напряжение в точке максимальной мощности  $U_{mpp} \sim 12 \text{ В}$ . Пайка осуществлялась с помощью шин (медь чистоты 99,99 %, луженая оловянно-свинцовым припоем). Типичная фоточувствительность образцов на основе поликристаллического кремния показана на рисунке 1. Для СЭ на основе поликристаллического кремния все электрические характеристики были стабильными в пределах погрешности измерений за исключением тока короткого замыкания ( $I_{sc}$ ), который для условий эквивалентных АМ 1.5 изменялся в пределах

390-410 нм. Для СЭ образцов на основе монокристаллического кремния все параметры были стабильными в пределах погрешности измерений.

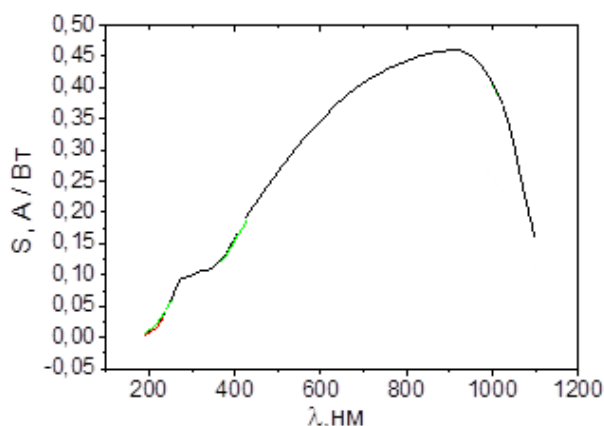
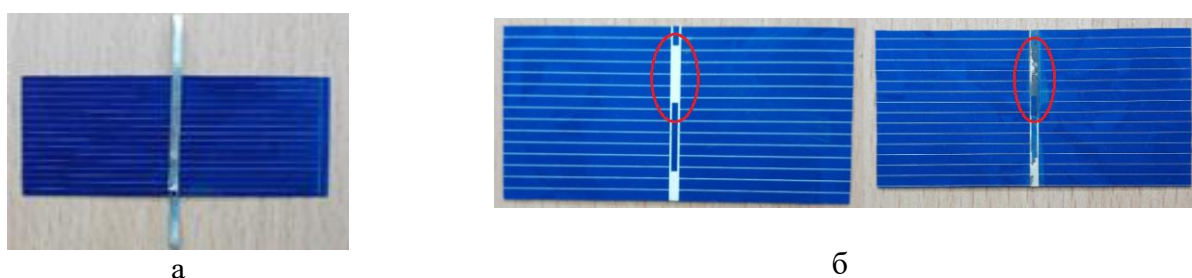


Рисунок 1. – Типичная спектральная чувствительность образцов

Установка для проведения испытаний представляла собой печь с вмонтированными галогеновыми лампами. Схема расположения ламп обеспечивала равномерный уровень освещений. Типичный спектр излучения галогеновой лампы хорошо соответствует спектру солнечного излучения. Одновременно с уровнем освещения работа галогеновых ламп обуславливала температуру внутри печи. Уровень и однородность освещенности поверхности устанавливалась по току короткого замыкания ( $I_{sc}$ ) эталонного СЭ, параметры которого измерены на имитаторе спектра солнечного излучения. Для установления предельных режимов испытаний уровень освещенности изменялся от 1000 до 3000 Вт/м<sup>2</sup>, а температура варьировалась от 120 до 180 °С. При превышении температуры 180 °С происходила частичная отпайка шин от контактных площадок СЭ (рисунок 2 а,б). При температурах до 150 °С и последующим плавным охлаждением в течении 30 минут до комнатной температуры отслоения шин от контактных площадок не наблюдалось.



а – внешний вид СЭ до испытаний; б – вид контактных площадок до испытаний(слева) и после воздействия температуры испытаний 180 °С (справа)

Рисунок 2 – Солнечные элементы 52x26 мм<sup>2</sup> до и после испытаний

Вторым фактором, ускоряющим старение СЭ, является уровень инсоляции. В процессе исследований происходило измерение ВАХ при различных эквивалент-



ных уровнях освещенности: 500, 750, 1000, 1250, 1500, 2000 Вт/м<sup>2</sup>. Уровень освещенности устанавливался по  $I_{sc}$  эталонного СЭ. Как известно, напряжение холостого хода ( $U_{oc}$ ) СЭ сильно зависит от температуры, поэтому для исключения влияния повышенной температуры применялось охлаждение образцов в процессе измерений. Температура во всех измерениях контролировалась с помощью ИК пирометра и составляла 20-22 °С. Для проведения испытаний были отобраны образцы с относительно близкими характеристиками (значение  $I_{sc}$  395-401 мА). Среднеарифметические результаты измерений электрических характеристик образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерений

$P_{пад}$ Вт/м <sup>2</sup>	$U_{oc}$ , мВ	$I_{sc}$ , мА	$ff$	$\eta$ , %
500	594	398	71,6	12,5
750	594	602	71,8	12,6
1000	596	810	72,2	12,5
1250	600	1020	71,5	12,3
1500	600	1240	65,5	11,4
2000	602	1605	58,2	10,4
3000	606	2410	52,6	9,4

Как видно из таблицы увеличение напряжения холостого хода (незначительное) и тока короткого замыкания (линейное) соответствуют теории. Основной причиной падения КПД является уменьшение коэффициента заполнения ВАХ, что объясняется большим уменьшением шунтирующего сопротивления  $R_{sh}$  по сравнению со сравнительно медленным падением последовательного сопротивления  $R_s$ . Итоговое падение КПД при увеличении освещения составило 17 %. Показано, что теоретические модели переноса носителей заряда в СЭ представлены и хорошо описывают поведение ВАХ в крайних точках, но в то же время не объясняют уменьшение коэффициента заполнения. Уменьшение  $ff$  увязано в исследуемых СЭ с наличием примесей железа в кремнии и именно этим объясняется нелинейное изменение времени жизни неосновных носителей заряда и как следствие нелинейное изменение КПД.

Дальнейшее увеличение мощности ещё более снижает КПД СЭ. Для СЭ на основе монокристаллического увеличение мощности до 3000 Вт/м<sup>2</sup> не влияет на КПД. На основании вышесказанного можно сделать вывод о нецелесообразности проведения испытаний при уровнях освещенности выше 2000 Вт/м<sup>2</sup>.

Для исследований специально были взяты СЭ класса Б для того, чтобы можно было более четко зафиксировать падение КПД при увеличении освещенности. Целью работы являлось исследование электрических характеристик поликристаллических СЭ при высоких уровнях освещенности. Было установлено, что для всех 10 образцов значения электрических характеристик в точке максимальной мощности не соответствовали теоретическим.

Ускоренные испытания показали, что в течении 150 ч при уровне освещенности эквивалентном 2000 Вт/м<sup>2</sup> и температуре 150 °С деградация СЭ составляет 4-5 %.

Современные СЭ при КПД ~ 21 % способны в условиях АМ 1,5 способны давать мощность около 5 Вт. При увеличении КПД происходит увеличение плотности тока, что предъявляет повышенные требования к качеству паяных соединений. Т.к. в процессе эксплуатации СМ они постоянно подвергаются перепадам температур, возможно появление частичной отпайки шин от контактных площадок из-за рассогласования коэффициентов термического расширения постоянного термоциклирования, что может приводить к ускорению деградации электрических характеристик.

**В третьей главе** было исследовано влияние различных вариантов отпайки на фронтальной и тыльной сторонах элементов в модуле. В эксперименте использовались монокристаллические СЭ класса А с КПД 20,7 % для фронтальной стороны и 14 % для тыльной стороны производства CNH Solar. Изначальные параметры фронтальной стороны: КПД – 20,7 %;  $U_{oc}$  – 0,65 В;  $I_{sc}$  – 9,65 А;  $U_{mpp}$  – 0,55 В;  $I_{mpp}$  – 9,16 А. Параметры тыльной стороны: КПД – 14 %;  $U_{oc}$  – 0,65 В;  $I_{sc}$  – 5 А;  $U_{mpp}$  – 0,5 В;  $I_{mpp}$  – 3,6 А. Для оценки влияния отпайки элементы подвергались испытаниям термоциклированием согласно МЭК 61215-2005. После проводились ускоренные испытания при температуре 150 °С и эквивалентном уровне освещения 2500 Вт/м<sup>2</sup>. При этом проводились периодические измерения параметров в условиях эквивалентных АМ 1,5 1000 Вт/м<sup>2</sup>. Перед измерениями проводилось двухчасовое охлаждение образцов с целью исключения появления дефектов паяных соединений за счет различных коэффициентов термического расширения шин и СЭ.

Для исключения погрешностей измерений в каждом из случаев ошибки использовалось по 10 образцов. В таблицу 2 занесены среднеарифметические значения деградации.

Таблица 2 – Среднеарифметические значения

№ п/п	Количество циклов термоциклирования	Относительное падение $P_{mpp}$ , %		
		Через 50 ч	Через 100 ч	Через 150 ч
1	0 циклов	1,5	1,9	4
2	50 циклов	1,8	2,5	4,5
3	75 циклов	1,8	3,2	5,3
4	100 циклов	4,6	9,7	13,5
5	150 циклов	8,2	14,1	18

Установлено, что появление в результате термоциклирования и частичной отпайки на фронтальной стороне не оказывают существенного влияния на электрические характеристики. Дефекты тыльной стороны СЭ оказывают существенное влияние на выходные характеристики снижая коэффициент заполнения ВАХ, что

при работе в первую очередь будет вызывать систематические перегревы СЭ в модуле. Освещение СЭ осуществлялось при помощи 4 светодиодных матриц по 150 Вт, а освещенность калибровалась по току короткого замыкания эталонного СЭ, измеренного на поверенном имитаторе спектра солнечного излучения. Уровень неоднородности внутри светового пятна составлял не более 3 %. Температура образцов контролировалась пирометром.

По результатам испытаний уменьшение  $U_{oc}$  происходит не более чем на 0,5 % независимо от вида образца.  $I_{sc}$  уменьшился на 1,5% в случае №4, однако никакой статистической зависимости между его падением и типом образца обнаружено не было. Наибольшее падение зафиксировано для  $ff$ , которое и определило общую деградацию СЭ.

Проведен расчет потенциала применения солнечных электростанций в климатических условиях Республики Беларусь на примере СЭС мощностью 57 кВт. Установлено, что прибыль СЭС начнет приносить только начиная с 12 года своей установки. В случае, когда СЭС работает только на продажу электроэнергии в сеть по «зелёному» тарифу окупаемость наступит раньше.

Показано, что даже элементы, которые сами по себе 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.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

## Основные научные результаты диссертации

1. Проведен анализ моделей солнечных элементов. Потенциал развития солнечной энергетики заключен в использовании монокристаллических и поликристаллических элементов, но их деградиационные характеристики по-прежнему высоки. 78% всех данных, показывают степень деградации  $\sim 1\%$  / год.

2. При проведении предварительных ускоренных испытаний модулей установлено, что автомодельность эксперимента соблюдается при температурах испытаний 130-150 °С и одновременно при освещении в пределах 2000-3000 Вт/м<sup>2</sup>. При температуре более 180 °С наблюдается частичная отпайка шин от контактных площадок СЭ, а при уровнях освещения больших чем 3000 Вт/м<sup>2</sup> для СЭ на основе поликристаллического кремния наблюдается падение КПД.

3. Теоретические модели переноса носителей заряда в СЭ представлены и хорошо описывают поведение ВАХ в крайних точках, но в то же время не объясняют уменьшение коэффициента заполнения. Уменьшение  $ff$  увязано в исследуемых СЭ с наличием примесей железа в кремнии и именно этим объясняется нелинейное изменение времени жизни неосновных носителей заряда и как следствие нелинейное изменение КПД.

4. Установлено, что появление в результате термоциклирования частичной отпайки на фронтальной стороне не оказывают существенного влияния на электрические характеристики. Дефекты тыльной стороны СЭ оказывают существенное влияние на выходные характеристики снижая коэффициент заполнения ВАХ, что при работе в первую очередь будет вызывать систематические перегревы СЭ в модуле. Потеря в результате термоциклирования до 50 % площади паяных соединений вызывает ускорение деградации СЭ и СМ до 4,5 раз.

5. 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. Влияние освещенности на КПД поликристаллических солнечных элементов / О.О.Боровская, И.Ю. Сюмак, А.А. Артеменко, А.В. Пятосин, А.В. Михалькевич // Международная научно-практическая конференция: «Фундаментальные научные исследования: теоретические и практические аспекты». – Кемерово: Западно-Сибирский научный центр, 15 февраля 2019 – с.59 – 60.
2. Перспектива развития солнечной энергетики как альтернативного источника энергии на территории Республики Беларусь / О.О.Боровская, И.Ю. Сюмак, А.А. Артеменко, А.В. Пятосин, А.В. Михалькевич // Международная научно-практическая конференция: «Актуальные вопросы современных исследований», – Омск: Научный центр «Орка», 15 февраля 2019 – с.4 – 6.
3. Скорость изменения КПД солнечных элементов с течением времени/ И.Ю. Сюмак, А.А. Артеменко, А.В. Пятосин // Материалы работы 55-й юбилейной научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск: БГУИР, 22 – 26 апреля 2019 – с 40-41
4. Перспектива использования солнечных электростанций в качестве источников энергии / И.Ю. Сюмак, А.А. Артеменко, А.В. Пятосин // Материалы работы 55-й юбилейной научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск: БГУИР, 22 – 26 апреля 2019 – 42-43

## РЭЗІЮМЭ

Сюмака Іллі Юрьевіча

### Мадэляванне дэградацыі дзвюхстаронніх фотаэлектрычных элементаў

**Ключавыя словы:** сонечная электрастанцыя, фотавальтаіка, 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.

**Атрыманя вынікі і іх навізна:**

даследавана ўплыў розных варыянтаў отпайкі на франтальнай і адваротным баках двухбаковых СЭ. Устаноўлена, што дэфекты пайкі на франтальнай баку не аказваюць істотнага ўплыву на электрычныя характарыстыкі. Дэфекты адваротнага боку СЭ аказваюць істотны ўплыў на выходныя характарыстыкі зніжаючы каэфіцыент запаўнення ВАХ, што пры працы ў першую чаргу будзе выклікаць сістэматычныя перагрэву СЭ у модулі.

Устаноўлена, што з'яўленне ў выніку термоциклирования частковай отпайкі на франтальнай баку не аказваюць істотнага ўплыву на электрычныя характарыстыкі. Дэфекты тыльнага боку СЭ аказваюць істотны ўплыў на выходныя характарыстыкі зніжаючы каэфіцыент запаўнення ВАХ, што пры працы ў першую чаргу будзе выклікаць сістэматычныя перагрэву СЭ у модулі. Страта ў выніку термоциклирования да 50% плошчы паяннi злучэнняў выклікае паскарэнне дэградацыі СЭ і СМ да 4,5 разоў

**Ступень выкарыстання:** Атрыманя вынікі ўкаранёны ў навучальны працэс на кафедры праектравання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм ўстанавы 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

Сюмака Ильи Юрьевича

### Моделирование деградации двухсторонних фотоэлектрических элементов

**Ключевые слова:** солнечная электростанция, фотовольтаика, деградация

**Цель работы** заключалась в выявлении основных процессов, приводящих к деградации солнечных элементов и разработка методики оценки жизненного цикла СБ с учетом климатических факторов РБ.

**Полученные результаты и их новизна:** исследовано влияние различных вариантов отпайки на фронтальной и оборотной сторонах двухсторонних СЭ. Установлено, что дефекты пайки на фронтальной стороне не оказывают существенного влияния на электрические характеристики. Дефекты оборотной стороны СЭ оказывают существенное влияние на выходные характеристики снижая коэффициент заполнения ВАХ, что при работе в первую очередь будет вызывать систематические перегревы СЭ в модуле.

Установлено, что появление в результате термоциклирования частичной отпайки на фронтальной стороне не оказывают существенного влияния на электрические характеристики. Дефекты тыльной стороны СЭ оказывают существенное влияние на выходные характеристики снижая коэффициент заполнения ВАХ, что при работе в первую очередь будет вызывать систематические перегревы СЭ в модуле. Потеря в результате термоциклирования до 50 % площади паяных соединений вызывает ускорение деградации СЭ и СМ до 4,5 раз.

**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

Syumak Ilya Yurievich

### Simulation of the degradation of two-sided photovoltaic cells

**Keywords:** solar battery, photovoltaic, degradation

**Purpose of the work:** was to identify the main processes leading to the degradation of solar cells and the development of a methodology for assessing the life cycle of the Security Council, taking into account the climatic factors of the Republic of Belarus

**The results obtained and their novelty:** researchers affect various options for tapping on the front and back sides of two-sided solar cells. It is established that the electrical characteristics. Defects of the reverse side of an ESS have a significant effect on the output characteristics of a reduction in the fill-ratio of the I – V characteristic, which at work will primarily cause systematic overheating of the EE in the module.

It has been established that the appearance of a partial tap on the frontal side as a result of thermal cycling does not have a significant effect on the electrical characteristics. The results achieved affect the systematic overheating of the solar cells in the module. The loss of thermocycling to 50% of the area of soldered joints causes an acceleration of the degradation of the solar cell and the lubricant up to 4.5 times.

**Degree of use:** The results are implemented in the educational process at the Department of Design of Information and Computer Systems of the Educational Establishment "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics within the framework of the educational discipline" Electronic Systems on Renewable Energy Sources ".

**Scope:** renewable energy sources.