

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина»

На правах рукописи



Заварухин Владимир Александрович

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ НА СОЛНЕЧНЫХ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ**

2.4.5. Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) на кафедре «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Кирпичникова Ирина Михайловна

Официальные оппоненты: **Велькин Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии»;

Григораш Олег Владимирович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», г. Краснодар, заведующий кафедрой «Электротехника, теплотехника и возобновляемые источники энергии»;

Тягунов Михаил Георгиевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, профессор кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии».

Защита диссертации состоится 13 ноября 2025 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.07.17 по адресу: 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»: <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=7559>

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета



Ташлыков Олег Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Согласно отчетам Международного энергетического агентства (IEA) и Международного агентства по возобновляемой энергетике (IRENA) за 2023 год, установленная мощность солнечных электростанций (СЭС), составляет 1,41 ТВт. В отчетах этих агентств проведен анализ стратегий развития возобновляемой энергетики более 150 стран, который показывает, что к 2030 году ожидается среднегодовой прирост мощности СЭС 492–578 ГВт/год. Эта тенденция напрямую связана со снижением стоимости производства фотоэлектрических модулей на основе кремниевых ячеек.

Фотоэлектрические модули (ФЭМ) производятся по разным технологиям. Как правило, для их применения на СЭС, модули разделяют на 2 группы: с использованием ячеек из поликристаллического кремния и из монокристаллического кремния. Эффективность таких модулей варьируется от 17 до 23 %, что на данный момент является пределом для существующих технологий производства.

Заводами-изготовителями заявляется срок службы ФЭМ от 25 до 30 лет с учетом их ежегодной деградации $\sim 0,5$ %. Кроме ожидаемой деградации при эксплуатации могут возникнуть непредвиденные неисправности, вызванные как некачественными материалами модулей, так и экстремальными условиями окружающей среды. Снижение эффективности ФЭМ влияет на экономические и энергетические потери, связанные с недополученной электроэнергией.

Кроме того, ФЭМ конструктивно представляют собой монолитную конструкцию, что исключает возможность их ремонта в случае возникновения неисправностей. Из-за этого неисправные или деградировавшие модули необходимо правильно утилизировать, что добавляет к экономическим потерям и экологические проблемы.

На сегодняшний день исследования в области деградации модулей позволяют выделить две группы: обратимые и необратимые виды деградации. В отличие от обратимых видов механизм необратимых видов деградации изучен не полностью, что оставляет надежду на возможное решение проблемы в будущем. Однако, независимо от вида деградации, скорость обнаружения играет важную роль в поддержании эффективности всей электростанции, так как от этого зависит величина экономических потерь.

Основным показателем неисправностей является изменение энергетических показателей, выраженных в виде вольт-амперной характеристики (ВАХ). Диагностика модулей по ВАХ зачастую проводится вручную, что создает трудности в поиске места неисправности, а также в определении причины деградации. Это снижает периодичность проверок, из-за чего может быть упущен момент проведения восстановительных мероприятий, имеющих низкую стоимость по сравнению с последствиями из-за позднего реагирования.

Использование имеющихся связей между изменением формы ВАХ и видом деградации создает возможность определения причины без участия человека.

Данная диссертация посвящена разработке алгоритма оценки состояния фотоэлектрических модулей и определению причины деградации для реализации машинного кода анализа вольт-амперных характеристик. Работа выполнена в соответствии с пунктом 21, 6 Указа Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145 "О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации".

Степень разработанности темы исследования. Общим проблемами развития солнечной энергетики посвящены работы Стребкова Д.С., Безруких П.П., Щеклеина С.Е., Велькина В.И., Тягунова М.Г., Елистратова В.В., Амерханова Р.А., Григораша О.В. и др. Значительный вклад в исследование процессов деградации фотоэлектрических модулей внесли S. Kurtz, S. Pingel, D. Swanson, C. Satterlee. Анализ данных исследований показал, что работы посвящены в основном изучению проблем эксплуатации солнечных модулей и их влиянию на выработку электроэнергии. Своевременное обнаружение и диагностирование состояния фотоэлектрических модулей с использованием современных методов моделирования и анализа вольт-амперных характеристик ФЭМ позволит избежать указанные проблемы и не допустить ранней деградации модулей.

Цель исследования – разработка обобщенного алгоритма анализа вольт-амперных характеристик фотоэлектрических модулей для определения возможных причин деградации, возникающих в процессе их эксплуатации на электрических станциях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ известных устройств и методик, направленных на определение состояния фотоэлектрических модулей и причин их деградации.
2. Провести анализ дефектов и неисправностей, возникающих при эксплуатации фотоэлектрических модулей и их влияние на энергетические характеристики модулей.
3. Разработать физическую и математическую модели фотоэлектрического модуля для определения причин деградации.
4. Разработать алгоритм определения состояния и возможных причин снижения мощности фотоэлектрических модулей по вольт-амперной характеристике.
5. Провести экспериментальное исследование разработанного алгоритма с использованием машинного кода для обработки данных.
6. Разработать методику расчета энергетических и экономических потерь СЭС, вызванных деградацией фотоэлектрических модулей.

Объект исследования – фотоэлектрические модули солнечных электростанций в условиях эксплуатации.

Предмет исследования – закономерности и факторы, влияющие на снижение энергетических характеристик фотоэлектрических модулей.

Научная новизна:

1. Впервые установлена зависимость между геометрическим представлением ВАХ и возможными причинами деградации ФЭМ.
2. Впервые разработана физическая модель фотоэлектрического модуля с возможностью изменения параметров для имитации влияния деградации на ее энергетические показатели.
3. Разработана математическая модель ФЭМ для исследования влияния изменения параметров на его вольт-амперную характеристику.
4. Впервые разработан алгоритм определения возможных причин снижения мощности ФЭМ по его вольт-амперной характеристике.
5. Предложена методика расчета возможных энергетических потерь СЭС с учетом деградации ФЭМ.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Использование результатов научных исследований предполагается на солнечных электростанциях и предприятиях с автономными фотоэлектрическими станциями и имеющих проблемы со снижением генерации энергии и преждевременной деградацией модулей.
2. Полученные теоретические и экспериментальные зависимости и вольт-амперные характеристики могут быть использованы для дальнейших научных исследований, связанных с диагностикой и предотвращением деградации модулей.
3. Разработанный алгоритм оценки состояния фотоэлектрических модулей может быть основой для машинного обучения при использовании нейронных технологий с возможностью своевременной и надежной оценки состояния модулей.
4. Методика экономической и энергетической оценки позволяет определять потери электрической энергии солнечных модулей от недовыработки, вызванной деградацией, что важно для эксплуатирующих организаций при определении их причин и поддержания эффективной работы модулей в течение всего срока эксплуатации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа видов деградации и поиска критериев их определения.
2. Результаты физического и математического моделирования влияния деградации фотоэлектрических модулей на их вольт-амперную характеристику.
3. Алгоритм и программа ЭВМ для определения возможных причин снижения мощности ФЭМ по их ВАХ на основе анализа её формы.
4. Результаты экспериментальных исследований по оценке состояния ФЭМ и определению причин их деградации.
5. Методика определения энергетических и экономических потерь для фотоэлектрических модулей с учетом их деградации.

Достоверность результатов, научных положений, результатов работы и выводов обосновываются корректностью постановки задач, применения

математического аппарата, методики и программы экспериментов и подтверждением теоретических положений экспериментальными исследованиями.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) при подготовке магистров по специальности 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника.

Алгоритм оценки и определения состояния фотоэлектрических модулей принят к внедрению на ООО «Энерготехнологии-Сервис», г. Краснодар (организация занимается энергоаудитом и составлением энергопаспортов предприятий, в том числе для солнечных электростанций, солнечными водонагревательными установками, системами геотермального теплоснабжения).

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ЮУрГУ (2021-2024г. г.), International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022, международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере», 2024-2025 г.г, Челябинск, XV Международной научной конференции «ТТС-24» (20–22 ноября 2024 года), Краснодар, XXI международной конференции «Возобновляемая и малая энергетика – 2024. Энергосбережение. Автономные системы энергоснабжения стационарных и подвижных объектов», 6 и 7 ноября 2024 г.

Публикации по теме диссертационной работы. Основное содержание диссертации опубликовано в 12 печатных работах, в том числе 7 статей в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 1 статья в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus, получен 1 патент на полезную модель, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Соответствие научной специальности. Тема диссертационного исследования соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы:

Пункт 1. Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии в целом и их основного и вспомогательного оборудования.

Пункт 2. Математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном

оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии.

Пункт 4. Разработка научных подходов, методов, алгоритмов, технологий конструирования и проектирования, контроля и диагностики, оценки надежности основного и вспомогательного оборудования энергетических систем, станций и энергокомплексов и входящих в них энергетических установок.

Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследования, сборе и систематизации информации, связанной с деградацией фотоэлектрических модулей, исследовании изменения энергетических характеристик модулей с учетом их деградации, разработке алгоритма определения возможных причин снижения мощности ФЭМ, проведении экспериментальных исследований.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка используемой литературы из 125 наименований (отечественных и зарубежных авторов). Общий объем диссертации составляет 155 страниц, в том числе 98 страниц основного текста, включающего в себя 54 иллюстрации, 7 таблиц, 27 формул и 9 страниц приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, степень разработанности вопроса, поставлена цель и сформулированы задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая ценность, методы и средства исследования, достоверность результатов, полученных в работе, представлены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса и задачи исследования» рассмотрены текущее состояние солнечной энергетики и основные направления применения фотоэлектрических модулей. Отмечен активный рост установленной мощности ВИЭ, в частности солнечной энергетики. Выделены существующие технологии производства ФЭМ, из которых можно отметить две основные технологии: гетероструктурные модули (HJT – Heterojunction technology) и технологию пассивированного эмиттера заднего контакта (PERC – Passivated Emitter and Rear Contact). Модули, произведенные по данным технологиям, отличаются более высокой производительностью и сниженной начальной деградацией.

Однако, несмотря на развитие технологий производства, неисправности модулей до сих пор являются проблемой при эксплуатации, снижая общую эффективность СЭС и создавая дополнительные затраты на обслуживание.

При проведении поиска устройств для диагностики ФЭМ было выделено несколько компаний, выпускающих устройства и программное обеспечение для снятия и анализа вольт-амперных характеристик в натуральных условиях:

- 1) Fluke Corporation, устройство «Solmetric PV Analyzer PVA-1500»;

- 2) HT Italia S.r.l., измерители кривых ВАХ серии «I-V»;
- 3) Meco Instruments Pvt. Ltd., устройства «Solar Module Analyzer» для единичных ФЭМ и «Solar System Analyzer» для цепей ФЭМ;
- 4) Huawei Technologies Co., Ltd, сервис «Smart I-V Curve Diagnosis, SmartLogger» получает, снятую инвертором, вольт-амперную характеристику и производит анализ с помощью искусственного интеллекта.
- 5) Seaward Electronic Ltd, устройство «PV200».

Принцип работы таких устройств производится в рамках действия стандартов IEC 60904-1 (ГОСТ Р МЭК 60904-1-2013 «Приборы фотоэлектрические. Часть 1. Измерение вольт-амперных характеристик») и IEC 60891 (ГОСТ Р МЭК 60891-2013 «Приборы фотоэлектрические. Методики коррекции по температуре и энергетической освещенности результатов измерения вольт-амперной характеристики»). Согласно этим стандартам, происходит измерение вольт-амперных характеристик и приведение их к стандартным условиям испытаний (СУИ) для оценки их состояния. При использовании методики коррекции требуется определение последовательного и параллельного сопротивлений. Основным способом является метод отклонения касательных к графику ВАХ. Для определения последовательного сопротивления используется значение тока и напряжения вблизи точки холостого хода. На практике такое решение создает погрешность, особенно при наличии деградации, так как график ВАХ не имеет идеальной формы.

Анализ снятых графиков производится вручную по методикам, изложенным в инструкциях к данным приборам. Такой процесс замедляет проведение работ, а также создает дополнительную трудность, выраженную постоянным использованием вспомогательных средств визуального контроля, при наличии отклонения мощности от паспортной.

Так как визуальный осмотр ФЭМ зачастую не позволяет увидеть дефектный модуль, то для точного определения поврежденного участка используют термальную камеру или явление электролюминесценции (Рисунок 1).

Исходя из исследования состояния вопроса, был сделан вывод, что на сегодняшний день отсутствует техническое решение для первичного анализа возможных причин деградации модулей. Конечный результат должен давать первичную оценку состояния ФЭМ и дать перечень возможных причин снижения мощности. Это позволит сократить время, затрачиваемое персоналом на анализ графиков и сократить количество операций, выполняемых при диагностике ФЭМ.

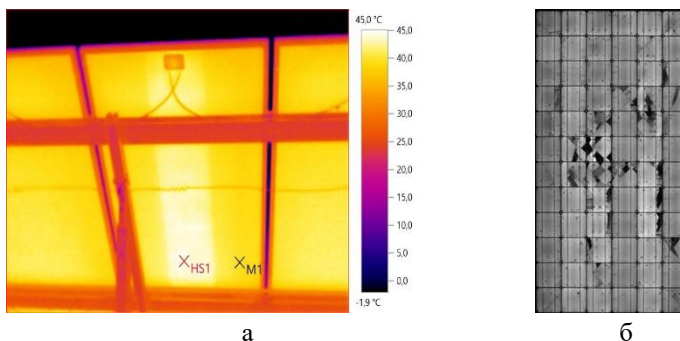


Рисунок 1 – Снимки ФЭМ: а – съемка модуля в инфракрасном спектре; б – электролюминесцентная съемка модуля с трещинами в ячейках.

Во второй главе «Деградация фотоэлектрических модулей на солнечных электростанциях» проведен анализ известных неисправностей, которые разделены на две основные группы: обратимые и необратимые.

К необратимым видам деградации относятся неисправности, приводящие к разрушению или изменению строения материалов модулей. Следует отметить следующие виды необратимых неисправностей:

1) Деградация, вызванная светом (Light Induced Degradation). Такой вид деградации считается необратимым. Производитель указывает в паспорте ежегодное снижение мощности, которое составляет $\sim 0,5$ %/год для всех модулей на основе кристаллического кремния.

2) Микротрещины солнечных модулей (рисунок 1, б)

3) Потемнение герметизирующего слоя ФЭМ. Данное явление связано с низким качеством пленки-герметика, которая производится из этиленвинилацетата (ЭВА) с добавлением стойких к ультрафиолету присадок

4) Разрушение контактов модулей (рисунок 2, а). Разрушение, в зависимости от места повреждения, влияет на рост последовательного сопротивления.

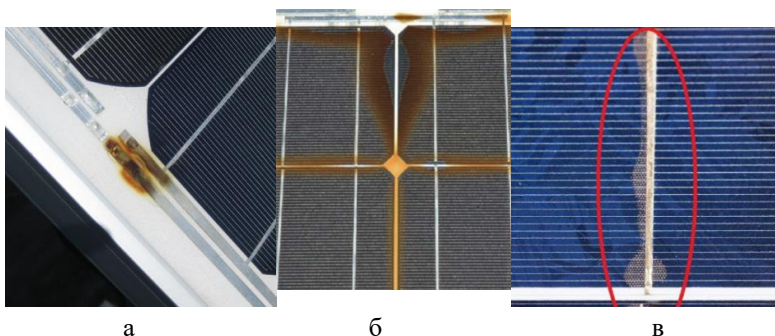


Рисунок 2 – Дефекты фотоэлектрических модулей

Обратимые виды могут иметь свойство самовосстановления или восстановления с использованием вспомогательных средств или методов устранения причин. К такой деградации относят следующие типы:

1) Деградация, вызванная светом и высокой температурой (Light and Elevated Temperature Induced Degradation). Такой вид деградации считается обратимым. Для этого модуль подвергают нагреву при температуре не ниже 85°C и протекающим токам, соответствующим токам короткого замыкания ФЭМ.

2) Деградация, вызванная высоким напряжением (Potential Induced Degradation). Данный вид деградации является опасным для последовательно соединенных цепей модулей при напряжении более 1000 В, так как может снижать мощность всей цепи до 30 %. При таком явлении возникают токи утечки через герметизирующие материалы модулей и заземленную металлическую рамку ФЭМ. Такая деградация может быть определена по графику ВАХ и по электролюминесцентному снимку модуля. Важным условием для предотвращения возникновения токов утечки отмечают заземление одного из контактов цепи ФЭМ: для модулей с ячейками n-типа это положительный контакт, для модулей с ячейками p-типа – отрицательный. Обращение данного явления возможно при приложении напряжения 1000 В или 1500 В (в зависимости от максимально допустимого производителем) в темное время суток с одной стороны к замкнутой цепи модулей, а с другой стороны к раме для создания обратного движения электронов.

В третьей главе «Моделирование процессов деградации» описан процесс построения моделей ФЭМ для исследования изменения параметров, имитирующих деградацию. В качестве испытуемого образца был выбран фотоэлектрический модуль BSP 32–100, данные которого указаны в таблице 1.

Для проведения исследований по влиянию изменения параметров ФЭМ на форму ВАХ была определена принципиальная схема ФЭМ, согласно которой производилось построение моделей (рисунок 3).

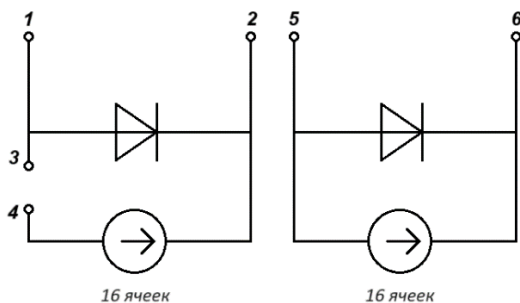


Рисунок 3 – Принципиальная схема испытуемого образца на базе ФЭМ

Таблица 1 – Параметры фотоэлектрического модуля BSP 32–100

Параметр	Условное обозначение	Значение параметра
Напряжение холостого хода	U_{XX}	19,2 В
Ток короткого замыкания	$I_{KЗ}$	6,68 А
Напряжение в точке максимальной мощности	U_{MM}	16 В
Ток в точке максимальной мощности	I_{MM}	6,25 А
Температурный коэффициент по току	K_I	0,036 %/°C
Температурный коэффициент по напряжению	K_U	- 0,31 %/°C
Температурный коэффициент по мощности	K_P	- 0,38 %/°C

Для испытуемого образца было собрано устройство «IV Swinger 2». Данное устройство работает в качестве модуля расширения для Arduino Uno и позволяет снимать данные с ФЭМ для построения вольт-амперных характеристик.



Рисунок 4 – Испытательный стенд на базе ФЭМ BSP 32–100

Конструкция выбранного ФЭМ содержит только один шунтирующий диод. С целью получения возможности исследования влияния частичного затенения или имитации внутренних повреждений ячеек или контактов между ними, модуль был разделен на 2 части по 16 ячеек в каждой и в разрыв между ячейками были добавлены электрические выводы 3, 4 (рисунок 3).

Такие выводы позволяют подключать сопротивления разных значений и наблюдать изменения формы ВАХ с помощью испытательного стенда (рисунок 4).

Также для удобства исследования влияния деградации на форму ВАХ была построена математическая модель ФЭМ аналогично испытуемому образцу. Исходя из проведенного анализа существующих математических моделей построения графиков ВАХ был сделан вывод, что для исследования изменения параметров требуется модель, которая обладает высокой точностью в поведении при изменении параметров. В качестве основы для построения математической модели была выбрана двухдиодная схема замещения (рисунок 5).

Таблица 2 – Схемы подключения сопротивлений и соответствующие им виды неисправностей

№ п/п	Схема сборки, имитирующая неисправность	Возможные виды неисправностей
1		Неисправности отсутствуют.
2		Имеются проблемы с контактными соединениями между последовательно соединенными модулями или в распределительной коробке
3		Наличие трещин в ячейках на начальных этапах; Коррозия контактных соединений.
4		Повреждение шунтирующего диода Шоттки (режим обрыва цепи)
5		Повреждение шунтирующего диода Шоттки (режим пробоя)
6		Изменение качества ячеек (рост трещин ячеек)

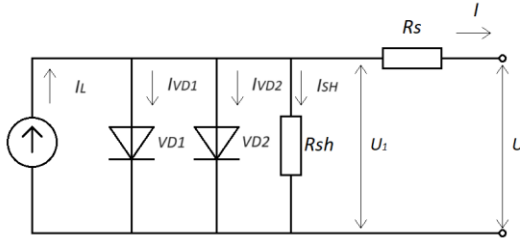


Рисунок 5 – Двухдиодная схема замещения солнечного элемента

$$I(U) = I_L - I_{VD1} - I_{VD2} - I_{SH}, \text{ А}, \quad (1)$$

где I_L – ток, генерируемый светом или фототок, А; I_{VD1} – ток диода 1, А; I_{VD2} – ток диода 2, А; I_{SH} – ток утечки, А.

За основу определения параметров последовательного и параллельного сопротивлений для паспортных значений были взяты исследования Зиновьева В.В., Бельтюкова А.П., Баргенева О.А.

Последовательное сопротивление фотоэлектрического модуля определяется по уравнению 2.

$$R_s = a(W_{-1}(b \cdot \exp(c)) - (d + c)), \text{ Ом}, \quad (2)$$

где значения a, b, c, d определяются следующими уравнениями:

$$a = \frac{A \cdot U_T \cdot n}{I_{MM}}; \quad (3)$$

$$b = -\frac{U_{MM}(2I_{MM} - I_{K3})}{U_{MM}I_{K3} + U_{XX}(I_{MM} - I_{K3})}; \quad (4)$$

$$c = -\frac{2U_{MM} - U_{XX}}{A \cdot U_T \cdot n} + \frac{U_{MM}I_{K3} - U_{XX}I_{MM}}{U_{MM}I_{K3} + U_{XX}(I_{MM} - I_{K3})}; \quad (5)$$

$$d = \frac{U_{MM} - U_{XX}}{A \cdot U_T \cdot n}, \quad (6)$$

где I_{K3} – ток короткого замыкания ФЭМ при СУИ, А; I_{MM} – ток в точке максимальной мощности ФЭМ при СУИ, А; U_{XX} – напряжение холостого хода при СУИ, В; U_{MM} – напряжение в точке максимальной мощности при СУИ, В;

В уравнениях 3, 5, 6 U_T показывает тепловое напряжение, которое определяется

$$U_T = \frac{k \cdot T}{q}, \text{ В}. \quad (7)$$

Для определения значения отрицательной ветви W-функции Ламберта $W_{-1}(x)$ было использовано решение с применением бесконечного уравнения. Для повышения точности результата в уравнении (8) знаменатель опустил до 100 логарифма.

$$W_{-1}(x) = \ln \frac{-x}{- \ln \frac{-x}{- \ln \frac{-x}{- \ln \frac{-x}{\dots}}}}. \quad (8)$$

Вычисление шунтирующего сопротивления модуля выполняется следующим образом:

$$R_{SH} = \frac{(U_{MM} - I_{MM}R_S)(U_{MM} - R_S(I_{K3} - I_{MM}) - AU_T)}{(U_{MM} - I_{MM}R_S)(I_{K3} - I_{MM}) - AU_T I_{MM}}. \quad (9)$$

Таблица 3 – Расчетные значения сопротивлений фотоэлектрического модуля BSP 32-100

Параметр	Условное обозначение	Значение параметра
Последовательное сопротивление	R_S	0,12 Ом
Шунтирующее сопротивление	R_{SH}	162 Ом

Модель ФЭМ была построена в Microsoft Excel для удобства работы с получаемыми данными, так как дальнейшая обработка данных будет производиться при помощи встроенного языка программирования Visual Basic for Applications (VBA). Сравнение полученных графиков физической и математической моделей показало, что расхождение значений максимальных мощностей при различных условиях не превышает $\pm 5\%$.

В четвертой главе «Разработка алгоритма оценки состояния фотоэлектрических модулей» описывается алгоритм обработки графиков вольт-амперных характеристик, полученных в условиях окружающей среды с целью определения состояния ФЭМ. Разработанный алгоритм направлен на решение проблемы определения состояния ФЭМ в реальных условиях, а также определения возможных причин деградации при выявленном снижении мощности. Алгоритм разделен на 4 основных блока, которые представляют собой отдельные методики или совокупности методик для получения необходимых результатов (рисунок 6).

Первый блок выполняет проверку допустимых условий освещенности для дальнейшей коррекции графика к СУИ. Согласно ГОСТ Р МЭК 60891–2013 «Приборы фотоэлектрические. Методики коррекции по температуре и энергетической освещенности результатов измерения вольт-амперной характеристики» энергетическая освещенность, попадающая на поверхность ФЭМ, должна быть не ниже 800 Вт/м^2 . Для измерения освещенности при выполнении данной работы использовался эталонный ФЭМ. Согласно данному стандарту, значение энергетической освещенности для испытуемого ФЭМ будет получено при компланарном размещении эталонного модуля. Полученное значение тока короткого замыкания и температуры эталонного модуля позволит определить значение энергетической освещенности, используя следующую зависимость:

$$E = \frac{I_{K3} \cdot E_{СУИ}}{I_{K3(СУИ)}} \cdot \left(1 - \frac{K_i \cdot (T - T_{СУИ})}{100} \right), \text{ Вт/м}^2. \quad (10)$$

где I_{K3} – ток короткого замыкания эталонного ФЭМ, А; $E_{СУИ} = 1000 \text{ Вт/м}^2$ – энергетическая освещенность при СУИ; $I_{K3(СУИ)}$ – ток короткого замыкания ФЭМ

при СУИ, А; K_i – температурный коэффициент по току, А; $T_{СУИ} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура при СУИ; T – температура эталонного ФЭМ, $^{\circ}\text{C}$.

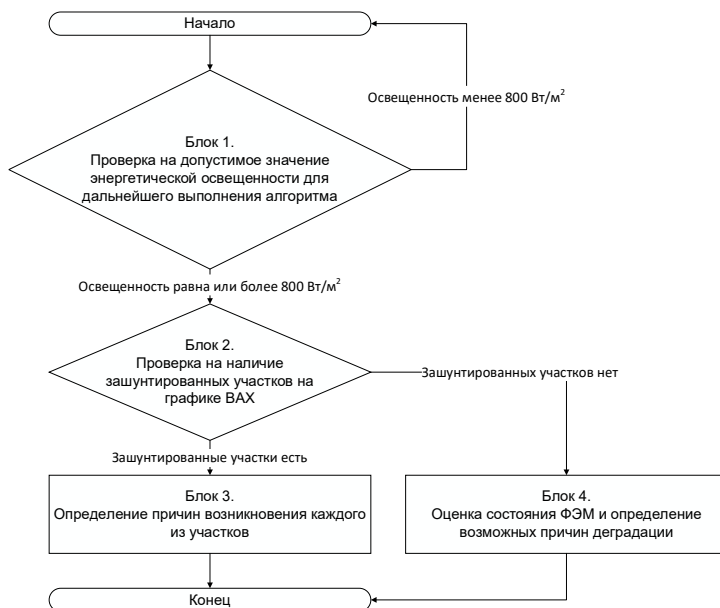


Рисунок 6 – Обобщенный алгоритм оценки состояния ФЭМ

Полученный график ВАХ при значении энергетической освещенности равной или более 800 Вт/м^2 требует проверки на наличие зашунтированных участков, которые могут быть вызваны внешними или внутренними проблемами. Определение количества ступеней выполняется вторым блоком алгоритма при помощи первой производной графика ВАХ dI/dU . Такое решение позволяет исключить ложные показания при подсчете числа открытых шунтирующих диодов, которые могут быть при поиске экстремумов (минимумов) на вольт-ваттной характеристике.

Третий блок алгоритма выполняется в случае обнаружения одного или более открытых шунтирующих диодов. Ступенчатая форма ВАХ позволяет разделить график на несколько частей, чтобы можно было определить по форме каждой ступени причину их возникновения. Выполнение оценки состояния в таком случае проводится без коррекции графика ВАХ к СУИ, так как для коррекции необходим график без влияния шунтирующих диодов.

Четвертый блок алгоритма выполняется при получении характеристики без влияния шунтирующих диодов. Выполняется коррекция графика к СУИ по методике, изложенной в ГОСТ Р МЭК 60891–2013. После коррекции определяется значение максимальной мощности, которое подлежит сравнению с паспортным значением. В случае значительных отклонений (более 5 %), определяются возможные причины снижения мощности. Определение причин

деградации происходит при помощи геометрических параметров двух отрезков, проведенных между тремя точками: точкой КЗ и ММ, точкой ХХ и ММ.

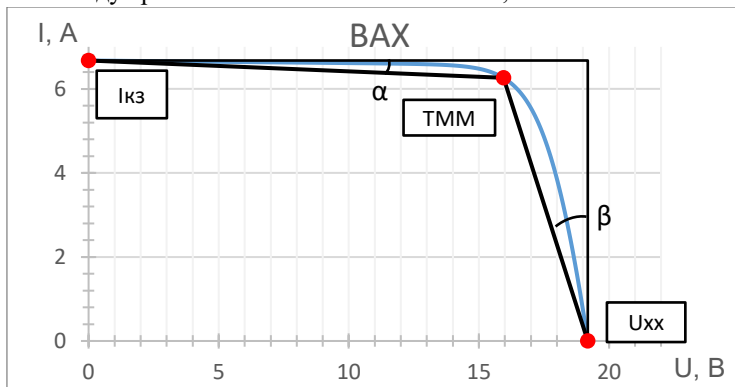


Рисунок 7 – Геометрические параметры ВАХ для определения причин деградации

Реализация разработанного алгоритма в виде машинного кода выполнялась в среде Microsoft Excel на языке VBA. Итоговым результатом обработки ВАХ является заключение, в котором указывается оценочное состояние ФЭМ, выраженное в % от паспортной мощности, и также, при сниженной мощности, указываются возможные причины этого снижения.

В пятой главе «Разработка методики определения потерь из-за деградации фотоэлектрических модулей» описывается порядок проведения оценочных расчетов недополученной электрической энергии из-за деградации ФЭМ на СЭС. Применение методики возможно для двух случаев:

1. Определение ожидаемых потерь за промежуток времени, представляющий интерес. В таком случае расчетное значение покажет количество энергии, которое будет недополучено при текущем состоянии одного или нескольких ФЭМ в соединенном последовательно массиве модулей.

$$\mathcal{E}_{\text{пот}} = \mathcal{E}_{\text{вал}} \cdot \frac{P_{\text{изм}} - P'_{\text{изм}}}{E} \cdot \left(1 + \frac{K_t \cdot (T - 25)}{100} \right) \cdot \eta_{\Delta P}^m \cdot \eta_{\Delta \mathcal{E}}^m, \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (11)$$

где $\mathcal{E}_{\text{вал}}$ – валовой удельный приход солнечной радиации на рассматриваемую площадку, кВт·ч/м²; $P_{\text{изм}}$ – максимальная мощность фотоэлектрических модулей, приведенная к требуемому значению энергетической освещенности, Вт; $P'_{\text{изм}}$ – максимальная мощность фотоэлектрических модулей с учетом деградации, определенная по методике, изложенной в Главе 4 и приведенная к требуемому значению освещенности, Вт; E – среднее значение энергетической освещенности, за интересующий промежуток времени, Вт/м²; K_t – температурный коэффициент мощности ФЭМ, учитывающий влияние температуры солнечного модуля на его К.П.Д., %/°С; T – среднее значение температуры за интересующий промежуток времени, °С; $\eta_{\Delta P}^m = 0,97$, $\eta_{\Delta \mathcal{E}}^m = 0,9$ – соответственно потери мощности, определяемые последовательным соединением элементов и передачей энергии до потребителя.

2. Определение недополученной энергии за отработанный период. Расчетное значение покажет потери за интересующий период работы массива модулей с учетом текущего состояния.

$$\mathcal{E}_{\text{пот.}} = \mathcal{E}_{\text{ген}} \cdot \frac{P_{\text{изм}} - P_{\text{изм}}^{\cdot}}{E}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (12)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ген}}$ – количество электрической энергии, полученное за определенный промежуток времени, кВт·ч.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

По результатам теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы можно сделать следующие выводы:

1. Анализ известных устройств и методов для оценки состояния фотоэлектрических модулей и причин деградации показал, что они связаны либо с применением ручного труда, либо с использованием алгоритмов ИИ, которые являются трудоемкими и энергозатратными.

2. Изучение дефектов и неисправностей ФЭМ позволило определить два основных критерия отдельных видов деградации и установить их влияние на ВАХ модулей, как основного инструмента при поиске причин снижения мощности.

3. Разработанная математическая модель ФЭМ по сравнению с аналогичной физической моделью имеет большую гибкость при одинаковом изменении параметров для имитации влияния деградации на ее энергетические показатели, что доказало корректность ее построения. Расхождение графиков ВАХ между моделями не превысило 5%

4. Предложенный алгоритм оценки состояния ФЭМ позволяет выделить возможные причины деградации без использования дополнительного оборудования и сокращает время работы обслуживающего персонала при проведении обследования состояния ФЭМ. Кроме того, данный алгоритм может быть применен к цепи модулей с учетом необходимой поправки на рост последовательного сопротивления модулей.

5. Экспериментальное исследование разработанного алгоритма с использованием машинного кода в виде программы для ЭВМ в реальных условиях эксплуатации ФЭМ показало, что погрешность оценки состояния модулей находится в пределах $\pm 5\%$.

6. Разработанная методика расчета энергетических и экономических потерь СЭС, вызванных деградацией фотоэлектрических модулей позволяет спрогнозировать потери при ежемесячном проведении оценки состояния ФЭМ, установить вид деградации и своевременно устранить ее причину.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

Продолжение исследований по данной научной теме возможно в нескольких направлениях:

1. Исследование возможности применения разработанной методики на крупных СЭС с целью сбора статистических данных по оценке скорости

деградации ФЭМ в различных климатических зонах и для различных причин деградации.

2. Проведение исследований по комплексному влиянию нескольких видов деградации на работу ФЭМ в реальных условиях эксплуатации с целью усовершенствования существующей математической модели и дополнения методики диагностики в целях повышения точности коррекции графиков ВАХ.

3. Разработка новых методов и подходов к диагностике и мониторингу фотоэлектрических станций с использованием нейросетевых технологий.

4. Применение беспилотных летательных аппаратов для диагностики и сбора данных для построения и анализа вольт-амперных характеристик с целью минимизации участия обслуживающего персонала при обходах СЭС и ускорения процесса обнаружения места неисправности в цепях модулей.

5. Разработка автономного комплекса для диагностики и определения состояния ФЭМ в условиях окружающей среды со сбором данных без участия человека.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ

1. Кирпичникова, И. М. Деградация солнечных модулей. Виды, причины, методы диагностики модулей / И. М. Кирпичникова, **В. А. Заварухин** // Энергосбережение и водоподготовка. – 2021. – № 2(130). – С. 37–42; 0,37 п.л. / 0,18 п.л.

2. Кирпичникова, И. М. Результаты научных исследований и подготовки специалистов по возобновляемой энергетике в Южно-Уральском государственном университете / И. М. Кирпичникова, **В. А. Заварухин**, А. Ю. Сологубов, В. В. Шестакова // Вестник Московского энергетического института. – 2022. – №4. – С. 90–97; 0,5 п.л. / 0,12 п. л.

3. Kirpichnikova, I. M. Simulation of the Solar Module Considering the Influence of Internal and External Parameters in MATLAB/Simulink / I. M. Kirpichnikova, **V. A. Zavarukhin** // Proceedings - 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022, Sochi, 16–20 мая 2022 года. – Sochi, 2022. – P. 248-252; 0,31 п.л. / 0,15 п.л. (Scopus).

4. Кирпичникова, И. М. Выбор параметров вольтамперной характеристики для определения возможных причин деградации фотоэлектрических модулей / И. М. Кирпичникова, **В. А. Заварухин**, Е. Д. Слетова // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2024. – № 3. – С. 15-21; 0,44 п.л. / 0,15 п.л.; K2.

5. Кирпичникова, И. М. Анализ видов деградации фотоэлектрических модулей и их вольтамперных характеристик / И. М. Кирпичникова, **В. А. Заварухин**, В. А. Серов, Е. Д. Слетова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 51. – С. 176-200; 1,56 п.л. / 0,39 п.л.; K2.

6. Кирпичникова, И. М. Обнаружение потенциальных неисправностей фотоэлектрических модулей в реальных условиях эксплуатации по их вольт-

амперным характеристикам / И. М. Кирпичникова, **В. А. Заварухин**, В. А. Серов // iPolytech Journal. – 2025. – Т. 29, № 1. – С. 82-95; 0,87 п.л. / 0,29 п.л.; К1.

7. Кирпичникова, И.М. Оценка влияния частичного затенения на мощность фотоэлектрического модуля по вольт-амперной характеристике / И. М. Кирпичникова, **В. А. Заварухин**, В. А. Серов // Электричество. – 2025. – № 5. – С. 55-61; 0,44 п.л. / 0,15 п.л.; К1.

Патенты, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

8. **Заварухин В.А.**, Кирпичникова И. М., Шестакова В. В. Устройство для предотвращения загрязнения и деградации солнечных модулей. Патент на полезную модель 218045 U1, 04.05.2023. Заявка № 2023107268 от 27.03.2023.

9. **Заварухин В.А.**, Кирпичникова И.М. Программа для получения вольт-амперных характеристик фотоэлектрического модуля с возможностью изменения его эффективности на основе двухдиодной схемы замещения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025618185, 02.04.2025. Заявка № 2025616008 от 21.03.2025.

Публикации в других изданиях

10. Заварухин, В. А. Пути уменьшения деградации и увеличения срока службы солнечных модулей / **В. А. Заварухин**, Е. Д. Слетова // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2024. – Т. 12, № 1. – С. 14-17.; 0,25 п.л. / 0,12 п.л.

11. Заварухин, В. А. Основные способы утилизации фотоэлектрических модулей / **В. А. Заварухин**, Е. Д. Слетова // Технические и технологические системы: материалы XV Международной научной конференции «ТТС-24» (20–22 ноября 2024 года) / ФГБОУ ВО «КубГТУ», ФГК ВОУ ВО «КВВАУЛ им. А.К. Серова». – Краснодар: Издательский Дом – Юг. – 2024. – С.233-236.; 0,25 п.л. / 0,12 п.л.

12. Кирпичникова, И. М. Причины сокращения сроков работы солнечных модулей и способы их предотвращения / И. М. Кирпичникова, В. А. Серов, **В. А. Заварухин**, Е. Д. Слетова // Окружающая среда и энергоснабжение. – 2025. – № 1(25). – С. 80-88.; 0,56 п.л. / 0,14 п.л.

Заварухин Владимир Александрович

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ НА СОЛНЕЧНЫХ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Специальность 2.4.5 Энергетические системы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать ____ . ____ . 2025. Формат 60x84 1/16 Печать цифровая
Усл.печ. л. 1... Уч.-изд. Л.1,0. Тираж 100 экз. Заказ ____

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76