



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Осман Мохамед Мохамед Хассан

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ
ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ГЕНЕРАЦИИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ПОДКЛЮЧЕННОЙ К ЭНЕРГОСИСТЕМЕ**

05.09.05 – «Теоретическая электротехника»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Научный руководитель: **Коровкин Николай Владимирович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Бобыль Александр Васильевич**
доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

Грицутенко Станислав Семенович
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационная безопасность», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», г. Омск.

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно производственное объединение «Стример», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 26 мая 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета У.05.09.05 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, Главный учебный корпус, ауд. 176.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте <http://www.spbstu.ru>.

Автореферат разослан «21» апреля 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета У.05.09.05,

к.т.н., доцент



Миневич Татьяна Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень проработанности. Энергия необходима для качественной человеческой жизни, поэтому надежное и доступное энергоснабжение имеет решающее значение для устойчивости современного общества. Потребность в энергии является одной из основных проблем, с которой сталкивается человечество изо дня в день и из-за истощения запасов ископаемого топлива ее решение будет более сложным. Ископаемые виды топлива, такие как природный газ и нефть, очень важны для производства электроэнергии, несмотря на загрязнение воздуха и другие проблемы. Единственная энергия, которая решит растущие энергетические проблемы в мире, — это возобновляемые источники энергии. Фотоэлектрическая технология является одним из наиболее новых возобновляемых источников энергии для выработки электроэнергии во всем мире. Наиболее значительными преимуществами являются постоянство, глобальная доступность, чистота, отсутствие загрязнения и минимальные требования к обслуживанию. Однако технология использования солнечной энергии все еще остается несколько дорогостоящей. Поэтому важно извлечь как можно больше энергии из солнечной батареи, чтобы повысить эффективность системы и снизить стоимость инвестиций.

Точное моделирование фотоэлектрического модуля является основной целью, поскольку оно позволяет инженерам оптимизировать производительность системы и максимизировать её экономическую эффективность. Определение параметров модели фотоэлектрического модуля является сложной задачей для исследователей, чтобы получить модель, которая как можно ближе имитирует характеристики фотоэлектрического модуля в широком диапазоне радиационных и температурных условий. Это связано с тем, что задача извлечения параметров фотоэлектрической (photovoltaic, далее – PV) модели представлена неявными нелинейными задачами, решение которых может быть получено с помощью довольно сложных численных и аналитических методов. В связи с этим моделирование фотоэлектрической системы должно быть точным и простым в использовании, не требующим итерационных методов, дополнительной обязательной информации и пользователей, не обладающих специальными знаниями, а только значениями данных, приведенными в технической документации фотоэлектрических модулей.

Для достижения максимальной эффективности солнечных систем фотоэлектрические модули должны работать в точке максимальной мощности (maximum power point, далее – MPP), которая обычно является уникальной точкой на кривой мощность-напряжение (P-V). Метод отслеживания точки максимальной мощности (maximum power point tracking, далее – MPPT) используется для определения точки MPP путем управления рабочим циклом DC/DC-преобразователя. Эффективные системы MPPT должны быть простыми, точными, экономически реализуемыми, чтобы отслеживать MPP независимо от погодных условий. Среди всех методов MPPT алгоритм возмущения и наблюдения (perturbation and observation, далее – P&O) широко применяется благодаря своей простоте, низким затратам и легкости реализации. Однако алгоритм P&O страдает от дрейфа при резком изменении освещенности и колебаний вокруг MPP при установившемся режиме, что приводит к потере фотоэлектрической мощности.

В последнее время широкое распространение получили MPPT-контроллеры на основе искусственного интеллекта (ИИ) для систем фотоэлектрических генераторов. По сравнению с традиционными MPP-трекерами, трекеры на основе ИИ имеют меньшие колебания вокруг MPP, высокую скорость отслеживания и наименьшее время расчета. Адаптивная нейро-нечеткая система (adaptive neural fuzzy inference system, далее – ANFIS) широко используется для фотоэлектрических систем среди различных методов искусственного интеллекта. Тем не менее, получение точной обучающей выборки и настройка модели ANFIS представляет значительные трудности для разработки эффективной технологии ANFIS-MPPT.

В дополнение к эффективности системы, контроль мощности, выдаваемой в сеть, и низкий уровень общих гармонических искажений тока, вводимого в сеть, являются еще одной важной характеристикой подключенной к сети фотоэлектрической системы. Качество вырабатываемой мощности в основном нормируется практическим опытом и стандартами по частоте, напряжению и гармоникам. В данной работе для достижения этой цели будет использован стандарт IEEE 929. Разработка новых эффективных алгоритмов и математических моделей поведения фотоэлектрического модуля, в различных ситуациях является актуальной темой для современной теоретической электротехники и соответствует разделу "В рамках научной специальности разрабатываются ... прикладные аспекты интеграции информационных технологий и объектов электротехники, электроэнергетики ...", "паспорт специальности 05.09.05 - Теоретическая электротехника".

Близкой тематикой в России занимались Бессель В. В., Донцов, О. А., Козюков Д. А., Краснобаев Ю. В., Кристофер Д. Р., Кучеров В. Г., Малинин Г. В., Мигунов Я. Н., Мингалеева Р. Д., Обухов, С. Г., Пост С. С., Русскин В. А., Семёнов С. М., Серебрянников А. В., Цыганков, Б. К., а также зарубежные ученые: Abdourraziq M. A., Chang G. W., Deihimi M. H., Enany M. A., Farahat M. A., Filho E. R., Gazoli J. R., Kharb R. K., Liu Y. J., Meyabadi A. F., Naghizadeh R. A., Nguyen T. K., Shimi S. L., Villalva M. G., Yeh Y. K., и другие исследователи.

Цель данной работы. Основная цель работы предоставление точной модели системы фотоэлектрического генератора для прогнозирования характеристик фотоэлектрической системы. Кроме того, разработка стратегии управления для максимизации энергии, получаемой от системы фотоэлектрических генераторов, и подачи энергии требуемого качества в сеть для соблюдения требований из стандарта IEEE 929.

Для достижения поставленной цели решались следующие научные задачи:

1. Литературный обзор предыдущих работ по методам извлечения параметров фотоэлектрического модуля.
2. Всесторонний обзор различных методов МРРТ, используемых при эксплуатации фотоэлектрических энергосистем.
3. Анализ требований и стандартов, касающиеся подключения систем фотоэлектрических генераторов к внешней сети.
4. Построение нового метода на основе одно-диодной модели для расчета параметров модели и моделирования работы фотоэлектрического модуля. В предлагаемом методе для этой цели используются только паспортные значения, без каких-либо приближений или упрощений, которые могут повлиять на достоверность результатов.
5. Для повышения точности и скорости отслеживания системы МРРТ в установившихся и динамически меняющихся погодных условиях предлагается алгоритм многоступенчатого изменения шага (multi-variable-step, далее – MV-S), основанный на алгоритме Р&О. Предложенный алгоритм представляет собой довольно простое правило реализации для определения наилучшего параметра размера шага для отслеживания МРР.
6. Исследование эффективного метода МРРТ на основе ANFIS, в этом методе контур управления МРРТ упрощается за счет исключения PI-регулятора. Кроме того, предложенная модель ANFIS основана на надежных обучающей выборке, полученной с помощью алгоритма MV-S.
7. Разработка эффективного подхода к управлению трехфазным инвертором, подключенным к сети, для системы фотоэлектрических генераторов, чтобы обеспечить высокий коэффициент мощности и высокое качество электроэнергии, выдаваемой в сеть.

Научная новизна работы и теоретическая значимость работы заключаются в том, что:

1. Представлен новый комплексный метод идентификации параметров фотоэлектрического модуля в различных климатических условиях. Предложенный метод использует только значения из технической документации, не требуя графических данных и сложных методов для извлечения неизвестных параметров фотоэлектрической модели.
2. Предлагается новый метод MV-S на основе алгоритма P&O для определения точного значения масштабного коэффициента с использованием довольно простого правила реализации для отслеживания MPP. Предложенный метод успешно отслеживает MPP в различных условиях, включая повышение или понижение уровня солнечной радиации при постоянных или переменных значениях температуры.
3. Впервые разработан высокоэффективный MPP-трекер на основе ANFIS с прямым управлением для фотоэлектрических генераторов. Рабочий цикл повышающего преобразователя регулируется напрямую; следовательно, в этом методе исключается PI-контур управления. Обучающие данные для предложенного метода извлекаются с помощью алгоритма MV-S, чтобы избежать ошибок, обычно включаемых в экспериментальный набор данных.
4. Была разработана усовершенствованная методология управления для фотоэлектрической системы, подключенной к сети, на основе метода ANFIS-MPPT для соблюдения высокого коэффициента мощности и высокого качеством электроэнергии, выдаваемой в сеть.

Практическое значение работы состоит в том:

- создание точной модели системы фотоэлектрического генератора для прогнозирования характеристик фотоэлектрической системы и разработке стратегии управления для максимизации энергии, полученной от системы фотоэлектрических генераторов и подачи электроэнергии требуемого во внешнюю сеть для соблюдения требований стандарта IEEE 929;
- Полученные результаты могут быть использованы при модернизации солнечной электроподстанции в Бенбане (Египет), а также при проектировании новых станций в условиях технических, климатических и социально-экономических ограничений, параметров нагрузки;
- результаты работы могут быть использованы в учебном процессе при реализации специальных образовательных программ.

Методология и методы исследования. Были использованы теоретические основы электротехники, математическое моделирование фотоэлектрического модуля, сравнительный анализ, алгоритмы MPPT, такие как P&O и ANFIS, и методы систем управления. Моделирование фотоэлектрического модуля и алгоритмы MPPT, используемые в данной работе, реализованы в виде m-файла MATLAB. Силовые цепи и элементы системы управления реализованы с помощью MATLAB/Simulink. Для проверки результатов, полученных в данной работе, проведен сравнительный анализ с другими недавно опубликованными в литературе методами.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Показано, что точное моделирование фотоэлектрического модуля является основной целью проектирования фотоэлектрической системы, так как позволяет проектировщику оптимизировать работу системы и максимизировать экономическую эффективность системы. Кроме того, фотоэлектрический модуль должен работать в точке максимальной мощности, чтобы достичь наивысшей эффективности солнечной системы, которая обычно является единственной точкой на характеристике P-V. Более того, в фотоэлектрической системе, подключенной к сети, сетевой инвертор предназначен для преобразования энергии постоянного тока в энергию переменного тока, чтобы соответствовать напряжению и частоте сети. Фотоэлектрический инвертор должен обеспечивать высокое качество электроэнергии, чтобы соответствовать стандартным рекомендациям по гармоникам, как диктует стандарт IEEE 929.

2. Представлен новый простой метод для идентификации параметров фотоэлектрических модулей в меняющихся климатических условиях. Метод основан на данных каталогов производителей и не требует графических данных и сложных методов для извлечения неизвестных параметров фотоэлектрической модели.
3. Результаты применения предложенной модели подтверждают надежность предложенной методики. Различия между расчетными и полученными от производителей или измеренными данными всегда меньше, чем допуск, обычно декларируемый стандартами.
4. Представленный метод может быть использован в качестве полезного инструмента оценки, особенно для разработчиков фотоэлектрических систем и исследователей, при изменяющихся внешних условиях, благодаря значительным преимуществам в моделировании работы фотоэлектрических систем.
5. Предложен новый метод MV-S для определения точного значения масштабного коэффициента с использованием довольно простого правила реализации при отслеживании MPP. Предложенный подход успешно отслеживает точку максимальной мощности в различных условиях, включая повышение или понижение уровня солнечной радиации при постоянных или меняющихся значениях температуры.
6. Разработан высокоэффективный трекер точки максимальной мощности на основе адаптивной нейро-нечеткой системы с прямым управлением для фотоэлектрических генераторов. Рабочий цикл повышающего преобразователя регулируется напрямую; следовательно, в этом методе исключается PI-контуре управления.
7. Предложена методология управления трехфазной фотоэлектрической системой, подключенной к сети, с помощью адаптивной нейронной системы отслеживания точки максимума мощности для подачи энергии требуемого качества во внешнюю сеть в соответствии со стандартом IEEE 929. Показано, что предложенная методология управления обеспечивает превосходный устойчивый отклик, высокое быстродействие, низкое полное гармоническое искажение тока, работу с единым коэффициентом мощности, точное и надежное отслеживание точки максимальной мощности.

Апробация результатов работы Основные положения диссертации обсуждались и докладывались на научных семинарах в ФГАОУ ВО «СПбПУ», на международной научной электроэнергетической конференции «International Scientific Electric Power Conference (ISEPC-2019)», (Санкт-Петербург, 23–24 мая 2019), на конференции молодых исследователей в области электротехники и электроники «2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2021 ElConRus)», (Санкт-Петербург, 26–29 января 2021), на международной научной электроэнергетической конференции «International Scientific Electric Power Conference (ISEPC-2021)», (Санкт-Петербург, 17–19 мая 2021), и на международной конференции по электротехническим комплексам и системам «International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS 2021)», (Уфа, 16–19 ноября 2021).

Публикации. По результатам данной исследовательской работы опубликовано двенадцать научных работ, в том числе четыре статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; восемь статей опубликованы в международных журналах и на конференциях, проиндексированы в международных базах абстрактного цитирования Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, 4 главы, и заключение. Она представлена на 142 страницах и включает 13 таблиц и 80 рисунков, и список литературы из 105 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, представлена цель работы, научная новизна, теоретическое и практическое значение работы, ее методы, и основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 обсуждается комплексный подход для извлечения параметров фотоэлектрических модулей, который может точно представить электрическое поведение фотоэлектрической панели, используя техническую документацию, которую обычно предоставляют все производители. Схема замещения одно-диодной модели используется для представления электрического выхода фотоэлектрического модуля, как показано на рисунке 1. ВАХ фотоэлектрического элемента может быть выражена следующим уравнением:

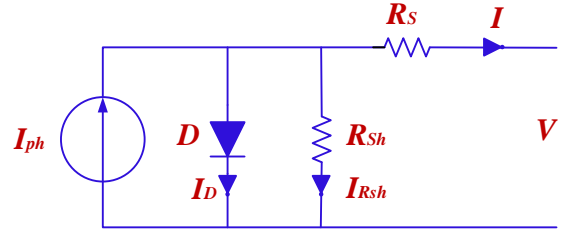


Рисунок 1 – Однодиодная модель фотоэлемента.

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Обычно принято пренебрегать термином '-1' в уравнении (1). Уравнение (1) можно записать для трех ключевых точек ВАХ: точка короткого замыкания, точка максимальной мощности и точка разомкнутой цепи.

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 e^{\frac{I_{sc} R_s}{n_s V_t}} - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_0 e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{n_s V_t}} - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

$$I_{oc} = 0 = I_{ph} - I_0 e^{\frac{V_{oc}}{n_s V_t}} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (4)$$

Вырабатываемый ток I_{ph} и ток темного насыщения I_0 могут быть выражены из выражения условий разомкнутой цепи и короткого замыкания:

$$I_{ph} = I_0 e^{\frac{V_{oc}}{n_s V_t}} + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (5)$$

Подставляя уравнение (5) в уравнение (2), оно принимает вид:

$$I_{sc} = I_0 \left(e^{\frac{V_{oc}}{n_s V_t}} - e^{\frac{I_{sc} R_s}{n_s V_t}} \right) + \frac{V_{oc} - I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

Второй член в скобках приведенного выше уравнения можно опустить, потому что он мал по сравнению с первым членом. Тогда уравнение (6) принимает следующий вид:

$$I_{sc} = I_0 e^{\frac{V_{oc}}{n_s V_t}} + \frac{V_{oc} - I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (7)$$

Решение приведенного выше уравнения для I_0 приводит к:

$$I_0 = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc} - I_{sc} R_s}{R_{sh}} \right) e^{-\frac{V_{oc}}{n_s V_t}} \quad (8)$$

Из уравнения (3):

$$R_{sh} = \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{I_{mpp} - I_{ph} + I_0 e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{n_s V_t}}} \quad (9)$$

Используя тот факт, что производная от максимальной мощности равна нулю:

$$\frac{dP}{dV} = 0 = I + \frac{\partial I}{\partial V} V \quad (10)$$

$$A = \frac{q(2V_{mpp} - V_{oc})}{n_s K T \left(\frac{I_{sc}}{I_{sc} - I_{mpp}} + \ln \left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{sc}} \right) \right)} \quad (11)$$

Последним параметром, который необходимо определить, является последовательное сопротивление R_s , которое можно получить из следующего уравнения:

$$R_s = R_{so} - \frac{1}{\frac{q}{AKT} I_o e^{\frac{V_{oc}}{n_s V_t}}} \quad (12)$$

При допущениях $R_{sh} = R_{sho}$ and $R_s = R_{so}$ в уравнениях (5)- (12), очевидно, что точное определение начального значения шунта и последовательного сопротивления (R_{sho}, R_{so}) необходимо для расчета параметров модели фотоэлектрической системы. Выражение для оценки начального значения шунта и последовательного сопротивления (R_{sho}, R_{so}) дается двумя следующими уравнениями:

$$R_{sho} = \frac{V_{mpp}}{I_{sc} - V_{mpp}} \quad (13)$$

$$R_{so} = \frac{V_{oc} - V_{mpp}}{2I_{mpp}} \quad (14)$$

Следующие уравнения используются для получения изменения всех параметров однодиодной модели в зависимости от изменения излучения и температуры.

$$I_{sc}(G, T) = I_{sc,STC} \frac{G}{G_{STC}} + K_i(T - T_{STC}) \quad (15)$$

$$V_{oc}(G, T) = V_{oc,STC} \left(1 + K_v(T - T_{STC}) + \frac{AKT}{q} \ln \left(\frac{G_{STC}}{G} \right) \right) \quad (16)$$

$I_{sc,STC}$ ток короткого замыкания при стандартных условиях испытаний (standard test conditions, далее- STC) (т.е., $G=1000$ Вт/м² и $T=25$ °C), $V_{oc,STC}$ напряжение разомкнутой цепи при STC, K_i относительный температурный коэффициент тока короткого замыкания, K_v относительный температурный коэффициент напряжения разомкнутой цепи. Производители всегда указывают эти параметры в техническом описании фотоэлектрических модулей.

$$R_{sh}(G) = R_{sh,STC} \frac{G_{STC}}{G} \quad (17)$$

$$A(T) = A_{STC} \frac{T}{T_{STC}} \quad (18)$$

$$R_s(G, T) = R_{s,STC} \frac{T}{T_{STC}} \left(1 - 0.217 \ln \left(\frac{G_{STC}}{G} \right) \right) \quad (19)$$

$$I_{ph}(G, T) = \left(\frac{R_s(G, T) + R_{sh}(G)}{R_{sh}(G)} \right) I_{sc}(G, T) \quad (20)$$

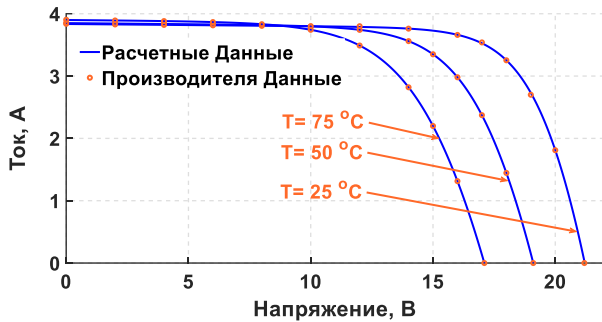
$$I_o(G, T) = \frac{\left(I_{sc}(G, T) - \frac{V_{oc}(G, T) - I_{sc}(G, T) R_s(G, T)}{R_{sh}(G)} \right)}{\frac{q V_{oc}(G, T)}{e n_s A(G, T) k}} \quad (21)$$

Наконец, этапы расчета параметров по предложенной модели обобщены на рисунке 2.

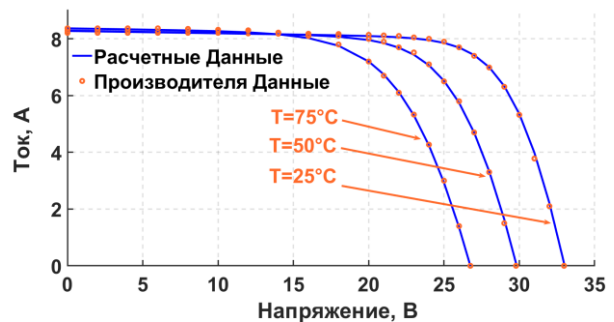


Рисунок 2 – Блок-схема предложенного алгоритма параметризации.

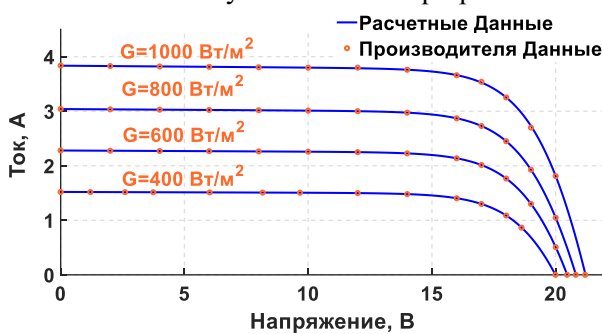
Чтобы проверить точность предложенной модели, предыдущие уравнения были реализованы в MATLAB. Результаты были сравнены с данными производителя двух коммерческих фотоэлектрических модулей, т. е. Solarex MSX-60 и Kyocera KC100GT. На рисунках 3 и 4 показаны ВАХ, рассчитанные с использованием предложенной модели, в сравнении с характеристиками, выданными производителем для модулей MSX-60 и KC100GT при различных значениях излучения и температуры. Наблюдается сходство между расчетными данными и данными, предоставленными производителем при различных погодных условиях. Чтобы оценить точность предложенной модели, соответствующие значения нормализованной среднеквадратичной ошибки (%) [normalized root means square error percentage, далее – nRMSE (%)] рассчитываются для двух модулей (MSX-60 и KC100GT) при различных условиях, как показано в таблице 1. Как видно из этой таблицы, предложенный метод дает статистически точные результаты, что доказывает обоснованность предложенной методики идентификации параметров для фотоэлектрических модулей.



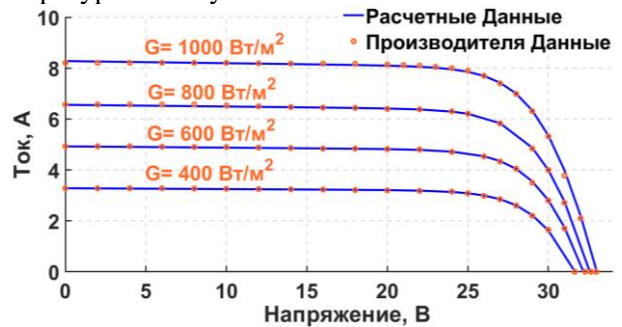
(a) Solar MSX-60



(b) Solar KC100GT

Рисунок 3 – ВАХ при различных температурах и излучении 1000 Вт/м².

(a) Solar MSX-60



(b) Solar KC100GT

Рисунок 4 – ВАХ при различных уровнях излучения и температуре 25 °С.

Таблица 1 – nRMSE (%) для модулей MSX-60 и KC100GT.

Уровень излучения (Вт/м ²)	Температура ячейки (°С)	nRMSE (%) модуля MSX-60	nRMSE (%) модуля KC100GT
1000	25	0.35	0.68
1000	50	0.31	0.73
1000	75	0.37	0.64
800	25	0.12	0.65
600	25	0.88	0.88
400	25	0.46	0.41

Кроме того, проверка предложенной модели была проведена в рамках нескольких экспериментов, которые были реализованы на установленной на открытом воздухе испытательной платформе на крыше экспериментального корпуса факультета инженерии, отделение в Кене в Университете Аль-Азхар/Египет, как показано на рисунке 5. В испытаниях на открытом воздухе использо-

вались модули двух производителей (EN156P и AS1506). Для измерения ВАХ фотоэлектрических модулей переменное сопротивление нагрузки первоначально устанавливается на нулевое значение (короткое замыкание). Ток и напряжение солнечного элемента измеряются с помощью амперметра и вольтметра, соответственно. Сопротивление нагрузки увеличивается (от минимального значения до разомкнутой цепи), и соответствующие напряжение и ток измеряются, а затем заносятся в таблицу. Облучение в одной плоскости и температура задней поверхности фотоэлектрического модуля измеряются одновременно с помощью пиранометра и датчиков температуры, соответственно.

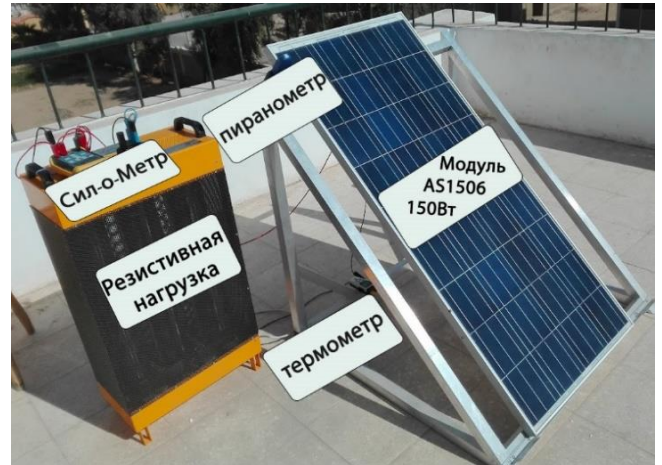
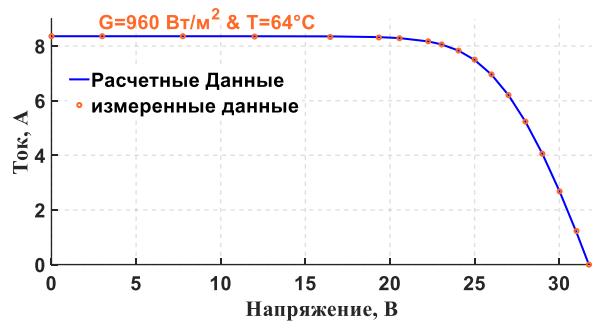
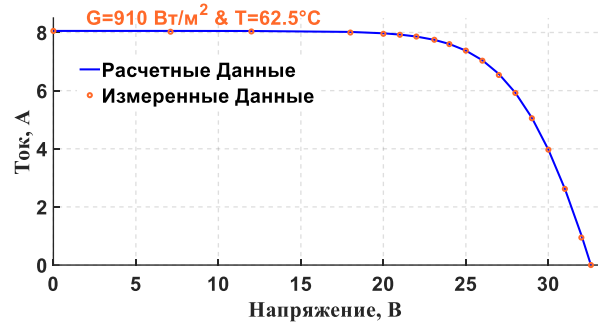


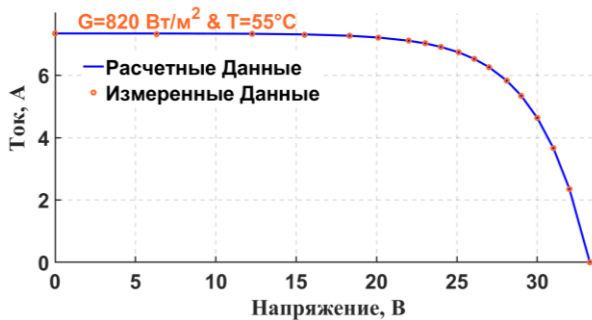
Рисунок 5 – Открытая испытательная платформа для фотоэлектрических модулей.



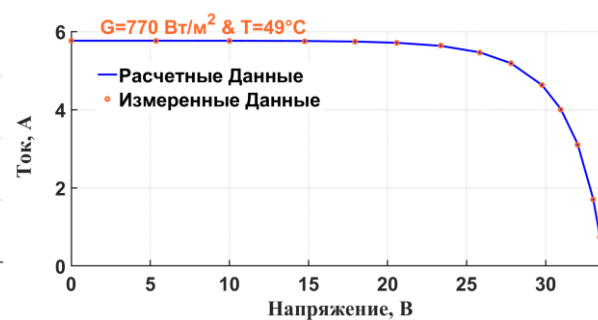
(а)



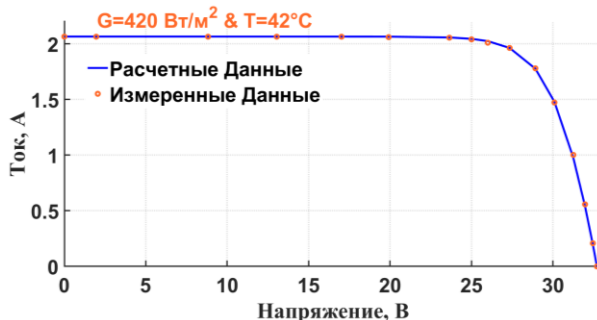
(б)



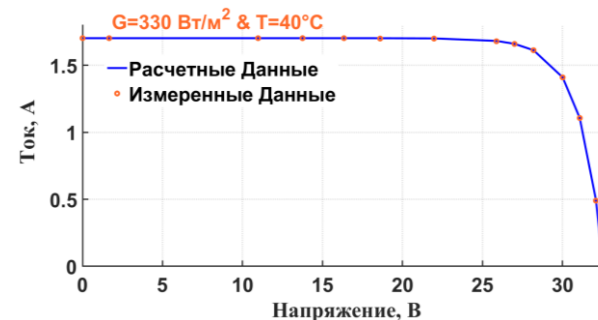
(в)



(г)



(д)



(е)

Рисунок 6 – ВАХ модуля EN156P при различных условиях окружающей среды.

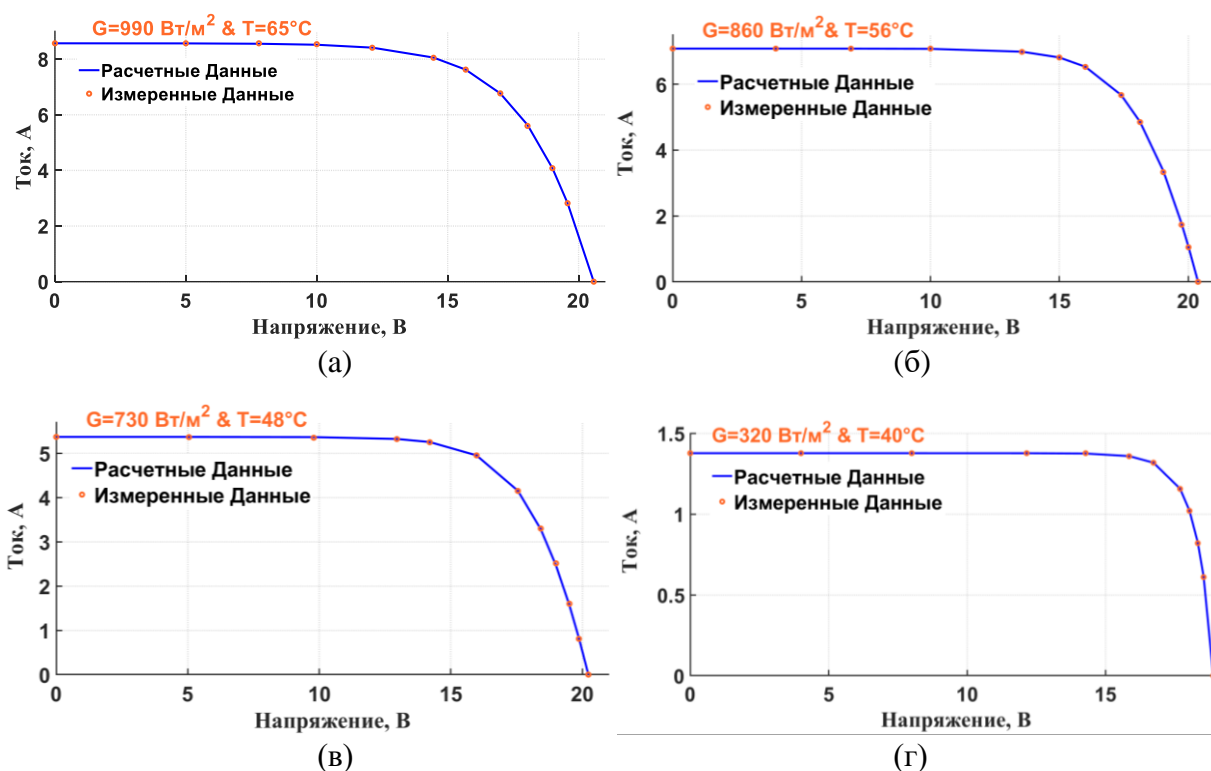


Рисунок 7 – ВАХ модуля AS1506 при различных условиях окружающей среды.

На рисунках 6 и 7 показаны ВАХ для EN156P и AS1506, соответственно, для различных значений освещенности и температуры. ВАХ, полученные с помощью предложенной модели, схожи с экспериментальными данными для обоих модулей. В таблицах 2 и 3 приведены значения nRMSE (%) для EN156P и AS1506 соответственно при различных погодных условиях. Анализ результатов показывает, что параметры, полученные с помощью предложенной модели, соответствуют ВАХ для всех модулей при различных погодных условиях. Предполагается, что предложенная модель может стать ценным инструментом проектирования для разработчиков фотоэлектрических систем.

Таблица 2 – значения nRMSE (%) для модуля EN156P

Уровень излучения (Вт/м ²)	Температура ячейки (°C)	nRMSE(%)
960	64	0.2
910	62.5	0.37
820	55	0.11
770	49	0.25
420	42	0.54
330	40	0.12

Таблица 3 – значения nRMSE (%) для модуля AS150P

Уровень излучения (Вт/м ²)	Температура ячейки (°C)	nRMSE (%)
990	65	0.033
860	56	0.687
730	48	0.900
320	40	0.494

В главе 2 представлен новый метод MV-S на основе алгоритма P&O для быстрого отслеживания точки максимальной мощности фотоэлектрического модуля при быстрых изменениях погодных условий и минимизации колебаний вокруг точки максимальной мощности. На рисунке 8 (а) показаны характеристики фотоэлектрического модуля при различных уровнях облучения с различными точками MPP. Когда излучение меняется с G_1 на G_2 (Вт/м²), мгновенная мощность уменьшается на ΔP , и система работает далеко от точки MPP. Поэтому для получения новой точки максимальной мощности мгновенное напряжение должно быть сдвинуто на ΔV . Чтобы принять точное значение масштабного коэффициента, записывается несколько значений ΔP и соответствующие значения ΔV , а затем строится график. Рисунок 8(б)

показывает, что зависимость между напряжением и разностью мощностей не линейна. Поэтому трудно выбрать один масштабный коэффициент, подходящий для всех изменений уровня солнечного излучения. Следовательно, необходимо использовать несколько масштабных коэффициентов для увеличения скорости реакции МРРТ при внезапном изменении инсоляции. В данной работе три масштабных коэффициента (т. е. M_1 , M_2 и M_3) задаются для обеспечения высокой скорости и точности алгоритма. Наклон трех касательных может определить масштабные коэффициенты, как показано в следующем уравнении:

$$M_i = \frac{\Delta V_i}{\Delta P_i} \quad \& \quad i = 1,2,3 \tag{22}$$

Три масштабных коэффициента дают две пороговые мощности, P_{thr1} и P_{thr2} . При небольшом изменении излучения (т. е. ΔG мало) происходит небольшое изменение мощности (ΔP), что требует небольшого шага (ΔV). Таким образом, в данном случае подходит масштабный коэффициент (M_3). При большем изменении излучения происходит большее изменение мощности. Таким образом, когда изменение мощности больше P_{thr2} и меньше P_{thr1} , для этого условия подходит коэффициент M_2 . Если изменение мощности очень сильно превышает P_{thr1} , то в этой ситуации используется масштабный коэффициент M_1 , когда для высокого быстродействия требуется большой шаг ΔV . Блок-схема алгоритма MV-S МРРТ показана на рисунке 9.

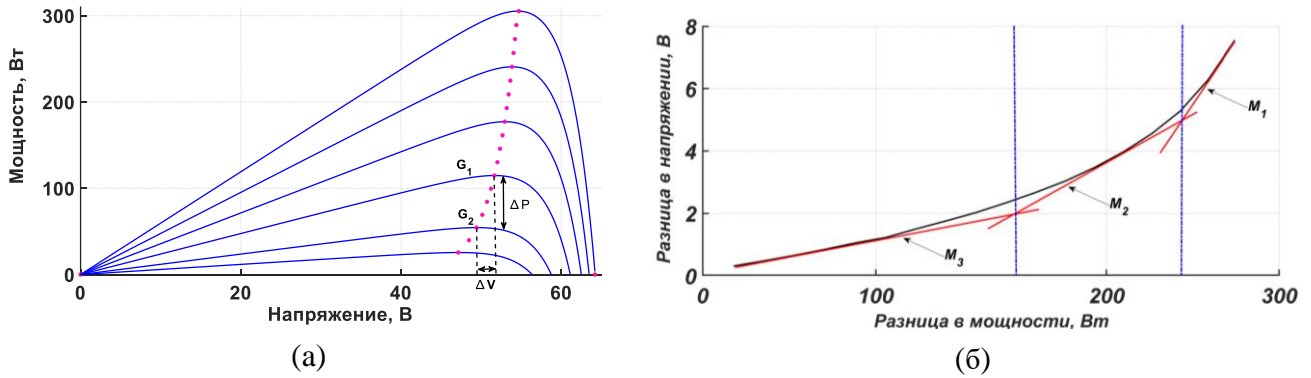


Рисунок 8 – (а) P-V характеристики фотоэлектрических элементов при различных уровнях облучения (б) Взаимосвязь между различными напряжениями и мощностью.

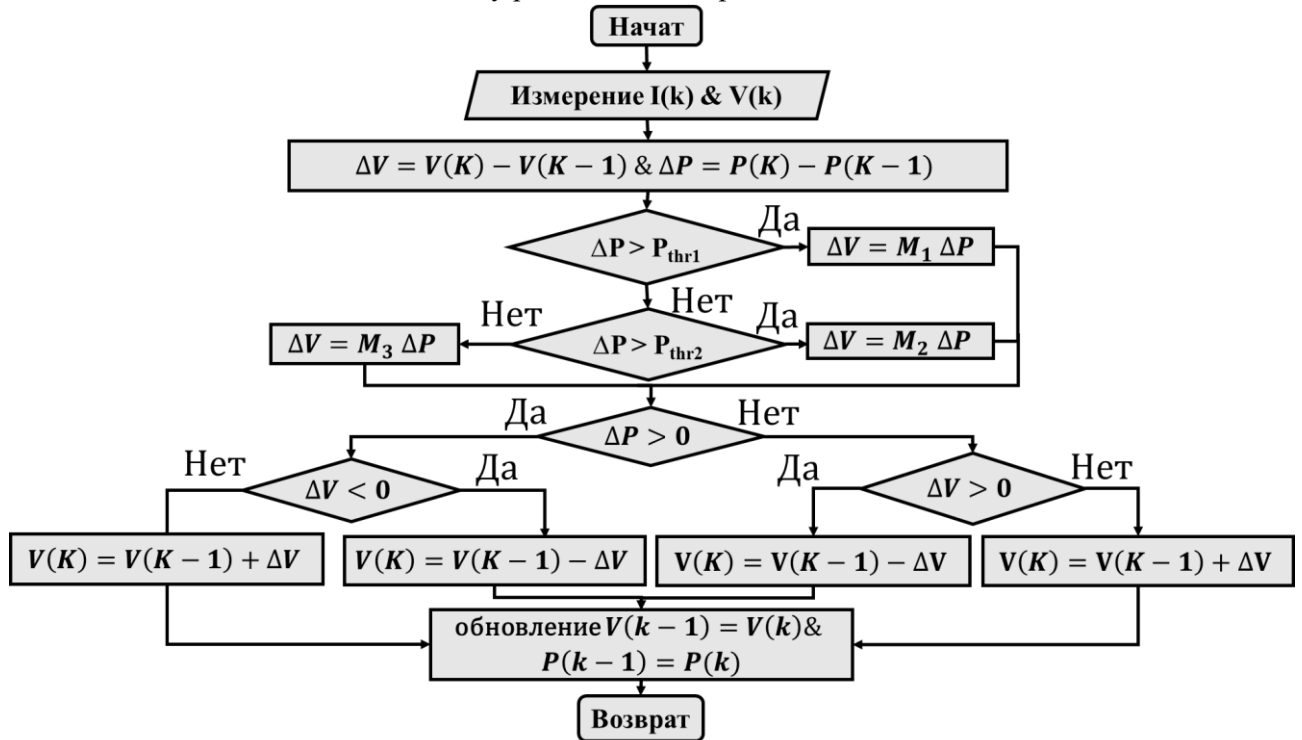


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма MV-S МРРТ.

Для проверки возможностей и эффективности предложенного алгоритма используется компьютерное моделирование на программном обеспечении Matlab/Simulink. Для моделирования выбран коммерческий фотоэлектрический модуль (т. е. MSX-60) для удовлетворения электрического спроса нагрузки. В первом случае предполагается, что температура постоянна и составляет $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, а солнечная радиация изменяется с шагом 1000 Вт/м^2 , 800 Вт/м^2 , 600 Вт/м^2 , 500 Вт/м^2 и 400 Вт/м^2 , как показано на рисунке 10 (а). Сравнение производительности предложенных методов MV-S, переменного шага (variable-step, далее – V-S) и двухшагового (two-step, далее – T-S) метода показано на рисунке 10 (б). Как видно из рисунка 10 (в), предложенный алгоритм MV-S впервые фиксирует MPP через $0,013\text{ с}$, что соответствует (т. е. уровню излучения 1000 Вт/м^2 и температуре ячейки $25\text{ }^{\circ}\text{C}$) против $0,032\text{ с}$ для метода T-S и $0,06\text{ с}$ для алгоритма V-S. При уровне излучения 600 Вт/м^2 и температуре ячейки $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ амплитуда колебаний выходной мощности вокруг MPP уменьшается до $0,06\%$ при использовании метода MV-S от ее среднего значения против $0,75\%$ для V-S и $1,05\%$ для T-S алгоритма, как показано на рисунке 10 (г).

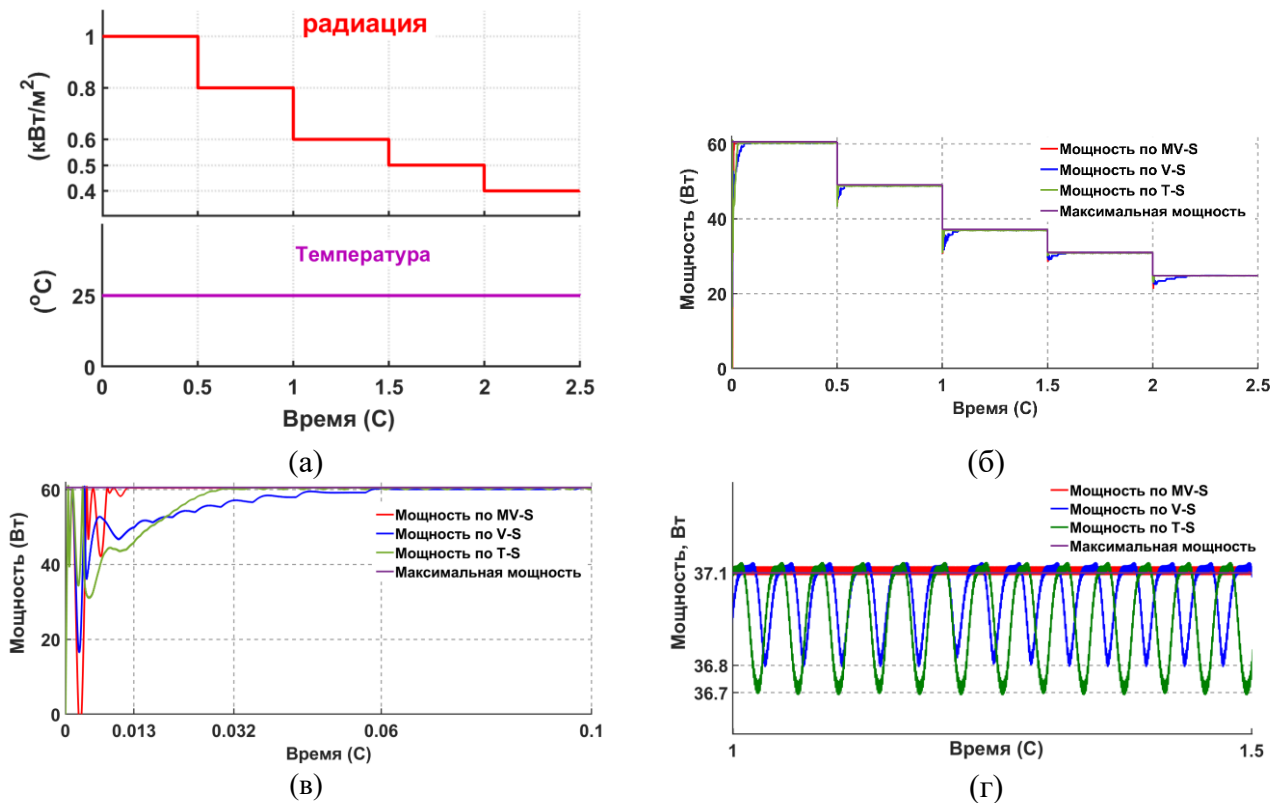


Рисунок 10 – опыт 1 (а) график солнечной радиации и температуры, (б) производительность (в) динамический отклик (г) колебания мощности в установившемся режиме, полученные методом MV-S в сравнении с алгоритмами V-S и T-S.

Во втором случае: температура постепенно снижается от $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ с шагом $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, а солнечное излучение изменяется между уровнями 1000 Вт/м^2 и 400 Вт/м^2 (т.е. 800 Вт/м^2 , 600 Вт/м^2 , 500 Вт/м^2), как показано на рисунке 11(а). Эффективность отслеживания предложенных методов MV-S, V-S и T-S представлена на рисунке 11(б). Как видно из рисунка 11(в), время сходимости отслеживания мощности для предложенного MV-шага является самым быстрым. В частности, время отслеживания составляет $0,013\text{ с}$ для предложенного MV-S, в то время как для T-S требуется $0,032\text{ с}$, а для V-S - $0,082\text{ с}$ на первом уровне излучения. При уровне излучения 600 Вт/м^2 и температуре ячейки $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ средние значения эффективности методов MV-S и T-S имеют наименьшие колебания в устойчивом состоянии по сравнению с методом переменного шага, как показано на рисунке 11(г). Предыдущие примеры показывают, что MV-S имеет наименьшее время отслеживания для достижения максимальной мощности в устойчивом состоянии, наименьшие колебания и наибольшую выходную мощность.

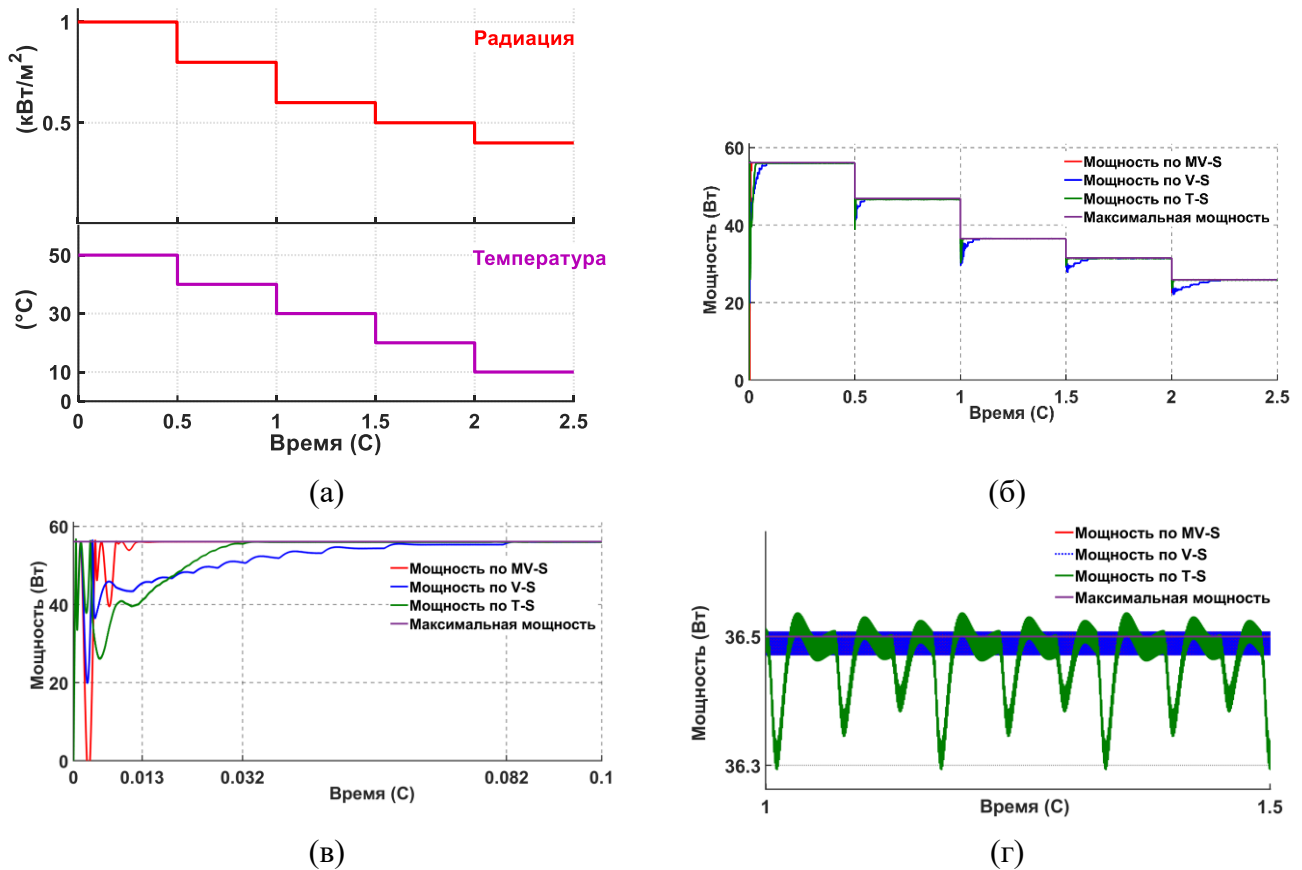


Рисунок 11 – опыт 2 (а) график солнечной радиации и температур, (б) производительность (в) динамический отклик (г) колебания мощности в установившемся режиме, полученные методом MV-S в сравнении с алгоритмами V-S и T-S.

В главе 3 представлен новый метод прямого управления на основе модели ANFIS. В этом методе рабочий цикл может быть отрегулирован непосредственно в методе MPPT, а вычислительный процесс и оценка для настройки коэффициентов усиления PI-регулятора больше не требуются. Кроме того, обучающие данные для предлагаемой методики извлекаются с помощью алгоритма MV-S, что позволяет избежать ошибок, обычно присутствующих в экспериментальном наборе данных.

В предлагаемой методике ANFIS-MPPT входными параметрами являются излучение фотоэлектрической панели (G) и температура (T). В то время как выходным параметром является оптимальный рабочий цикл (D_m). Первым шагом в построении MPPT-ANFIS контроллера является получение набора данных вход-выход для обучения. Для создания обучающего набора данных диапазоны температуры окружающей среды и солнечной радиации делятся на деления, и в каждой паре этих делений рассчитывается и записывается D_m . D_m рассчитывается автономно для каждой температуры окружающей среды и уровня радиации следующим образом:

Шаг 1: Смоделируйте фотоэлектрическую систему, используя алгоритм MV-S, как упоминалось в главе 2.

Шаг 2: Использование значения (G и T) в предложенной фотоэлектрической системе.

Шаг 3: Отслеживание выходной мощности PV, пока она не достигнет MPP, затем регистрируется и записывается соответствующий рабочий цикл D_m .

Шаг 4: Эти сгенерированные данные будут использоваться для обучения и тестирования модели ANFIS, и они будут представлены в формате массива с двумя колонками для входных данных (T и G) и одной колонкой для выходных данных (D_m).

После сбора набора входных и выходных данных количество функций принадлежности (membership functions, далее – MFs) для T и G устанавливается равным 7 и 9 соответственно, по-

сколькx влияние освещенности на кривые PV больше, чем влияние температуры ячейки. В результате получается 63 нечетких правила, как показано на рисунке 12. Редактор ANFIS в MATLAB предоставляет несколько типов для входных и выходных MFs. В таблице 4 приведена средняя квадратическая ошибка (mean square error, далее – MSE) различных MFs за 100 эпох с допуском ошибки 0,1% для поиска лучших. Как показано в таблице 4, линейный тип для выходного MFs и trimf для входного MFs являются лучшими, с MSE 0,17 %. Рассчитанные (автономное моделирование) и предсказанные (применение предложенной модели) значения D_m сравниваются при одинаковых атмосферных условиях, как показано на рисунке 13.

Таблица 4 – MSE для различных типов МП для выходов и входов модели ANFIS.

Входные MFs	Для линейного типа выхода MFs		Для постоянного типа выхода MFs	
	MSE	Кол-во эпох	MSE	Кол-во эпох
gbellmf	0.002213	100	0.008462	100
psigmf	0.001822	10	0.006386	16
trimf	0.001708	25	0.007950	100
gauss2mf	0.002514	100	0.012000	100
dsigmf	0.001819	10	0.006283	16
trapmf	0.002558	100	0.012400	100
gaussmf	0.002720	100	0.008178	100
pimf	0.002498	100	0.013200	100

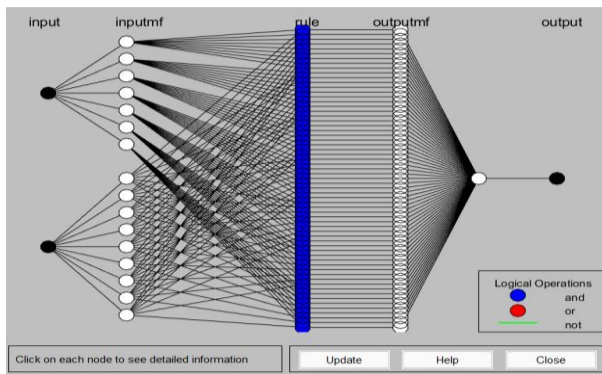


Рисунок 12 – Сгенерированная структура модели ANFIS

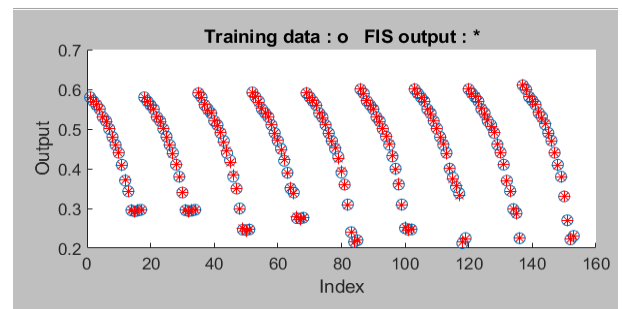


Рисунок 13 – Тренировочные данные в сравнении с выходными данными ANFIS

Предлагаемый регулятор численно смоделирован с помощью MATLAB/Simulink для проверки его эффективности. Как показано на рисунке 14 (а), предполагается, что температура постоянна и составляет 25°C , а солнечная радиация изменяется между значениями 1000 Вт/м^2 и 400 Вт/м^2 . Сравнительное исследование производительности методов ANFIS, искусственной нейронной сети (artificial neural network, далее – ANN) и нечеткого логического контроллера (fuzzy logic controller, далее – FLC) представлено на рисунке 14 (б). Как показано на рисунке 14 (в), предложенный алгоритм ANFIS достигает MPP через 0,009 с (при $G=1000 \text{ Вт/м}^2$) против 0,02 с для метода ANN и 0,03 с для алгоритма FLC. Кроме того, выходная мощность колеблется вокруг MPP с 0,02% при использовании предложенного контроллера по сравнению с 0,05% для FLC и 1,07% для алгоритма ANN при интенсивности излучения 600 Вт/м^2 (рисунок 14(г)).

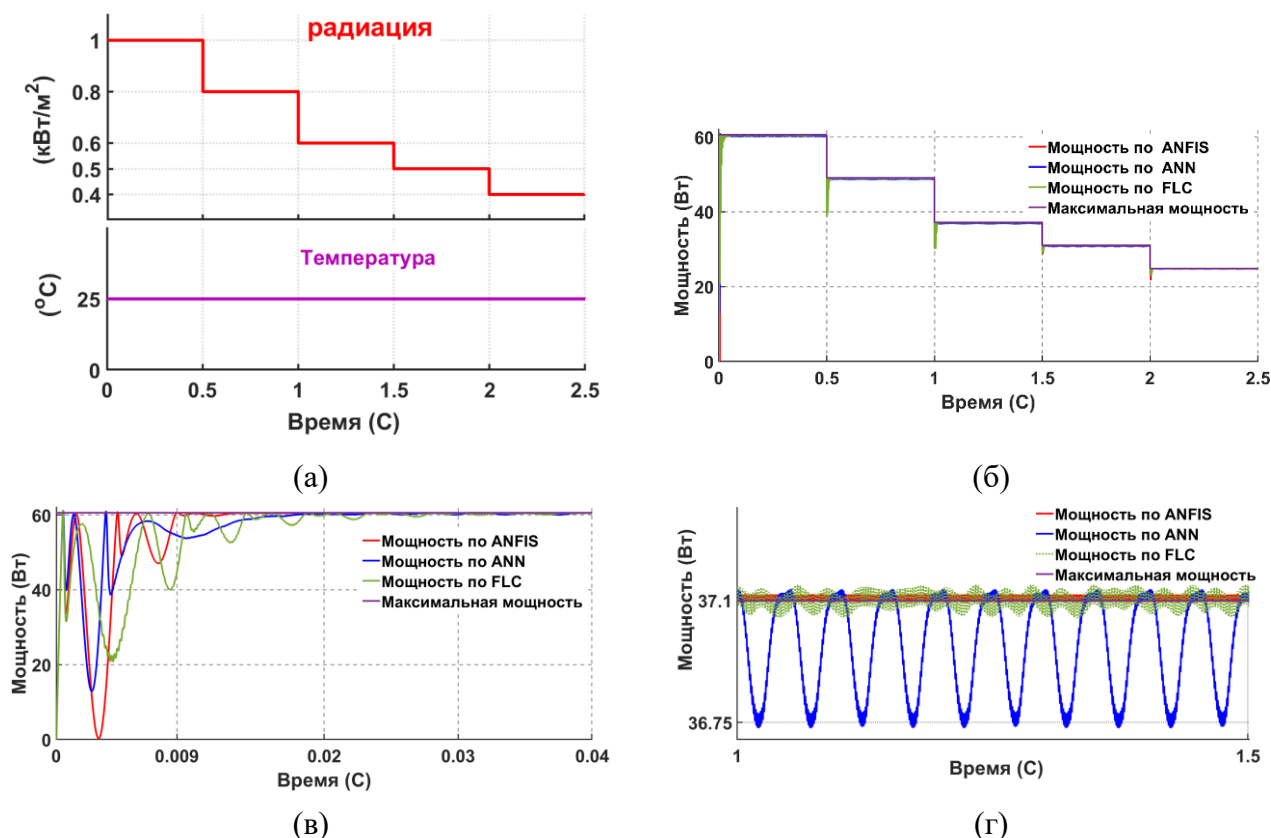
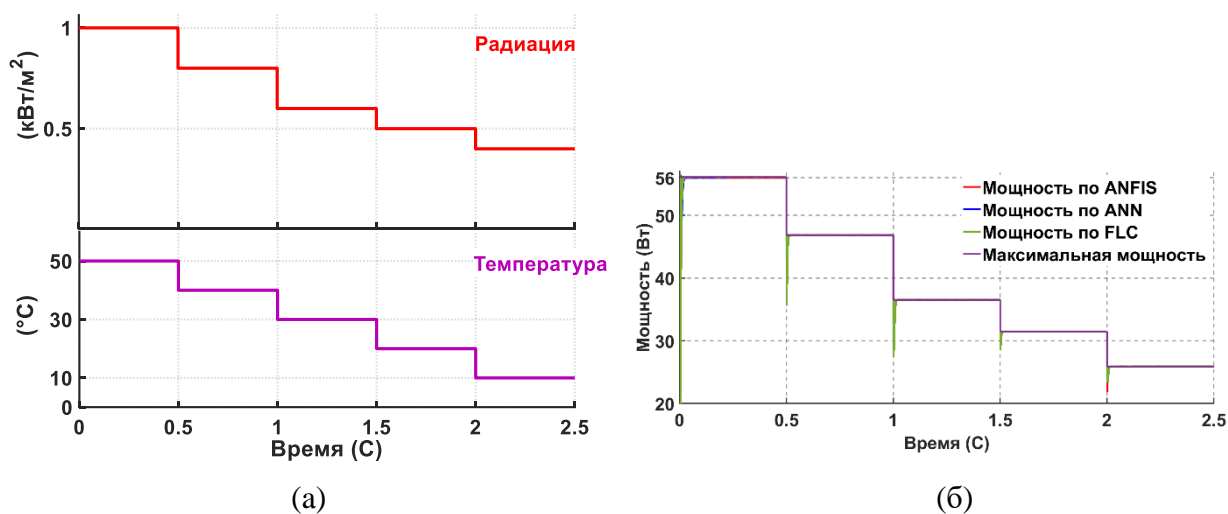
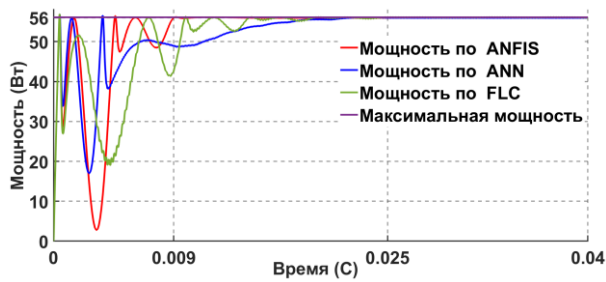


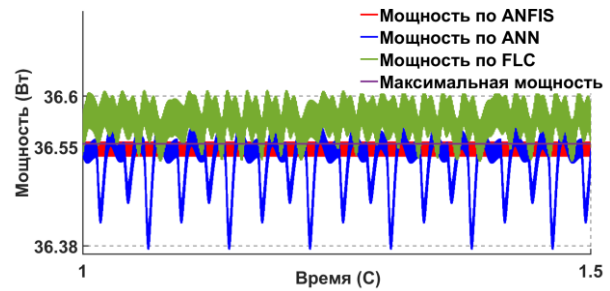
Рисунок 14 – опыт 1 (а) график солнечной радиации и температуры, (б) производительность (в) динамический отклик (г) колебания мощности в установившемся режиме, полученные методом ANFIS в сравнении с алгоритмами ANN и FLC.

Во втором случае, как показано на рисунке 15 (а), температурные уровни изменяются с различными значениями 50°C, 40°C, 30°C, 20°C и 10°C. С другой стороны, солнечная радиация изменяется с шагом между 1000 Вт/м² и 400 Вт/м². На рисунках 15 (б и в) показана эффективность методов ANFIS, FLC и ANN и время сходимости для них при отслеживании мощности. Контроллер ANFIS является самым быстрым с временем отслеживания 0,009 с против 0,025 с для ANN и FLC на первом уровне облучения. Кроме того, колебания MPP уменьшаются до 0,05% с помощью предложенного контроллера (показано на рисунке 15 (г)) при интенсивности облучения 600 Вт/м² и температуре 30 °C, по сравнению с 0,13% для FLC и 0,46% для алгоритма ANN.





(в)



(г)

Рисунок 15 – опыт 2 (а) график солнечной радиации и температуры, (б) производительность (в) динамический отклик (г) колебания мощности в установившемся режиме, полученные методом ANFIS в сравнении с алгоритмами ANN и FLC.

В главе 4 предлагается подход к управлению фотоэлектрической системой, подключенной к сети, для выдачи во внешнюю сеть электроэнергии требуемого качества в соответствии со стандартом IEEE 929. Принципиальная схема подключенной к сети фотоэлектрической системы показана на рисунке 16. Электрическая схема включает в себя фотоэлектрический массив мощностью 500 кВт, DC-DC преобразователь, инвертор на базе источника напряжения (voltage source inverter, далее – VSI), LC-фильтр, промежуточный трансформатор PV и распределительную сеть. Схема замещения Тевенина используется для представления электросети как трехфазного источника напряжения с последовательным сопротивлением. Статические и динамические нагрузки размещаются между фотоэлектрической системой и сетью, чтобы имитировать некоторые типичные нагрузки в распределительной сети. Для фотоэлектрических систем, подключенных к сети, используются двухступенчатые контроллеры: контроллер для получения оптимальной мощности от фотоэлектрического массива путем регулирования повышающего преобразователя. В данной работе управление повышающим преобразователем осуществляется с помощью метода ANFIS для достижения MPP. Предлагаемая технология ANFIS-MPPT использует уровень облучения (G) и температуру окружающей среды (T) фотоэлектрической панели в качестве входных параметров, а также оптимальный рабочий цикл (D_m) в качестве выходных параметров, как показано на рисунке 16. Упомянутый регулятор представляет собой широтно-импульсную модуляцию с контролем тока (current-controlled pulse width modulation, далее – CCPWM) в системе координат d-q (synchronous reference frame, далее – SRF), которая поддерживает напряжение звена постоянного тока VSI на постоянном опорном значении и регулирует реальную и реактивную мощность, выдаваемую в сеть.

Для того чтобы проверить осуществимость предложенного метода управления, была смоделирована численная модель всей системы для 500 кВт ферм фотоэлектрического массива из 8283 модулей. Температура предполагается неизменной на уровне 25°C , а солнечное излучение изменяется ступенчато между уровнями 1000 Вт/м^2 , 800 Вт/м^2 , 500 Вт/м^2 , как показано на рисунке 17, для проверки эффективности стратегий управления. На рисунках 18 и 19 показано поведение выходного тока и напряжения на шинах фотоэлектрического массива во время моделирования. Как показано, влияние инсоляции на напряжение на выводе массива незначительно по сравнению с влиянием на выходной ток. На рисунках 20 и 21 показаны осциллограммы тока и напряжения трехфазной сети в условиях тренировки. Они почти близки к синусоидальным формам волны. На рисунке 22 показано, что ток и напряжение сети находятся в фазе (работа "UPF"). Поведение токов в системе координат d-q в темпе переходного процесса представлено на рисунке 23. Реальная и реактивная мощности на (point of common coupling, далее – PCC) показаны на рисунке 24. Рисунок 25 иллюстрирует поведение напряжения звена постоянного тока, которое поддерживалось неизменным на уровне 1,1 кВ контроллером звена постоянного тока. Проводится быстрое преобразование Фурье (fast fourier transform, далее – FFT), как показано на рисунке 26. Как видно из спектра, величина полного гармонического искажения (total harmonic distortion, далее – THD) формы сигнала тока сети на THD 1,35% меньше 5%, рекомендованных стандартом IEEE 929.

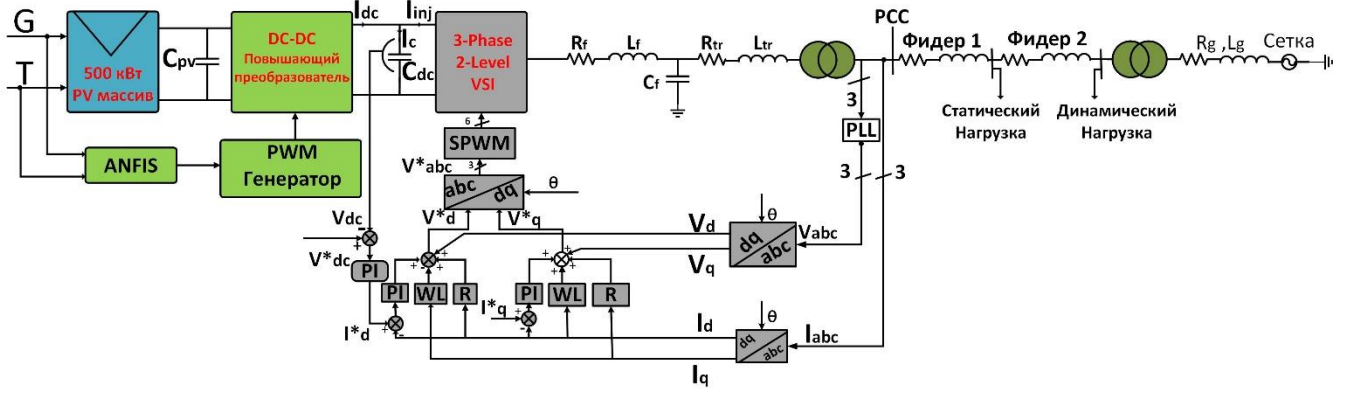


Рисунок 16 – Принципиальная схема фотоэлектрической системы, подключенной к внешней сети, с изображением ее блоков управления

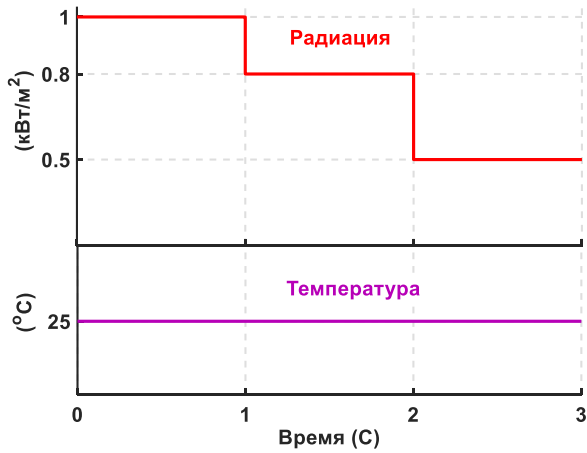


Рисунок 17 – График изменения солнечной радиации и температуры

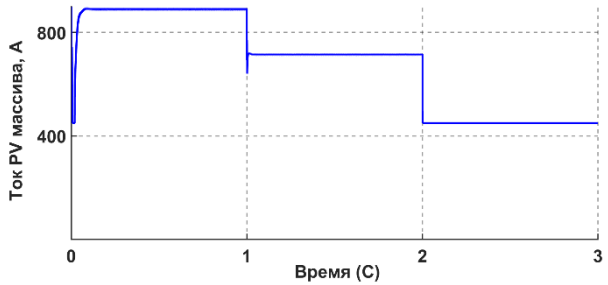


Рисунок 18 – Ток фотоэлектрического массива

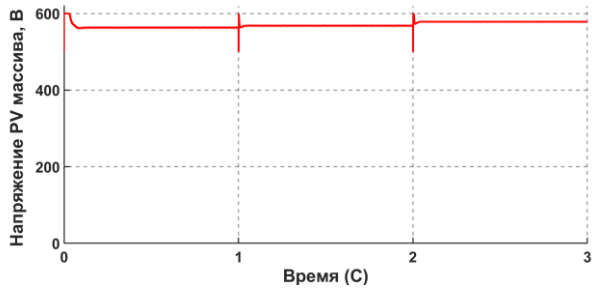


Рисунок 19 – Напряжение фотоэлектрического массива

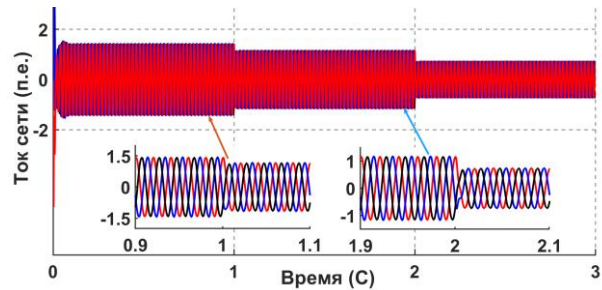


Рисунок 20 – Ток сети в PCC

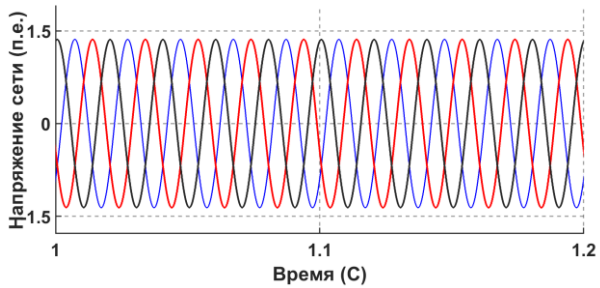


Рисунок 21 – Напряжение сети на PCC

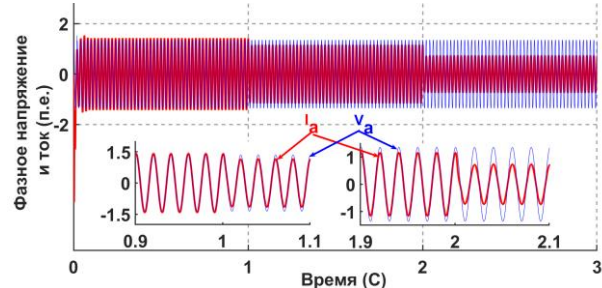


Рисунок 22 – Динамическое изменение фазного тока и фазного напряжения

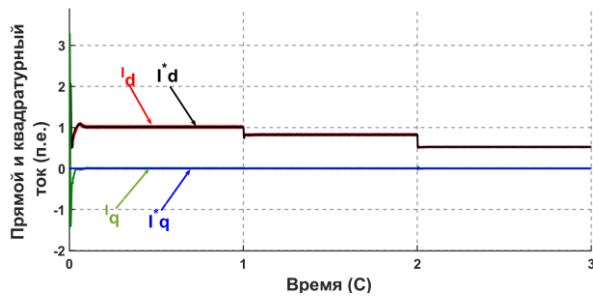


Рисунок 23 – Прямая и квадратурная составляющие инжектируемого, тока

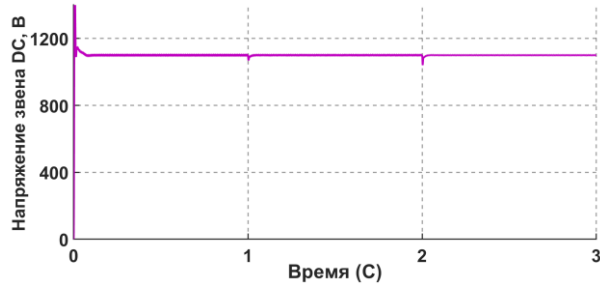


Рисунок 25 – Напряжение конденсатора звена постоянного тока

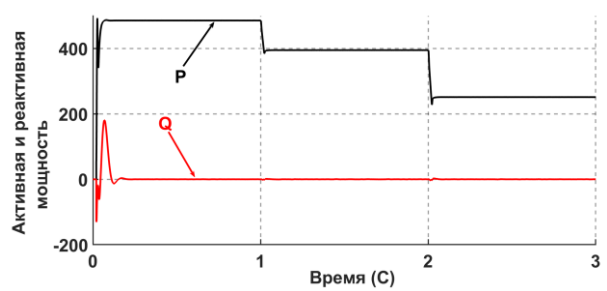


Рисунок 24 – Активная и реактивная мощности в РСС

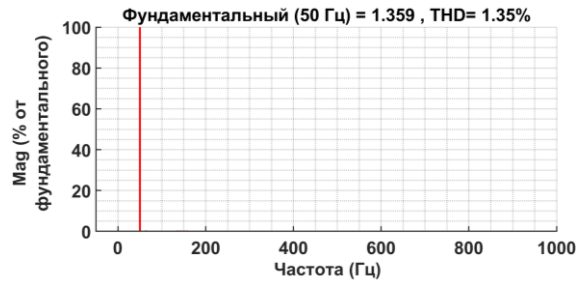


Рисунок 26 – Спектр тока сети в РСС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена детальному моделированию и проектированию системы управления фотоэлектрическим генератором, подключенным к сети. Целью было разработать модель PV, которая позволяет с высокой точностью предсказать ВАХ и P-V кривые солнечной панели. Также была представлена эффективная технология отслеживания точки максимальной мощности для достижения максимальной эффективности работы фотоэлектрического модуля. Более того, была использована технология трехфазного двухуровневого VSI для подачи высококачественной энергии в сеть для реализации стандарта IEEE 929. Основные результаты исследования можно резюмировать следующим образом:

1. Для расчета параметров модели и моделирования работы фотоэлектрического модуля был предложен новый метод, основанный на однодиодной модели. В предложенном методе для этой цели используются только паспортные значения, без каких-либо приближений или упрощений, которые могут повлиять на достоверность результатов.
2. Производительность предложенной модели сравнивалась с данными производителей и измерениями для различных фотоэлектрических модулей. Было обнаружено, что во всех случаях при различных значениях освещенности и температуры предложенная модель превосходит другие.
3. Представленная модель может быть использована в качестве полезного инструмента оценки, особенно для разработчиков фотоэлектрических систем и исследователей, при изменяющихся внешних условиях, благодаря значительным преимуществам при моделировании работы фотоэлектрических систем.
4. Предложенный алгоритм MV-S позволял получать максимальную мощность с высокой эффективностью при быстрой смене погоды, минимизировал колебания вокруг MPP, обеспечил высокое быстродействие, и, наконец, повысил устойчивость работы фотоэлектрической системы.
5. Был предложен высокоэффективный MPP-трекер на основе ANFIS с прямым управлением для фотоэлектрических генераторов. Рабочий цикл повышающего преобразователя регулируется напрямую, поэтому в данном методе исключен PI-контур управления. Обучающие данные для предложенного метода были получены с помощью метода MV-S, чтобы избежать ошибок, обычно включаемых в экспериментальный набор данных.
6. Результаты показали, что алгоритм ANFIS-MPPT продемонстрировал более высокую генерируемую мощность и отсутствие отклонений от точки MPP в различных климатических условиях,

при условии быстродействия, когда время достижения устойчивого состояния не превышает 0,009 с.

7. Полученные результаты методологии управления для фотоэлектрической системы, подключенной к сетевому методу ANFIS-MPPT, показали, что предлагаемая методология управления обеспечивает отличную устойчивую реакцию, высокое быстродействие, низкий ток THD, работу с единым коэффициентом мощности, точное и надежное отслеживание MPP.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК:

1. Осман М. Н., Рефаат А., Коровкин Н.В. Новый метод определения параметров однодиодной модели фотоэлемента на основе табличных данных // Электричество, №2, С. 16–21, 2021.
2. Рефаат А., Осман М. Н., Коровкин Н.В. Оптимальное извлечение энергии из неоднородно стареющего фотоэлектрического массива с использованием сумматора тока // Электричество, №7, С. 59–68, 2019.
3. Ахмед М. К., Осман М. Н., Коровкин Н.В. Оптимизация расположения и мощности возобновляемых распределенных источников энергии с использованием модифицированного метода роя частиц // Электричество, №12, С. 15–27, 2021.
4. Мамдух Ахмед, Мохамед Осман, Н. В. Коровкин. Оптимальное распределение реактивной мощности в энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии с использованием многоцелевого алгоритма роя частиц // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 1. С. 5–20.

Публикации на английском языке, индексируемые в международных цитатно-аналитических базах данных (Scopus, Web of Science):

5. M. H. Osman, M. A. Elseify, M. K. Ahmed, N. V. Korovkin and A. Refaat, " Highly Efficient MPP Tracker based on Adaptive Neuro-fuzzy Inference System for Stand-Alone Photovoltaic Generator System // International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), 2022, Vol. 12, № 1. P. 208-217.
6. Osman M.H., Refaat A. Adaptive multi-variable step size P&O MPPT for high tracking-speed and accuracy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019. Vol. 643, № 1. P. 012050.
7. M. H. Osman, M. K. Ahmed, A. Refaat and N. V. Korovkin, "A Comparative Study of MPPT for PV System Based on Modified Perturbation & Observation Method," 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2021, pp. 1023-1026.
8. Osman M.H. et al. Maximum Power Point Tracking for Grid-tied PV System Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System // Proceedings - ICOECS 2021: 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. P. 534–540.
9. Ahmed Refaat, Mohamed Hassan Osman, Nikolay V. Korovkin, Current collector optimizer topology to extract maximum power from non-uniform aged PV array, Energy, Volume 195, 2020, 116995.
10. Refaat A., Osman M.H., Korovkin N. V. Current collector optimizer topology to extract maximum power from non-uniform aged PV array // Energy. 2020. Vol. 195. P. 116995.
11. M. K. Ahmed, M. H. Osman, A. A. Shehata and N. V. Korovkin, "A Solution of Optimal Power Flow Problem in Power System Based on Multi Objective Particle Swarm Algorithm," 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2021, pp. 1349-1353.
12. M. K. Ahmed, M. H. Osman and N. V. Korovkin, "OPF Solution Based on improved PSO algorithm considering stochastic solar and wind power," 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), 2021, pp. 549-554.