

На правах рукописи



Белова Ирина Анатольевна

**ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ГЕНЕРИРОВАНИЯ НА БАЗЕ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С НЕЙРОСЕТЕВОЙ
СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Зиновьев Геннадий Степанович**,
доктор технических наук, профессор, кафедра
Электроники и электротехники, профессор.

Официальные оппоненты: **Гарганеев Александр Георгиевич**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский Томский политехнический
университет», отделение электроэнергетики и
электротехники, профессор;

Волков Александр Геннадьевич,
кандидат технических наук, Федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Московский
физико-технический институт (национальный
исследовательский университет)», НТЦ Автономная
энергетика, ведущий инженер.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (г. Томск)

Защита диссертации состоится «08» сентября 2022 года в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации www.nstu.ru
Автореферат разослан «__» мая 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Максим Александрович Дыбко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время всё больше внимания уделяется возобновляемым источникам энергии, в том числе солнечной энергетике. Солнечная энергетика стала одной из нескольких перспективных направлений альтернативной энергетики. Снижение стоимости солнечных модулей за последние несколько лет и повышение цен на нефтехимические виды топлива, используемые для производства электроэнергии, привели к более широкому использованию фотоэлектрических систем. Однако генерирование солнечной энергии имеет ряд проблем, связанных с относительно низкой эффективностью и несовершенством устройств преобразования энергии от этих систем. Всё это требует разработки фотоэлектрических систем генерирования на современной элементной базе и систем управления полупроводниковым преобразователем, позволяющих достигать высоких показателей энергетической эффективности.

С каждым годом солнечная энергетика становится все более популярной. Многие страны встали на путь развития солнечной энергетике, как альтернативного источника энергии. Основными преимуществами фотоэлектрических систем, являются отсутствие выбросов парниковых газов, низкие эксплуатационные расходы, меньше ограничений в отношении места установки и отсутствие движущихся систем и как следствие механических шумов.

Генерирование всей энергии, которую можно получить от солнечной батареи в конкретный момент времени, является одним из наиболее важных факторов, повышающих эффективность системы в целом. Т.е. для того, чтобы отобрать от солнечной батареи всю производимую ею энергию, необходимо отслеживать точку максимальной мощности солнечной батареи (СБ).

Для достижения цели повышения энергоэффективности преобразователей, используемые в фотоэлектрических электростанциях, должны иметь систему управления, работающую на основе алгоритма отслеживания точки максимальной мощности, которая и будет ключом к максимальной эффективности солнечной энергосистемы. В зарубежной литературе алгоритм более известен под названием Maximum Power Point Tracking (MPPT).

Для MPPT применяются специализированные контроллеры, которые используют один из алгоритмов для оптимизации рабочей точки солнечных батарей.

Таким образом, при проектировании и создании современных эффективных фотоэлектрических установок должны решаться задачи разработки соответствующей системы управления.

Степень разработанности темы исследования. Переход к системам управления с отслеживанием точки максимальной мощности солнечных батарей является современной тенденцией развития фотоэлектрических систем генерирования. Широкою известность получили работы по MPPT таких авторов, как Hohm, D.P., Esmar, T., Chapman, P.L., Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., Vitelli, M., Обухов С.Г., Семенов С.М. и др.

Но классические, аналоговые алгоритмы не являются лучшим решением для задачи MPPT, несмотря на их очевидные преимущества. Данные алгоритмы

довольно медленно выходят на точку максимальной мощности и ограничены в точности работы. Для достижения более высокой точности, алгоритмы подвергаются различным модификациям, но при этом ухудшаются их динамические характеристики. Следовательно, задача отслеживания точки максимальной мощности все еще является актуальной.

В настоящее время исследование возможностей искусственных нейронных сетей (ИНС) и расширение их области применения является приоритетным направлением для многих исследователей. Применение искусственных нейронных сетей исследуют: Мартинович М.В., Степанова Д.А., Лунева Е.А. Гладышев А.И. и др.

ИНС предоставляет альтернативный способ решения сложных задач. Нейронная сеть при правильном выборе структуры может вычислять значения любой непрерывной функции с некоторой наперед заданной точностью. Нейронная сеть не требует знания внутренних параметров солнечного модуля, быстро обучается, обладает способностью оптимизации и аппроксимации. Следовательно, использование ИНС для отслеживания точки максимальной мощности является актуальной задачей и имеет практическую и научную значимость.

Целью диссертационной работы является разработка фотоэлектрических систем генерирования электрической энергии с повышенной эффективностью за счет интеллектуальных систем управления, выполненных с использованием искусственной нейронной сети.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи:**

1. Анализ существующих способов отслеживания точки максимальной мощности солнечных батарей в фотоэлектрических системах генерирования;
2. Разработка методики создания и обучения искусственной нейронной сети для отслеживания точки максимальной мощности массива солнечных батарей фотоэлектрических систем генерирования;
3. Разработка быстродействующей системы управления для систем генерирования постоянного и переменного тока, обеспечивающей отслеживание точки максимальной мощности массива солнечных батарей с помощью искусственной нейронной сети;
4. Разработка алгоритма онлайн-коррекции коэффициентов искусственной нейронной сети после деградации солнечных батарей;
5. Сравнительный анализ результатов работы предложенной системы с ранее существующими.

Методы исследования. Основные результаты научного исследования получены за счет применения методов математического моделирования с использованием аналитических выражений. Разработка и исследование системы управления для полупроводниковых преобразователей с применением теории автоматического управления. Элементы теории искусственных нейронных сетей при создании и обучении искусственных нейронных сетей. Исследования динамических процессов в фотоэлектрических системах генерирования на базе полупроводниковых преобразователей, проводятся с помощью аналитических и

графоаналитических методов, а также при помощи имитационного моделирования в пакете прикладных программ Matlab Simulink.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

1. Предложена улучшенная методика создания и настройки искусственной нейронной сети для отслеживания точки максимальной мощности массива солнечных батарей, которая позволяет создать нейронную сеть независимо от типа и структуры системы генерирования и мощности системы;
2. Предложена методика создания нейросетевой модели солнечной батареи;
3. Разработана многоуровневая система отслеживания точки максимальной мощности массива солнечных батарей в составе системы генерирования, которая с помощью искусственных нейронных сетей позволяет добиться высокой точности, скорости и динамики выхода системы в установившийся режим.
4. Разработан алгоритм онлайн-коррекции коэффициентов предварительно обученной искусственной нейронной сети при первоначальной настройке системы или после деградации солнечных батарей в фотоэлектрических системах генерирования.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенная система генерирования с использованием искусственных нейронных сетей позволяет быстро и с хорошими динамическими характеристиками выйти в точку максимальной мощности массива солнечных батарей по сравнению с другими системами, работающими по одному из классических алгоритмов отслеживания точки максимальной мощности.

Положения, выносимые на защиту:

1. Улучшенная методика создания и настройки искусственной нейронной сети для отслеживания точки максимальной мощности солнечной батареи;
2. Методика создания нейросетевой модели солнечной батареи;
3. Система управления многопортовым преобразователем в составе системы генерирования постоянного тока, с использованием искусственной нейронной сети для решения задачи отслеживания точки максимальной мощности солнечной батареи;
4. Система управления преобразователем в составе системы генерирования переменного тока, с использованием искусственной нейронной сети для решения задачи отслеживания точки максимальной мощности солнечной батареи;
5. Алгоритм онлайн-коррекции коэффициентов предварительно обученной искусственной нейронной сети при первоначальной настройке системы или после деградации солнечных батарей в фотоэлектрических системах генерирования.

Обоснованность и достоверность результатов научного исследования определяется корректной постановкой задач, адекватностью принятых допущений, применением широко известных методов и средств численного моделирования, а также согласованием основных теоретических выводов с экспериментально полученными данными, как при имитационном моделировании, так и при натурных экспериментах.

Апробация результатов диссертации. В полном объеме исследование докладывалось и обсуждалось на заседании кафедры «Электроники и

электротехники» ФГБОУ ВО «НГТУ». Основные результаты исследования и его отдельные положения докладывались, обсуждались и получили одобрение на следующих семинарах и заседаниях: 12-15-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» «АРЕИЕ», 2014-2021 гг.; 16-20-я Международная конференция молодых специалистов по микро/нано технологиям и электронным приборам «EDM», 2015-2019 гг.; Международная научная студенческая конференция (МНСК – 2015), г. Новосибирск; XII Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2018).

Публикации по теме диссертации. По теме работы опубликовано 22 печатные работы, в том числе 2 работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 11 публикаций, входящих в международную систему цитирования «Scopus» и/или «Web of Science», зарегистрировано 2 патента на изобретение, 2 программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Результаты научных исследований, представленные в диссертационной работе, выполнены при непосредственном участии автора. Разработка основных технических решений, методик, алгоритмов, математических моделей. Полученные экспериментальные результаты, лично проводились автором работы, а также анализ, обобщение полученных результатов и формулировка выводов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, который включает в себя 90 наименований, и других приложений. Работа изложена на 164 страницах, включая 100 рисунков и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены актуальность темы исследования, научные проблемы, сформулированы цель и задачи работы диссертационной работы, описаны методы исследования. Изложена научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и публикациях, личном вкладе автора, а также представлена структура работы.

В первой главе выполнен аналитический обзор научно-технической литературы, касающейся вопросов отслеживания точки максимальной мощности.

Рассмотрены классические алгоритмы отслеживания точки максимальной мощности солнечных батарей, такие как: возмущение и наблюдение, возрастающей проводимости, постоянного напряжения и их адаптивные модификации. Далее проведено исследование интеллектуальных алгоритмов отслеживания, таких как искусственные нейронные сети и нечеткая логика. Определено место ИНС в системе управления преобразователем постоянного тока.

Также в данной главе проводится краткое сравнение с учетом трех основных критериев: сложность алгоритма, точность и требования к реализации. Из-за простоты реализации очень долгое время наиболее предпочтительными были классические методы поиска точки оптимума. Но, несмотря на их очевидную

простоту, при динамическом изменении условий окружающей среды классические алгоритмы с трудом справляются с отслеживанием. Эти проблемы открыли возможности для применения интеллектуальных методов, таких как Нечеткая логика и ИНС. Колебания в точке максимальной мощности массива солнечных батарей почти устраняются, а эффективность системы повышается. Но интеллектуальные методы являются более сложными в реализации и требуются дополнительные знания для разработки такого алгоритма. Также требуется более мощная вычислительная система для работы интеллектуального алгоритма. Следовательно, несмотря на очевидные преимущества в точности и корректной работе при быстро меняющихся условиях, из-за сложности реализации данные алгоритмы находятся в стадии развития.

Вторая глава посвящена разработке улучшенной методики создания и обучения искусственной нейронной сети для задачи отслеживания точки максимальной мощности солнечной батареи.

Искусственная нейронная сеть — это интеллектуальная вычислительная система, принцип которой основан на поведении биологических нейронов, присутствующих в мозге человека. В последнее время ИНС получили высокое распространение и с успехом применяются в области отслеживания точки максимальной мощности.

Математическая модель нейрона описывается формулой:

$$x_k^{(i+1)} = f \left(\sum_{j=1}^N w_j^{(k)} \cdot x_j^{(i)} \right) + B^{(k)} \quad (1)$$

Где выход k -го нейрона слоя $i+1$ рассчитывается как взвешенная сумма всех его входов со слоя i , к которой применена функция активации, нормализующая выходной сигнал.

В диссертационной работе было проведено исследование по обучению ИНС для задачи отслеживания точки максимальной мощности. Представлены поэтапные результаты исследования:

– *оценка влияния внешних параметров на солнечную батарею и систему в целом;*

Выбор параметров для обучения искусственной нейронной сети и их обработка является одним из самых сложных и время затратных этапов решения задачи. Информация, которую несет в себе обучающая выборка, как правило, во многом определяет работоспособность и эффективность ИНС. Экспериментальные исходные данные были получены с использованием фотовольтаического стенда Lucas-Nülle.

– *выбор входных и выходных параметров для ИНС;*

Эксперимент показал, что в качестве входных данных для искусственной нейронной сети необходимо использовать мгновенные значения тока и напряжения солнечной батареи, освещенность и температуру.

– *сбор данных для обучения;*

В работе описаны критерии сбора и подготовки данных для обучения. Проведены соответствующие эксперименты.

– выбор топологии сети;

Одной из задач при выборе топологии сети является выбор количества слоев, нейронов и функции активации. Приведена оценка количества слоев и нейронов. Функция активации (Рисунок 1) выбирается исходя из сложности и требуемой точности выполняемой задачи.

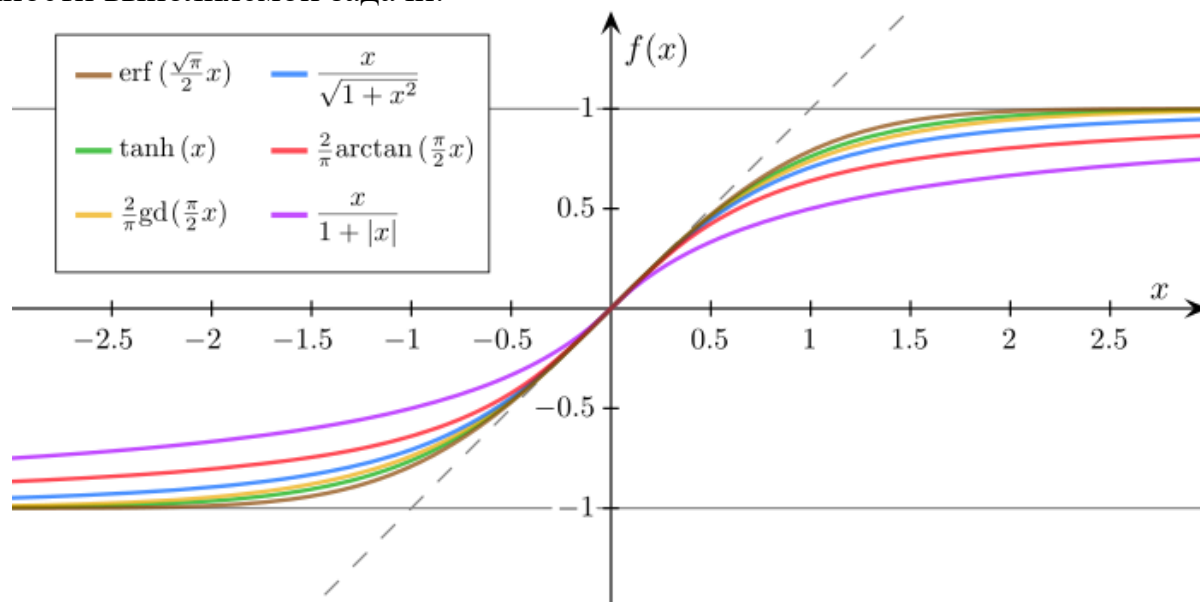


Рисунок 1 – Функции активации

В качестве функции активации была исследована функция Эллиотта, которая практически не используется в такого рода задачах. Были выявлены ее преимущества т.к. близка к сигмоидальным, но вычисляется более чем в два раза быстрее и не уступает в точности.

Функция активации – Эллиотт:

$$elliotsig(x) = \frac{x}{1 + |x|} \quad (2)$$

– экспериментальное моделирование с учетом выбранной топологии сети и подготовленных данных для обучения;

В данной части работы был проведен эксперимент без использования информации об освещенности, который дал положительные результаты.

– оценка работы искусственной нейронной сети на тестовом множестве;

Для различных условий работы алгоритма был проведен эксперимент и установлено, что процент ошибки лежит в интервале от 0,01% до 0,5%.

– экспериментальное моделирование искусственной нейронной сети в составе системы управления.

Экспериментальное моделирование ИНС в составе системы генерирования более подробно рассмотрено в 4 главе диссертационной работы.

В результате данного исследования была разработана улучшенная методика, которая позволяет создать и обучить искусственную нейронную сеть для задачи отслеживания точки максимальной мощности, как в цепи управления преобразователем постоянного тока, так и переменного.

В третьей главе проведено имитационное моделирование модели солнечной батареи с помощью различных средств программного обеспечения Matlab Simulink. Выполнен сравнительный анализ и в результате данных исследований разработана и описана методика создания модели солнечной батареи на основе искусственной

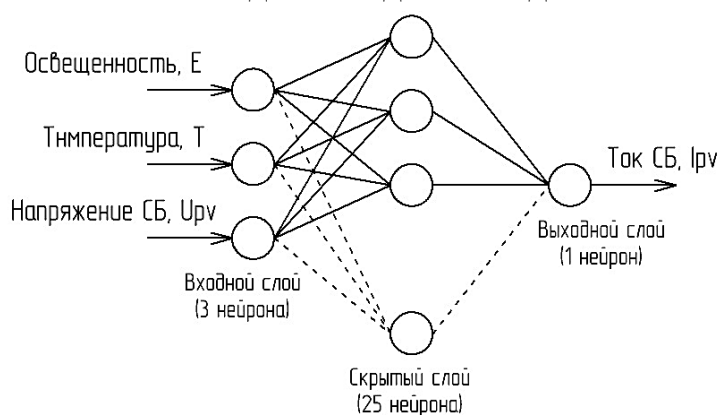


Рисунок 2 – Топология ИНС для реализации модели СБ

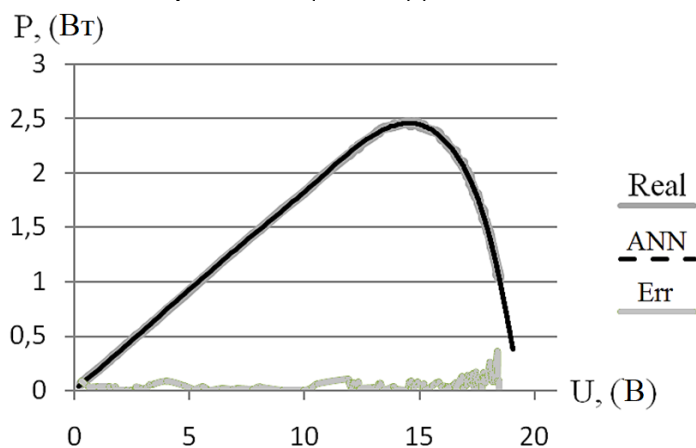


Рисунок 3 – Зависимость мощности солнечной батареи от напряжения. Real – исследуемая солнечная батарея, ANN – имитационная модель солнечной батареи, Err - относительная ошибка, увеличенная в 10 раз

преобразователя переменного тока.

В первой части главы в качестве преобразователя предлагается использовать многопортовый преобразователь постоянного тока.

Структурная схема автономной системы электроснабжения с питанием от солнечных батарей показана на Рисунке 4.

Предлагаемая система преобразования электрической энергии от солнечных батарей содержит в себе канал стабилизации напряжения на нагрузке (СТ) и регулирования тока солнечной батареи, канал заряда аккумуляторной батареи (СЗ) и канал разряда аккумуляторной батареи (СР), аккумуляторную батарею (АКБ) нагрузку (Н) и специализированную систему управления (СУ). Таким образом,

нейронной сети, которая позволяет, при соблюдении всех пунктов, создать и обучить искусственную нейронную сеть для задачи имитации поведения солнечной батареи.

В результате работы, в программном обеспечении Matlab создана искусственная нейронная сеть, которая с высокой точностью может воспроизвести вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики солнечной батареи.

Топология искусственной нейронной сети показана на рисунке 2. Результат имитационного моделирования показан на Рисунке 3.

Как видно, характеристика имитационной модели довольно точно совпадает с реальной характеристикой солнечного модуля. Ошибка в точке максимальной мощности составляет 0,18%.

В четвертой главе произведено имитационное моделирование фотоэлектрических систем генерирования на основе преобразователя постоянного тока и

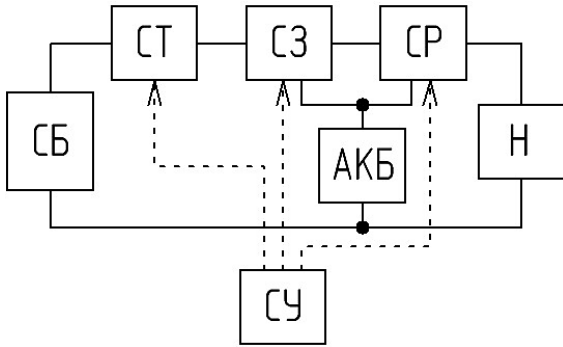


Рисунок 4 – Структурная схема автономной системы электроснабжения.

данная схема выступает связующим звеном между солнечной батареей и аккумуляторной батареей, а также повышает выходное напряжение для дальнейшего преобразования в звене переменного тока.

Согласно данной структуре была выбрана схема трехпортового преобразователя. Принципиальная схема преобразователя представлена на Рисунке 5.

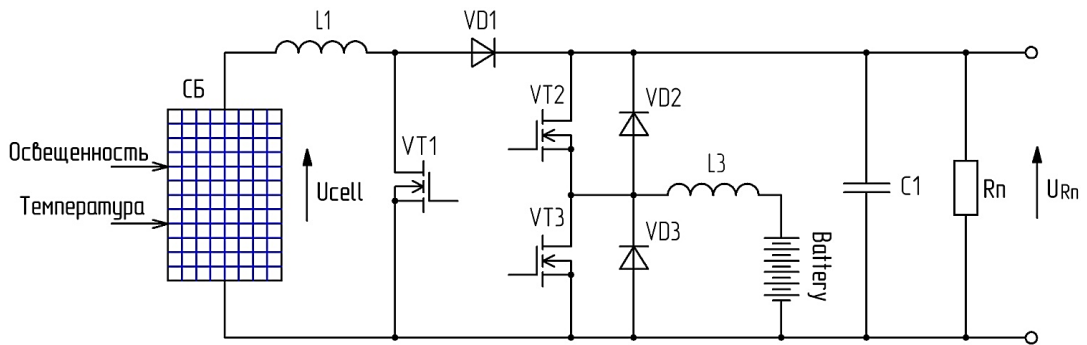


Рисунок 5 – Принципиальная схема многопортового DC/DC- преобразователя

Многопортовый преобразователь содержит три так называемых порта. Два служат для подключения солнечной и аккумуляторной батареи, а третий для подключения нагрузки. Такой преобразователь имеет ряд преимуществ над стандартными преобразователями.

Данный преобразователь работает по трем каналам в зависимости от того, на какой канал поступают управляющие импульсы.

Канал тока солнечной батареи. Схема стабилизатора представляет собой повышающий преобразователь. Управление стабилизатором осуществляется посредством широтно-импульсной модуляции. Управляющие импульсы поступают на транзистор VT1, тем самым позволяя поддерживать напряжение на нагрузке на заданном фиксированном уровне.

Интервалы накопления и отдачи энергии описываются следующими системами уравнений:

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = u_{in}(t) \\ C \frac{du_C(t)}{dt} = -\frac{u_C(t)}{R} \end{cases} \quad \begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} - U_{in}(t) = -u_C(t) \\ i_L(t) - \frac{u_C(t)}{R} - C \frac{du_C(t)}{dt} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

где $L=L_1$, $C=C_1$, $u_{in}=u_{cell}$, $R=R_n$

Канал заряда аккумуляторной батареи. Контролирует уровень заряда аккумуляторной батареи, в режиме изменяющегося, в зависимости от уровня освещенности, тока при одновременном поддержании напряжения на нагрузке.

Этапы преобразования описываются следующими системами уравнений:

$$\begin{cases} u_{in}(t) + L \frac{di_{L1}(t)}{dt} + L \frac{di_{L2}(t)}{dt} = u_{AKB}(t) \\ L \frac{di_{L2}(t)}{dt} = -u_{AKB}(t) \\ L \frac{di_{L1}(t)}{dt} + u_{in}(t) = -u_c(t) \\ i_L(t) - C \frac{du_c(t)}{dt} - \frac{u_c(t)}{R} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

где $L=L_1$, $C=C_1$, $u_{in}=u_{cell}$, $R=R_n$

Канал разряда аккумуляторной батареи. Представляет собой преобразователь, повышающий напряжение, получаемое от аккумуляторной батареи до уровня напряжения на нагрузке.

Данные процессы описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} L \frac{di_{L2}(t)}{dt} = u_{AKB}(t) \\ C \frac{du_c(t)}{dt} = -\frac{u_c(t)}{R} \\ L \frac{di_{L2}(t)}{dt} - u_{AKB}(t) = -u_c(t) \\ i_{L2}(t) - \frac{u_c(t)}{R} - C \frac{du_c(t)}{dt} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

где $L=L_2$, $C=C_1$, $U_{in}=U_{cell}$, $R=R_n$

Следующей задачей являлась разработка система управления, обеспечивающей функцию отслеживания точки максимальной мощности для всех уровней солнечного излучения.

Упрощенная структура разработанной системы управления показана на Рисунке 6.

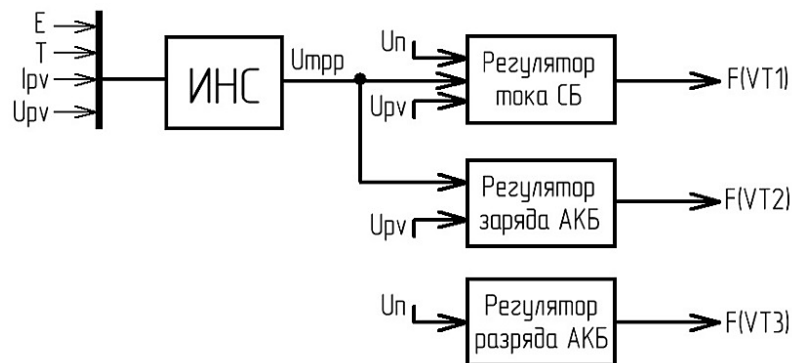


Рисунок 6 – Структура системы управления преобразователем

В зависимости условий работы системы генерирования и канала преобразователя работа системы управления была разделена на режимы. Условиями работы системы являются: дневное время, когда солнечная батарея вырабатывает достаточное количество энергии для питания нагрузки; вечернее или пасмурное время, когда солнечной энергии недостаточно для обеспечения нагрузки необходимым количеством энергии; темное время суток, когда солнечная батарея не производит энергии. Исходя из данных условий, можно выделить четыре режима работы:

№1: Первый режим заключается в нахождении точки максимальной мощности солнечной батареи и стабилизация напряжения на нагрузке. С помощью

искусственной нейронной сети производится оценка, какое количество энергии, получаемое от солнечной батареи, остается не востребуемым и может ли быть подключена аккумуляторная батарея.

№2: Если имеется избыток энергии, получаемой от солнечной батареи, данная система позволяет накапливать часть энергии в аккумуляторную батарею, подключая канал заряда АКБ. Система управления, руководствуясь данными, полученными от ИНС, обеспечивает плавный переход от режима №1 к режиму №2 для того, чтобы при подключении аккумуляторной батареи не возникло провалов напряжения на нагрузке.

№3: В том случае, если освещенность начинает уменьшаться, система управления, получая сигнал задания от искусственной нейронной сети, постепенно снижает зарядный ток аккумуляторной батареи, чтобы не возникло перенапряжений на нагрузке. При этом происходит отбор максимальной мощности от солнечной батареи, а недостаток энергии восполняется с помощью аккумулятора.

№4: АКБ обеспечивает нагрузку стабилизированным напряжением необходимого уровня.

В качестве результатов численного эксперимента приведены диаграммы токов и напряжений для некоторых режимов работы схемы (Рисунок 7 и 8). Система отбирает от солнечной батареи максимальную энергию с точностью в 99,03%.

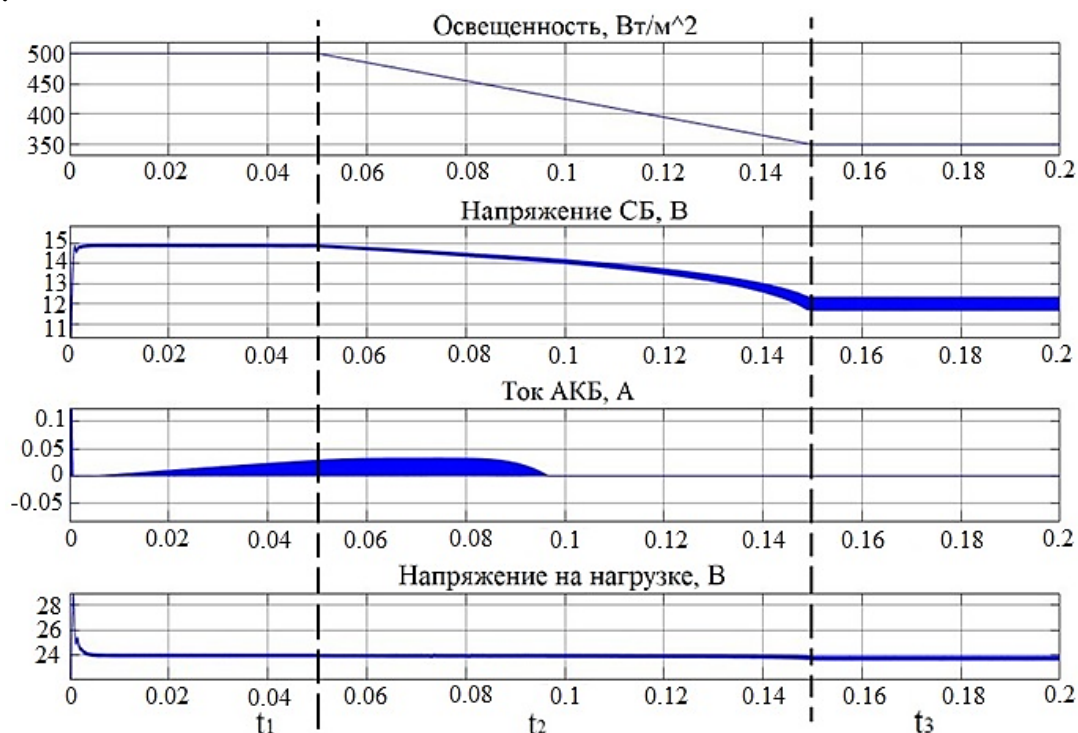


Рисунок 7 – Временные диаграммы при уменьшении освещенности

Также был проведен эксперимент сравнения с классическим алгоритмом слежения за точкой максимальной мощности в системе управления солнечного регулятора тока. В качестве классического алгоритма был выбран алгоритм «Возрастающей проводимости». Результат можно увидеть на Рисунке 9.

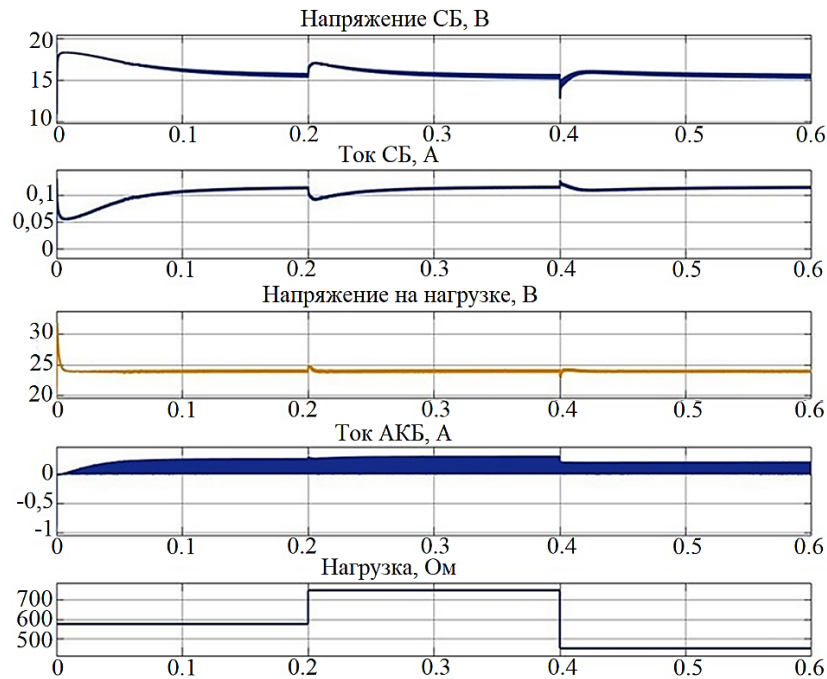


Рисунок 8 – Временные диаграммы при скачкообразном изменении нагрузки

Видно, что в случае, когда за МРРТ отвечает искусственная нейронная сеть, переходного процесса практически нет. А в случае с классическим алгоритмом наблюдается довольно длительный переходный процесс. Продолжительность переходного процесса зависит от шага расчета алгоритма Incremental Conductance МРРТ. Чем больше шаг счета, тем быстрее переходные процессы, но тем менее точным будет результат отслеживания.

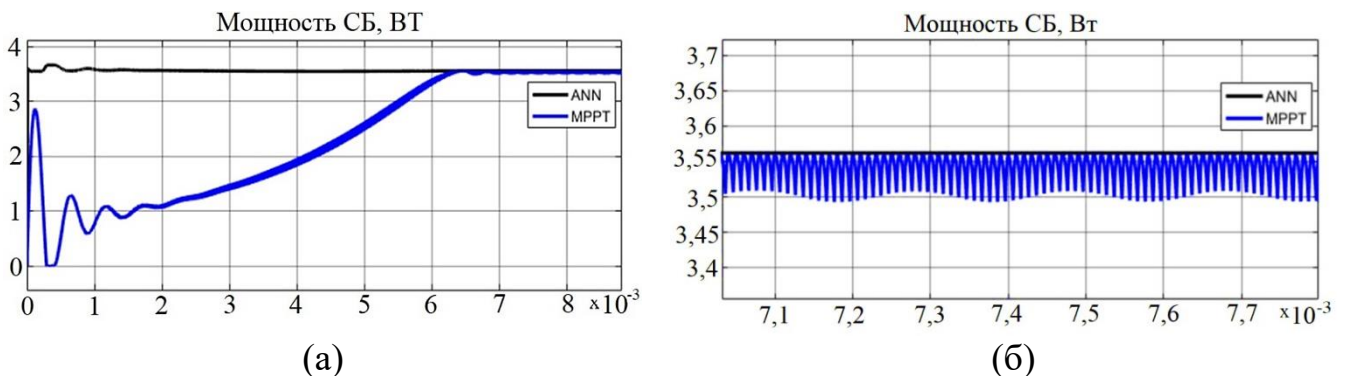


Рисунок 9 – Мощность солнечной батареи для различных алгоритмов отслеживания: ANN – искусственная нейронная сеть, МРРТ – алгоритм возрастающей проводимости; а – переходной процесс, б – установившийся режим.

На Рисунке 9(б) видно, что среднее значение мощности, полученное при управлении с использованием классического алгоритма, немного меньше максимальной мощности, которую может генерировать солнечная панель.

Эксперимент проводился с использованием маломощной солнечной батареи и с увеличением мощности погрешность расчета по классическому алгоритму может увеличиваться. Тогда как нейронную сеть легко настроить на новые параметры.

Во второй части четвертой главы рассматривается фотоэлектрическая система преобразования на базе инвертора с использованием искусственной нейронной сети в цепи управления.

Структура преобразователя и системы управления представлена на Рисунке 10.

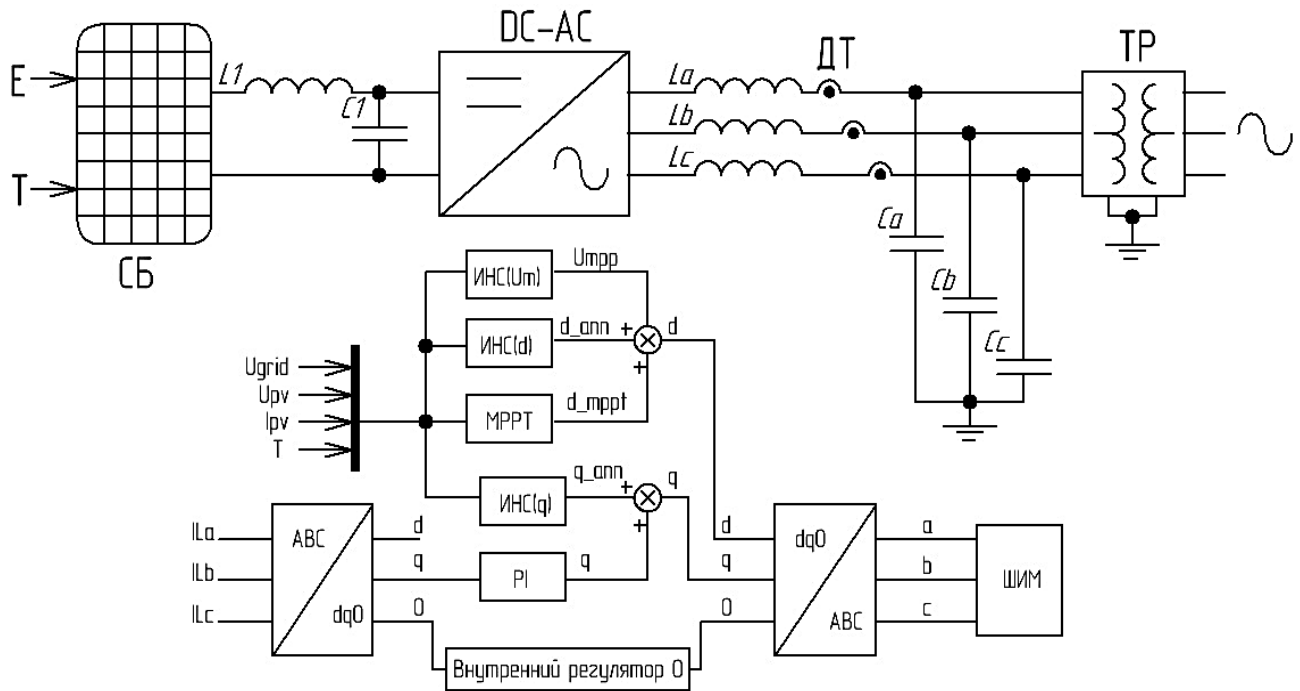


Рисунок 10 – Структура фотоэлектрической системы, соединенной с сетью

Формирование сигналов управления происходит в системе координат $dq0$. Для преобразования из системы координат ABC используется блок ABC- $dq0$.

На выходе преобразователя получаем сигналы d^* , q^* , 0 . Сигнал d^* в данной системе управления не используется, а остальные составляющие должны быть сведены к нулю.

Система управления построена на основе искусственных нейронных сетей ANN D и ANN Q. Искусственные нейронные сети на выходе формируют аппроксимированное значение сигнала задания на величину управляющих сигналов d и q соответственно. Формирование сигналов d и q , с помощью искусственных нейронных сетей, происходит практически мгновенно, за время формирования выходного сигнала нейронной сети, что увеличивает скорость работы системы управления и поиск максимальной мощности массива солнечных батарей. Искусственная нейронная сеть ANN U формирует напряжение, которое должно достигаться в точке максимальной мощности массива солнечных батарей в определенных условиях. Это значение напряжения будет являться сигналом задания. Данная связка блоков выполняет функцию пропорционального регулятора, включающего в себя нейронную сеть ANN U предназначенную для ускорения переходного процесса системы, сумматор, вычитающий реальное значение напряжения из сигнала задания, формируемого сетью и пропорциональный коэффициент.

Также в системе управления присутствует дополнительный блок реализующий алгоритм отслеживания точки максимальной мощности МРРТ, задачей которого является коррекция значения d получаемого с выхода искусственной нейронной сети ANN D. Следовательно, использование искусственных нейронных сетей увеличивает скорость работы системы управления, а использование дополнительного алгоритма МРРТ – точность. Итоговое значение управляющего сигнала d достигается путем сложения сумматором значений с выхода пропорционального звена, с выхода нейронной сети ANN D и блока МРРТ.

Составляющая q^* должна быть сведена к нулю. Для этого, управляющее значение q формируется с помощью искусственной нейронной сети ANN Q практически мгновенно, а точность определяется PI-регулятором, на который в качестве задания подается ноль. Итоговое значение управляющего сигнала q достигается путем сложения сумматором значений, получаемых с выхода нейронной сети ANN Q и PI-регулятора.

Также в схеме присутствует регулятор нулевой составляющей. В качестве которого может использоваться любой блок, обеспечивающий нулевое значение.

Итоговые значения $dq0$ в виде сигналов $U_{d.ref}$, $U_{q.ref}$, $U_{0.ref}$, поступают на обратный преобразователь $dq0$ -АВС. Далее формируются управляющие импульсы с помощью ШИМ-модулятора.

В данной главе также приводятся результаты компьютерного моделирования фотоэлектрической системы преобразования электрической энергии (Рисунок 11).

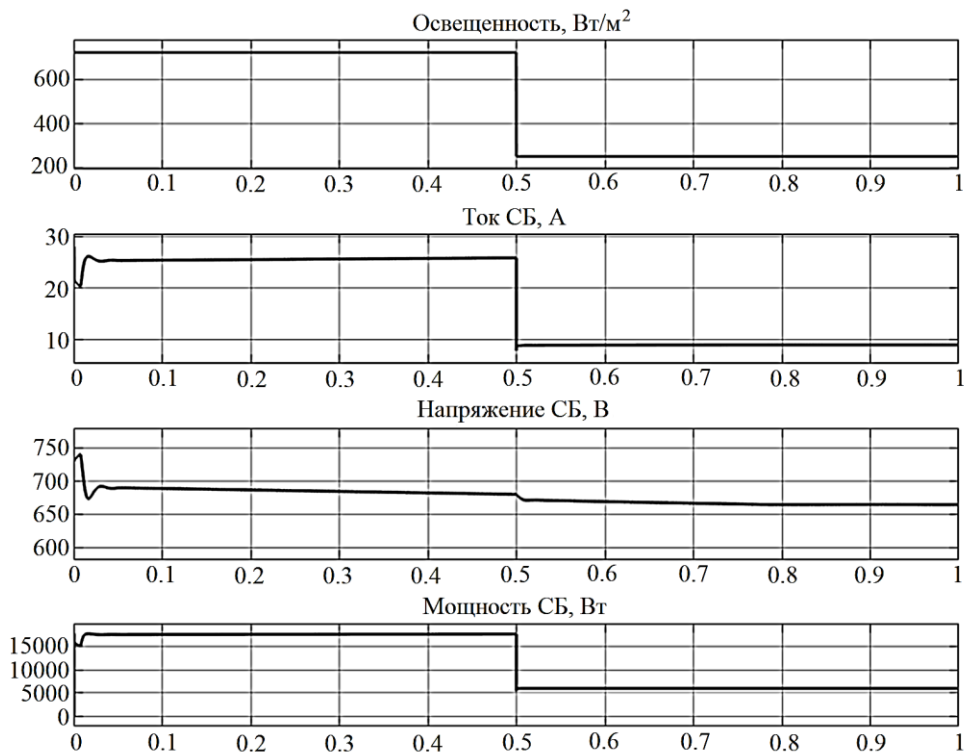


Рисунок 11 – Основные характеристики солнечной батареи при скачкообразном изменении освещенности

В пятой главе описана первоначальная настройка искусственной нейронной сети в самом начале работы, так как нейронная сеть была обучена в лабораторных условиях начало ее работы должно сопровождаться онлайн настройкой параметров. Также рассмотрена проблема деградации солнечных батарей.

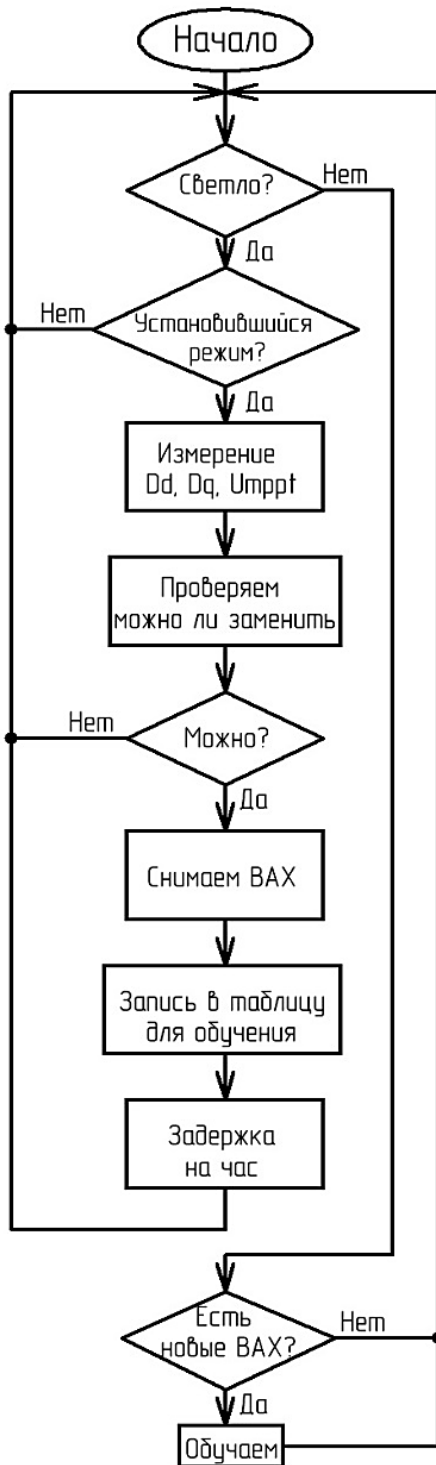


Рисунок 12 – Блок-схема онлайн-коррекции коэффициентов искусственной нейронной сети

Как правило, фотоэлектрические станции устанавливаются в летний период и в случае предложенного алгоритма отслеживания точки максимальной мощности имеется первично обученная нейронная сеть по исходным вольт-амперным характеристикам, полученным при моделировании либо в лабораторных условиях. Корректно настроенная и обученная система будет с успехом работать, пока не пройдет определенное время, и характеристики солнечной батареи не изменятся, т.е. пока не она не начнет деградировать. Для этого в памяти системы управления должны храниться таблицы со значениями температуры, максимальной мощности и напряжением в точке максимальной мощности.

Принцип работы онлайн-корректировки коэффициентов нейронной сети показан на Рисунке 12. Для начала система должна определить, имеется ли достаточное количество освещенности, далее, когда система находится в установленном режиме, на блок управления поступает команда на измерение d , q и напряжения в точке максимальной мощности.

Если в зоне данного сезона находится строчка с наиболее близкими значениями этих параметров и данные по оптимальному напряжению давно не обновлялись, то система переходит в режим снятия вольт-амперной характеристики, которая заменяет предыдущие значения в обучающем массиве для дальнейшего формирования нового обучающего массива данных с последующей корректировкой коэффициентов ИНС. Эксперимент проводился в программном обеспечении Matlab.

Моделирование показало, что искусственная нейронная сеть может подвергаться онлайн-настройке коэффициентов и хорошо справляется со своей задачей даже при изменении параметров солнечной батареи. При этом, чтобы добиться

оптимальной точности работы искусственной нейронной сети необходимо прореживать новый обучающий массив данных.

Данный алгоритм онлайн-коррекции коэффициентов ИНС может быть применен не только при работе с солнечной батареей, но и в любой другой системе управления, где параметры объекта управления изменяются со временем.

Также можно отметить, что в данной работе климатические зоны были заданы упрощенным способом, т.е. при настройке реальной системы должны быть определены и заданы климатические зоны определенного участка местности, в которой данная система будет работать. При этом результаты могут отличаться в зависимости от выбранной зоны. Вследствие данного эксперимента был сформирован алгоритм онлайн-коррекции коэффициентов ИНС, который показал хороший результат и может быть успешно использован при моделировании фотоэлектрических систем генерирования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В диссертационной работе изложены результаты исследования, направленные на повышение энергетической эффективности фотоэлектрических систем генерирования:

1. Произведен анализ существующих способов отслеживания точки максимальной мощности солнечных батарей в фотоэлектрических системах генерирования. Выделены основные проблемы существующих алгоритмов. Обосновано решение использовать искусственную нейронную сеть в качестве алгоритма отслеживания точки максимальной мощности солнечных батарей.

2. Проанализирована методика создания и обучения искусственной нейронной сети. Разработана улучшенная методика создания и обучения искусственной нейронной сети для задачи отслеживания точки максимальной мощности массива солнечных батарей фотоэлектрических систем генерирования;

3. Разработана методика создания имитационной модели солнечной батареи на основе искусственной нейронной сети;

4. Предложена система управления для фотоэлектрической системы генерирования на базе многопортового преобразователя постоянного тока с участием искусственной нейронной сети, позволяющая отслеживать точку максимальной мощности массива солнечных батарей с точностью около 99%. Проведен сравнительный анализ с ранее существующими алгоритмами отслеживания точки максимальной мощности СБ;

5. Предложена структура системы управления инвертором на основе искусственных нейронных сетей для отслеживания точки максимальной мощности массива солнечных батарей;

6. Рассмотрена проблема деградации солнечных батарей и связанные с этим проблемы проектирования интеллектуальной системы управления с участием искусственной нейронной сети;

7. Разработан алгоритм онлайн-настройки коэффициентов искусственной нейронной сети после деградации солнечной батареи или при первоначальной настройке.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Белова И.А., Мартинович М.В., Сколота В.А., Канюков И.И. / Автономный преобразователь электрической энергии с интеллектуальной системой управления на основе искусственной нейронной сети для фотовольтаики // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2018. – №1(38). – С. 36-53

2. Белова И.А., Мартинович М.В., Федорова Д.Ю. / Источник искусственного освещения, имитирующий солнечный спектр, для тестирования солнечных батарей // Доклады ТУСУР. – 2021. – том 24, №4. – С. 19-24.

Публикации в материалах зарубежных конференций, входящих в базу данных Scopus и/или Web of Science:

3. Perov G.V., Sinica A.V., Belova I.A. Extreme electric loads at the ultra-thin films of the silicon oxide with inhomogeneous boundary // 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, 2014, p. 71-74;

4. Belova I.A., Martinovich M.V. Neural network control algorithm for stand-alone solar cell electrical energy conversion system // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, 2015, p. 387-390;

5. Skolota V.A., Belova I.A., Martinovich M.V. Development synthesizer of stable high-frequency signal // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2016), 2016, p. 185-190;

6. Belova I.A., Martinovich M.V., Skolota V.A. Application of photovoltaic cells with an intelligent control system for railway transport // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE 2016), 2016, p. 64-68;

7. Skolota V.A., Belova I.A., Martinovich M.V. Overview of technical means of implementation of neuro-fuzzy-algorithms for obtaining the quality factor of electric power // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2017), 2017, p. 469-472;

8. Belova I.A., Martinovich M.V., Skolota V.A. Neural network model of the solar battery // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2017), 2017, p. 417-421;

9. Martinovich M.V., Zaev I.V., Khoroshev M.A., Belova I.A., Skolota V.A. Buck DC-DC converter with neural network sawtooth-similar carrier signal generator // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2018), 2018, p. 629-634;

10. Belova I.A., Martinovich M.V., Skolota V.A., Zaev I.V. Maximum power point tracking methods for the solar battery // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, 2018, p. 445-451;

11. Martinovich M.V., Belova I.A., Skolota V.A., Zaev I.V. Neural Network Load Current Observer for DC Converter // 2018 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, 2018, p. 65-70;

12. Martinovich M.V., Zaev I.V., Belova I.A., Skolota V.A. Evaluation of the influence of distortion and measurement accuracy on the load current observer based on

artificial neural network // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devic (EDM 2019), 2019, p. 421-427;

13. Belova I.A., Martinovich M.V., Zaev I.V., Skolota V.A. Optimization of artificial neural network learning for maximum power point tracking after the degradation of the solar battery // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2019), p. 415-420;

14. Belova I.A., Martinovich M.V. Modeling of a stand-alone photovoltaic system using an intelligent control system based on artificial neural network // 15th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE 2021), 2021, p. 154-160;

Публикации в российских изданиях, материалах международных и всероссийских конференций:

15. Сколота В.А., Белова И.А., Мартинович М.В. Применение нейронных сетей в петле ФАПЧ / Сколота В.А., Белова И.А., Мартинович М.В. // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2016. № 2 (84). С. 77-87;

16. Мартинович М.В., Белова И.А., Сколота В.А., Заев И.В. Прогнозирующий наблюдатель тока нагрузки повышающего dc-преобразователя с автотрансформатором / Мартинович М.В., Белова И.А., Сколота В.А., Заев И.В. // Электропитание. 2018. № 2. С. 9-21;

17. Сколота В.А., Белова И.А., Мартинович М.В. Аналоговая аппаратная реализация искусственного нейрона / Сколота В.А., Белова И.А., Мартинович М.В. // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2018. № 1. С. 54-59;

18. Белова И.А., Мартинович М.В. Обучение искусственной нейронной сети для отслеживания точки максимальной мощности после деградации солнечной батареи // В сборнике: НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ Сборник научных трудов: в 9 частях. 2018. С. 11-15;

19. Белова И.А., Зиновьев Г.С., Юркевич В.Д. Синтез методом разделения движений регулятора для инвертора фотоэлектрической системы // В сборнике: Устойчивость и колебания нелинейных систем управления (конференция Пятницкого) Материалы XIV Международной научной конференции. Редактор В.Н. Тхай. 2018. С. 67-70;

20. Мартинович М.В., Белова И.А., Сколота В.А., Заев И.В. Нейросетевой наблюдатель тока нагрузки для dc преобразователя // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП - 2018. Труды XIV международной научно-технической конференции. 2018. С. 55-61;

21. Рыжков В., Деревягин А., Белова И. Российская микросхема двухканального радиационно стойкого импульсного DC/DC-преобразователя // Компоненты и технологии. 2019. № 10 (219). С. 65-68;

22. Сколота В.А., Белова И.А., Мартинович М.В., Зиновьев Г.С. Обзор технических средств реализации нейро-фаззи-алгоритмов получения показателей качества электрической энергии // Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании "ИНФОТЕХ -

2019". Сборник статей всероссийской научно-технической конференции. Научный редактор Е.Н. Машенко. 2019. С. 82-86;

Зарегистрированные патенты на изобретения и свидетельства на программы ЭВМ:

1. Патент на изобретение №2678153 С2 Российская Федерация, МПК G06N 3/063 Схема нейрона: №2017120077: заявл. 07.06.2017: опубл. 23.01.2019 / Сколота В.А., Белова И.А., Мартинович М.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НГТУ».

2. Патент на изобретение №2769039 С1 Российская Федерация, МПК H02J3/38 Устройство отслеживания точки максимальной мощности для инвертора с питанием от солнечных батарей: №2021127864: заявл. 23.09.2021: опубл. 28.03.2022 / Мартинович М.В, Белова И.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НГТУ».

3. Программа для ЭВМ №2021619551 Формирование массива значений освещенности и температуры: заявка №2021618936: заявл. 15.06.2021: опубл. 15.06.2021 / Белова И.А., Мартинович М.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НГТУ».

4. Программа для ЭВМ №2021612372 Сбор данных о вольт-амперных характеристиках модели солнечной батареи: заявка №2021611423: заявл. 11.02.2021: опубл. 16.02.2021 / Авторы: Белова И.А., Мартинович М.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НГТУ».

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Тел. 8(383)346-08-57

Формат 60x84 1/16. Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ №950. Подписано в печать 25.04.2022 г.