

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.398

ТРЕЩ АБДУНАСЕР МОХАМЕД

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИЕЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление

и обработка информации»

Минск, 2013

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель:

Петренко Юрий Николаевич,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры “Электропривод и автоматизация
промышленных установок и
технологических комплексов”
Белорусского национального технического
университета

Официальные оппоненты:

Русан Викентий Иванович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры практической
подготовки студентов УО «Белорусский
аграрно–технический университет»

Люлис Алексей Иванович,
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник Объединенного
института проблем информатики НАН
Беларуси

Оппонирующая организация:

Учреждение образования «Белорусский
государственный технологический
университет»

Защита состоится «25» июня 2013 г. в 14³⁰ на заседании совета по защите диссертаций К 02.05.01 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр–т Независимости 65, тел. (017) 293–96–64, E–mail: gurski2010@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «24» мая 2013 г.

Ученый секретарь совета

по защите диссертаций,

кандидат технических наук, доцент

Н.Н. Гурский

© Трещ Абдунасер Мохамед, 2013

© Белорусский национальный
технический университет, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Последние десятилетия минувшего и первые годы 21–го века для многих стран стали периодом напряженного поиска новой стратегии энергетического развития, который продолжается и в настоящее время. Необходимые изменения в энергетической политике связаны с осознанием мировым сообществом глобальной экологической опасности, связанной с громадными масштабами сжигания органического топлива, что заставляет человечество уже сейчас прогнозировать целесообразность использования экологически чистых возобновляемых источников энергии.

Несмотря на обилие углеводородного сырья, сказанное в полной мере относится к территории, на которой расположена Ливия и где имеет место более 320 солнечных дней в году.

Особое место среди возобновляемых источников энергии занимает солнечная энергетика, так как солнце в списке возможных энергетических источников занимает одну из первых позиций, в особенности это касается Ливии. Повышенный интерес к фотоэлектрическому методу преобразования энергии обусловлен реальной возможностью создания стабильных в эксплуатации, дешевых и высокоэффективных солнечных элементов. Мощность модулей и батарей складывается из выходных мощностей отдельных солнечных элементов (СЭ). Актуальными являются задачи разработки аналитических и имитационных моделей, построенных на основе физически обоснованных эквивалентных электрических схемах и уравнениях СЭ. Имитационные модели должны обеспечить воспроизведение выходных характеристик СЭ и солнечных батарей (СБ) при воздействии внешних факторов, основными из которых являются изменение температуры и уровней освещенности. Параметры энергии солнечных батарей, которые зависят и от времени суток, нуждаются в адаптации к требованиям потребителей и по этой причине нуждаются в преобразовании. Эффективность преобразования зависит от адекватности математического описания и оптимизации систем управления фотоэлектрической станции (ФЭС).

Решение названных проблем, часть из которых реализована в диссертации, будет способствовать развитию и дальнейшему расширению использования солнечной энергии.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертационной работы соответствует направлению общей стратегии энергетической безопасности Республики Беларусь и Ливии, изложенной в документах:

Стратегия развития энергетического потенциала Республики Беларусь (утверждена постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 9 августа 2010 г. №1180)

В 2010 году были разработаны и утверждены государственная программа строительства энергоисточников на местных видах топлива в 2010–2015 годах, а также Национальная программа «Развитие местных, возобновляемых и нетрадиционных энергоисточников на 2011–2015 годы». Вышеназванные документы определяют действующую энергетическую стратегию, цели и планы национальных действий страны.

В Ливии принят также ряд документов по возобновляемым источникам энергии (ВИЭ).

В соответствии с Планами по развитию ВИЭ до 2030 г., одобренными Министерством электричества и энергии Ливии, ВИЭ должны покрывать до 25% энергопотребления страны к 2025 г. и до 30% к 2030 г. В среднесрочной перспективе – 6% к 2015 г. и 10% к 2020 г.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является совершенствование математических моделей и повышение эффективности систем преобразования электрической энергии в составе фотоэлектрических станций.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать математическую и имитационную модели солнечных батарей с учетом влияния внешних факторов.
2. Усовершенствовать доказательную базу применения метода усредненных переменных пространства состояния применительно к импульсным системам.
3. Обосновать математические модели нелинейных импульсных преобразователей на основе теории скользящих режимов.
4. Разработать модели и алгоритмы оптимального функционирования систем управления солнечных батарей с целью повышения эффективности их работы

Объект исследования – система управления фотоэлектрической станцией, обеспечивающая максимальную эффективность использования солнечных батарей, содержащая источник электрической энергии (солнечные батареи) и преобразователи работающие в импульсном режиме.

Предмет исследования – математические и аналитические модели и свойства импульсных нелинейных систем для преобразования энергии солнечных батарей и системы обеспечения их максимальной эффективности.

Положения, выносимые на защиту:

1. Имитационная модель солнечной батареи для определения ее характеристик на основе паспортных данных производителей, отличающаяся дружественным интерфейсом.

2. Математическая модель и алгоритмы оптимального управления фотоэлектрическими станциями:

– алгоритм с переменным шагом, обладающий адаптивными свойствами;

– алгоритм оптимального управления, основанный на линеаризованной модели солнечной батареи, отличающийся ускоренным нахождением зоны экстремума.

3. Структура контроллера управления преобразователями в скользящем режиме работы, обеспечивающая быструю сходимость процесса и робастные свойства.

4. Результаты натурального эксперимента, подтверждающие адекватность внешних характеристик солнечных батарей, полученных на имитационной модели.

Личный вклад соискателя

Основные результаты и положения, выносимые на защиту, получены лично автором. Математические и имитационные модели и структуры преобразовательных устройств, обсуждаемые в работе, аналитически исследованы автором самостоятельно.

Натурный эксперимент, подтверждающий адекватность внешних характеристик солнечных батарей, полученных на имитационной модели, выполнен автором самостоятельно. Научный руководитель принимал участие на стадии постановки задач и интерпретации полученных результатов.

Апробация результатов диссертации

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на:

7, 8, 9 и 10–й международных научно–технических конференциях «Наука – образованию, производству, экономике» БНТУ (Минск, 2009, 2010, 2011, 2012 гг.); 6–й международной научно–технической конференции «Информационные технологии в промышленности» ОИПИ НАН (Минск, 2010 г.); XIII Республиканской научной конференции студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (Гомель, 2010 г.); Международной научно–практической конференции «Научно–инновационная деятельность в агропромышленном комплексе» (Минск, 2011 г.); 19–й международной научно–практической конференции «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье» (Харьков, 2011 г.); Республиканской научно–практической конференции «Современные информационные технологии в системе научного и учебного эксперимента: опыт, проблемы, перспективы» (Гродно, 2011 г.); Международной научно–технической конференции, «XIX Туполевские чтения» (Казань, 2011 г.); Международной научно–технической конференции «Национальные и европейские контексты в научных исследованиях» (Новополоцк, 2011 г.); 7–й международной научно–технической конференции «Информационные технологии в промышленности» ОИПИ НАН (Минск, 2012 г.); Международной научно–технической конференции «Энергоэффективные Технологии, Образование, Наука, практика» РИИТ БНТУ (Минск, 2010 г.); Международной научно–технической конференции «Информационные технологии системы ИТС» БГУИР (Минск, 2012 г.).

Опубликованность результатов диссертации.

По результатам диссертационной работы опубликовано 23 печатные работы, включая 5 статей в рецензируемых научных журналах, 18 в сборниках материалов и тезисов международных и республиканских конференций. Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 1,8 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, дается обоснование рассмотренных вопросов.

В первой главе приводится системный анализ основных направлений

развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в Ливии и дается обоснование применения фотоэлектрических станций (ФЭС), что особенно актуально для удаленных пользователей, станций катодной защиты и пунктов мобильной связи.

Во второй главе рассматривается использование метода усредненных переменных в пространстве состояний применительно к импульсным преобразователям, работающим в составе ФЭС. Для ряда применений обосновано использование метода доминирующей функции, для которой получено аналитическое выражение.

В третьей главе предлагается имитационная модель фотоэлектрического преобразования солнечной энергии в среде MATLAB–Simulink, которое является основой для разработанных имитационных моделей.

Разработаны структуры систем оптимального управления СБ обеспечивающие наиболее эффективное ее использование; исследованы их динамические свойства.

В четвертой главе приводится обобщение метода усреднения переменных пространства состояний применительно к наиболее распространенным видам преобразователей, работающим в скользящем режиме. Предложена структура контроллера скользящего управления, обеспечивающая робастность и быструю сходимость динамического процесса.

В Приложениях приводятся результаты имитационного моделирования импульсных преобразователей, данные экспериментальных исследований солнечных батарей, акты об использовании результатов работы.

Общий объем диссертационной работы составляет 151 страницы, из которых 98 страниц текста, 68 рисунков на 37 страницах, библиографический список из 130 источников и 23 собственных публикаций автора на 14 страницах и приложения на 2-х страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируется цель работы, ее научная новизна, степень достоверности результатов, изложенных в диссертации, а также отмечаются основные теоретические и практические результаты диссертационной работы.

В первой главе по результатам обзора, анализа состояния развития возобновляемых источников энергии в Ливии отмечается преобладающая тенденция развития солнечной энергетики по причинам, которые следуют из осознания географического положения Ливии.

Представляются разработанные структуры системы и алгоритм управления автономной фотоэлектрической станции с накопителем энергии и возможностью связи с сетью.

Во второй главе на основе теории усреднения Боголюбова–Митропольского рассматриваются математические модели импульсных устройств переменной структуры, работающие в режиме широтно–импульсной модуляции (ШИМ), являющиеся основой построения систем управления СБ.

В третьей главе разработаны имитационные модели СБ и системы оптимального управления фотоэлектрической станцией (ФЭС).

Оптимизация по критерию максимально отдаваемой мощности процесса преобразования энергии СБ в условиях меняющейся в течение суток солнечной радиации является одной из главных задач. Независимо от схмотехнических приемов и математических алгоритмов, направленных на оптимизацию режимов работы фотоэлектрической станции, актуальным является вопрос математической модели процесса фотоэлектрического преобразования энергии с учетом нелинейности их характеристик. Достоверная модель СБ, позволяющая воспроизводить ее вольтамперные и ваттвольтные выходные характеристики при различных условиях эксплуатации без необходимости численных решений, является фундаментальными основами для построения оптимального управления ФЭС.

Наиболее распространенным является подход к анализу и моделированию, при котором вольт–амперная характеристика фото–ячейки (фотоэлектрического генератора) формируется из источника светового тока, последовательного сопротивления, параллельного сопротивления и диода.

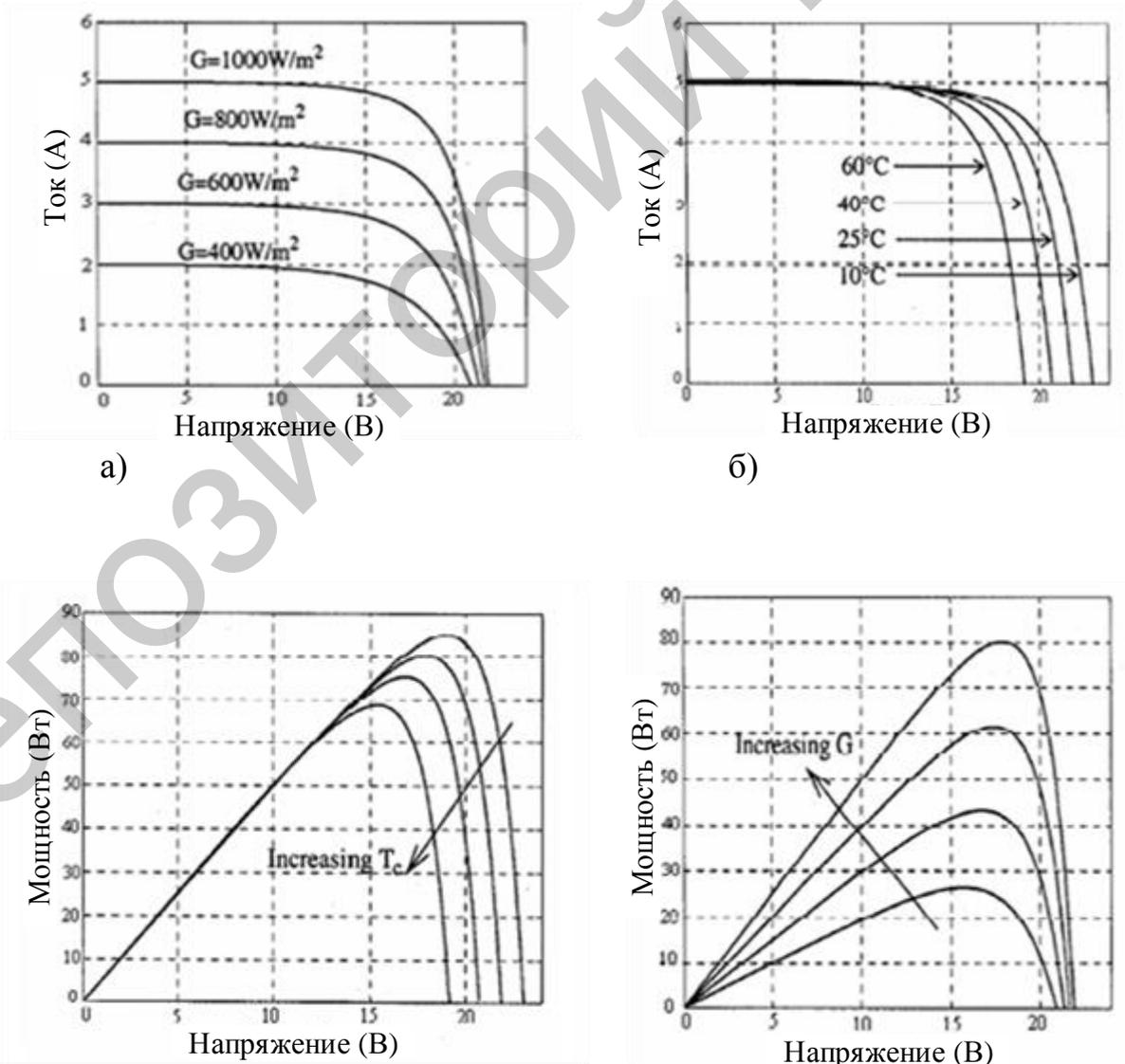
Ввиду малости тока и напряжения отдельной фотоячейки, для получения параметров электроэнергии (ЭЭ), приемлемых для дальнейших преобразований, они соединяются последовательно и параллельно, образуя солнечную батарею и в этом случае уравнение, выражающее соотношение тока $I_{\text{б}}$ и напряжения $U_{\text{б}}$ имеет вид

$$I_{\text{б}} = N_{\text{пр}} I_{\text{фя}} - N_{\text{пр}} I_0 \left(\exp \left(\frac{U_{\text{б}}}{N_{\text{пр}} K_0} + \frac{I_{\text{б}} R_{\text{пс}}}{N_{\text{пр}} K_0} \right) - 1 \right) - \frac{1}{R_{2\text{я}}} \left(\frac{U_{\text{б}}}{N_{\text{пр}}} + \frac{I_{\text{б}} R_{\text{пс}}}{N_{\text{пр}}} \right) \quad (1)$$

где $I_{\text{фя}}$ – фототок; I_0 – обратный ток насыщения; $K_0 = nKT/q$; K – постоянная Больцмана (дж/Т); T – температура солнечной батареи (К); n – фактор диода; q – заряд электрона (кулон).

В (1) индексы «пс» и «пр» означают последовательное и параллельное соединение элементов соответственно; N – количество элементов; дальнейшие обозначения – общепринятые. Имитационная модель СБ реализована в программной среде MATLAB–Simulink, входными величинами которой являются паспортные данные СБ и условия эксплуатации, а выходными – вольтамперная и ваттвольтная характеристики (ВАХ) и (ВтВХ). На Рисунке 1 приведены названные характеристики для различных уровней радиации и температуры СБ типа 80W BPSOLAR BP280. Приведенные нелинейные зависимости лишь подчеркивают важность имитационного моделирования, которое является основой для математического описания устройств управления выходной мощностью СБ.

Как следует из приведенных выше ВАХ СБ, при определенной интенсивности солнечного излучения имеется уникальная точка на характеристике (Рисунок 1), называемая точкой экстремума, для которой имеет место максимальная выходная мощность (МВМ) СБ.



в)

г)

Рисунок 1– ВАХ (а и б) и ВтВХ (в и г) при постоянстве температуры (а и г) и солнечной радиации (б и в).

Из Рисунка 1 можно сделать вывод, что система управления СБ должна обеспечить этот режим работы для имеющихся в данный момент параметров окружающей среды. Имеется большое число работ, демонстрирующих различные подходы для обеспечения работы в точке экстремума. Известные алгоритмы приводят к снижению быстродействия системы при изменении атмосферных условий и снижают эффективность алгоритма при переменной облачности. Предлагается метод, лишенный приведенных выше недостатков. При работе в точке экстремума мощность, извлекаемая из СБ может быть выражена

$$P(t) \cong \frac{U_{СБ}^2(t)}{U_M} \cdot I_M, \quad (2)$$

где U_M, I_M – напряжение и ток СБ в точке экстремума.

Выходной ток СБ $i_{СБ}$ является нелинейной функцией напряжения СБ $U_{СБ}$, уровня радиации G и температуры T .

Полагая, что колебания рабочей точки, характеризуемые отклонениями значения тока и напряжения \hat{i} и \hat{u} достаточно малы относительно токов и напряжений в точке экстремума, для малых отклонений можно записать

$$\hat{i} = \frac{di_{СБ}}{dU_{СБ}} \cdot u + \frac{di_{СБ}}{dG} \cdot g + \frac{di_{СБ}}{dT} \cdot \hat{T}, \quad (3)$$

где $\hat{i}, \hat{u}, g, \hat{T}$ – малые отклонения соответствующих величин тока, напряжения, интенсивности излучения и температуры соответственно от установившихся значений. При неизменной интенсивности излучения $g = 0$.

Малое приращение мощности можно получить в виде

$$p = U_M \cdot \hat{i} + \hat{u} \cdot I_M + \hat{u} \cdot \hat{i} = \hat{u} \left(I_M - \frac{U_M}{R_M} \right) + \hat{u} \cdot \hat{i} = -\frac{\hat{u}^2}{R_M}, \quad (4)$$

где индекс «м» означает принадлежность точке экстремума.

Отметим, что (4) не зависит от вида преобразователя мощности. Эффективность алгоритма обеспечения работы системы в точке экстремума в значительной мере зависит от свойств преобразователя энергии СБ, что рассмотрим на примере повышающего преобразователя (СПП), Рисунок 2.

Используя технику усреднения переменных, общепринятую для систем рассматриваемого класса, получены передаточные функции (ПФ) системы, используя малые отклонения переменных по каналам: «напряжение СБ – сигнал управления» $W_1(p)$ и «нагрузка – напряжение СБ» $W_2(p)$, т.е.

$$\hat{u} = W_1(p) \cdot d + W_2(p) \cdot \hat{i}_H, \quad (5)$$

где d – приращение сигнала управления на ключ (скважности управляющих сигналов); \hat{i}_H – приращение тока нагрузки.

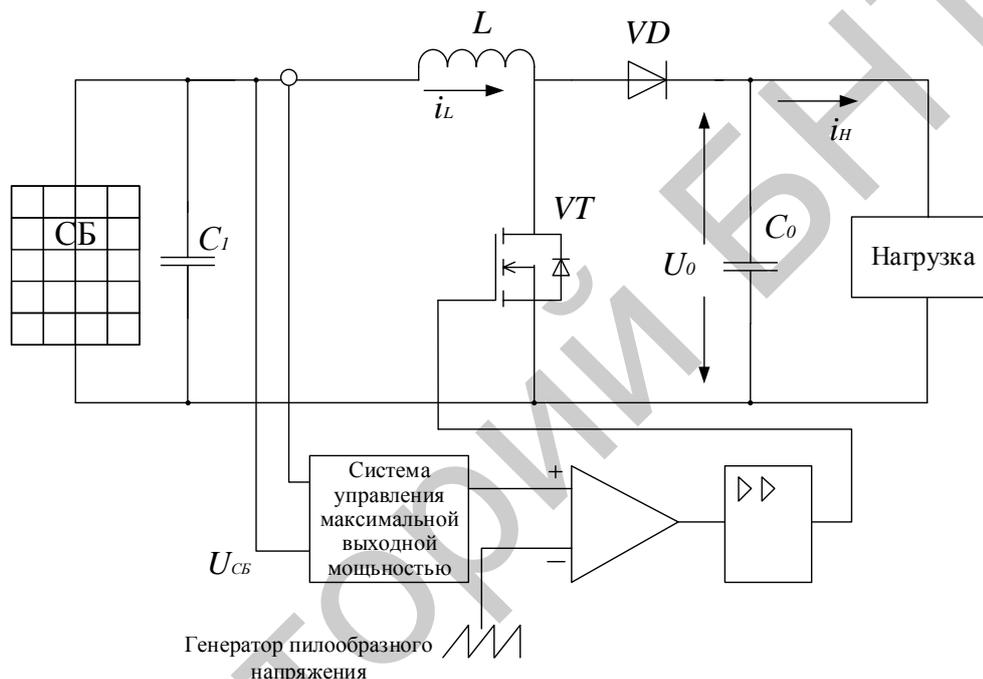


Рисунок 2 – Импульсный преобразователь повышающего типа.

Принимая во внимание идеальный преобразователь (внутренние сопротивления, индуктивности и емкости равны нулю, диод идеален), получено выражение ПФ

$$W_1(p) = \frac{U_0}{T_1 p^2 + T_2 p + 1}, \quad (6)$$

где $T_1 = LC_1$; $T_2 = \frac{L}{R_H} \cdot D_1^2$; $D_1 = 1 - D$; D – скважность ШИМ-сигналов; R_H – сопротивление нагрузки.

$$W_2(p) = \frac{R_H D_1}{T_3 p^3 + T_4 p^2 + T_5 p + 2}, \quad (7)$$

где $T_3 = T_1 \cdot R_H C_0$; $T_4 = T_1 \cdot \frac{C_0 L}{D_1^2}$; $T_5 = (R_H (C_1 D_1^2 + C_0) + L/R_H D_1^2)$

Для идеального преобразователя СПП входное сопротивление может быть выражено зависимостью

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{Н}} \cdot (1 - D)^2 \quad (8)$$

Учитывая это, ПФ $W_1(p)$ представим в виде

$$W_1(p) = -\frac{U_0 \cdot \omega_1^2}{p^2 + 2Y \cdot \omega_1 p + \omega_1^2}, \quad (9)$$

где $\omega_1 = 1/\sqrt{LC_1}$; $Y = 1/2 R_M \cdot \sqrt{L/C_1}$ (10)

В качестве сопротивления нагрузки $R_{\text{Н}}$ в (8) целесообразно рассматривать отношение напряжения к току в точке экстремума; при этом зависимость $W_1(p)$ от R_M , а не от $R_{\text{Н}}$, носит более обобщенный характер.

Из ПФ (9) можно получить отклик сигнала \ddot{u} на возмущение в виде сигнала управления (скважность импульсов управления) амплитудой d

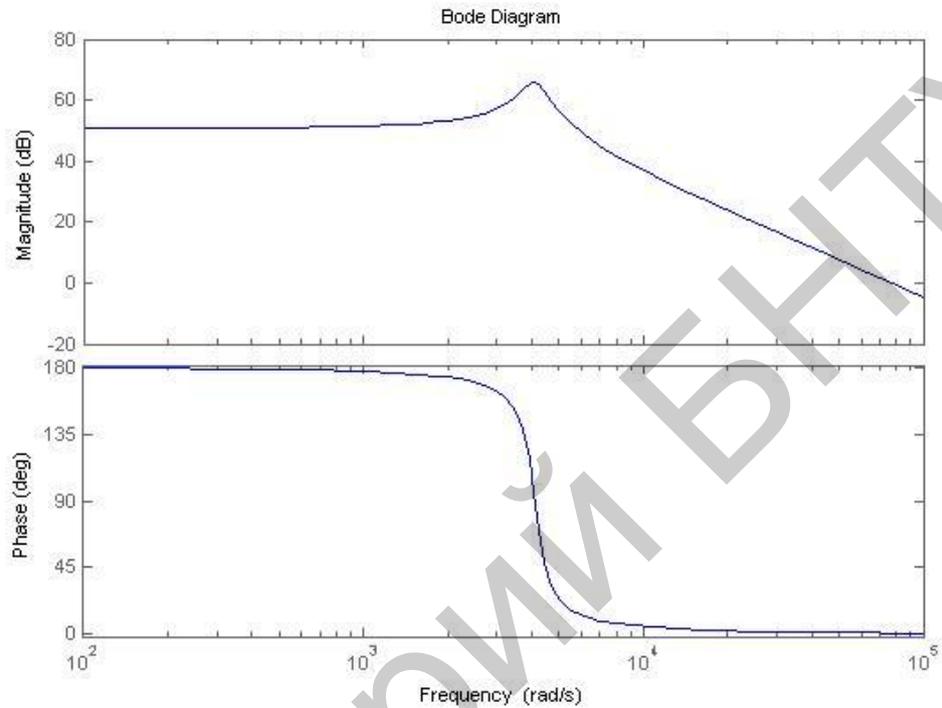
$$\ddot{u} = \beta d \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - Y^2}} \cdot \exp \left(-Y \omega_1 T \cdot \sin \left(\omega_1 T \sqrt{1 - Y^2} + \arccos(Y) \right) \right) \right) \quad (11)$$

Численные расчеты приведем для стандартной батареи, состоящей из 112-ти панелей, соединенных последовательно; общая площадь поверхности составляет 14м^2 ; при уровне радиации $G=1000\text{ Вт/м}^2$, для которой $R_M = 50\ \Omega$.

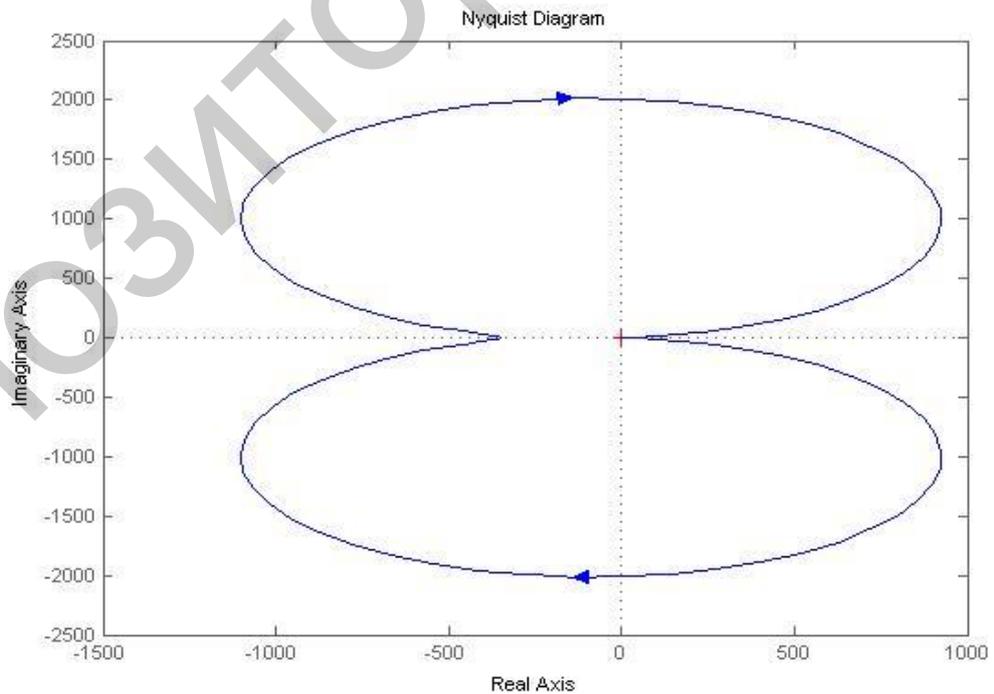
Расчеты произведены для $Y = 0.087$, что соответствует (10), с помощью программного пакета MATLAB. Анализ Рисунка 3 показывает достаточный запас устойчивости системы МВМ.

С целью оптимизации управления целесообразно использовать (применить) кусочно-линейную аппроксимацию выходной характеристики СБ, как это показано на Рисунке 4. Плоскость $U - I$ выходных параметров СБ разделена на участки (Рисунок 4): участок источника тока, участок источника напряжения, и два участка наибольшей мощности Р-1 и Р-2. Как следует из Рисунка 4 эти участки имеют различный наклон $U - I$ кривой и динамическое сопротивление. Абсолютное значение динамического сопротивления мало на участке источника напряжения и велико на участке источника тока. Сказанное должно найти отражение в динамических характеристиках системы управления. Целесообразное функционирование начинается на участке источника напряжения (близкого к режиму холостого хода) и далее находится на одном из участков мощности, желательно в точке МВМ. Аналитическая модель импульсного преобразователя приведена на Рисунке 5. Она отличается от предыдущей (Рисунок 2) учетом активного сопротивления R_L и падением

напряжения на диоде $VD (\Delta U)$. Нагрузкой здесь служит в общем случае шина постоянного тока, изображенная в виде аккумуляторной батареи на Рисунке 5. Математическая модель системы «СБ – СПП – АБ» в малых значениях переменных может быть приведена в виде (12)



а)



б)

Рисунок 3 – Частотные характеристики системы МВМ при $\gamma = 0.087$;
а) амплитудно – фазовая характеристика (АФХ); б) диаграмма Найквиста

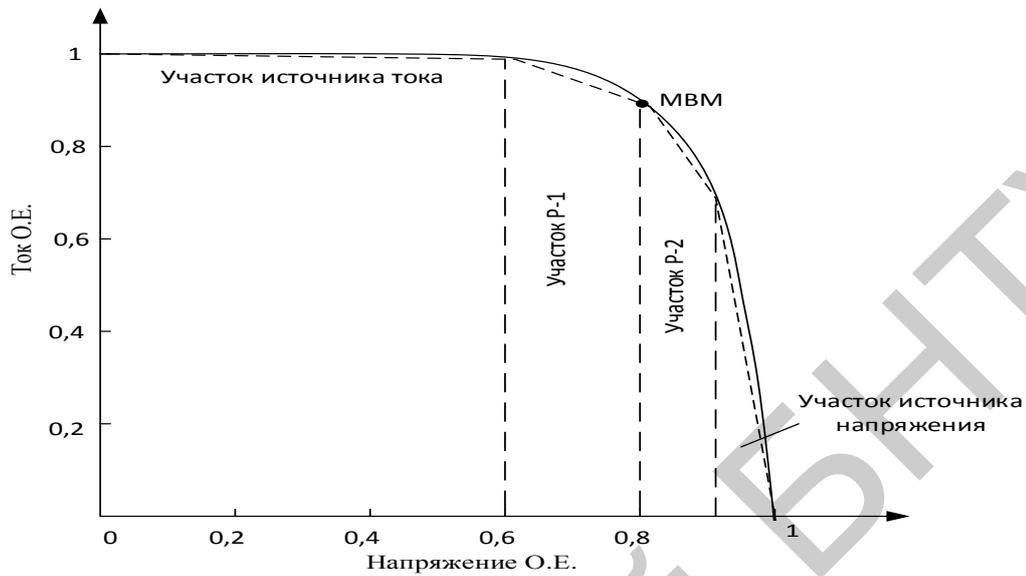


Рисунок 4 – Кусочно–линейная аппроксимация выходной характеристики СБ

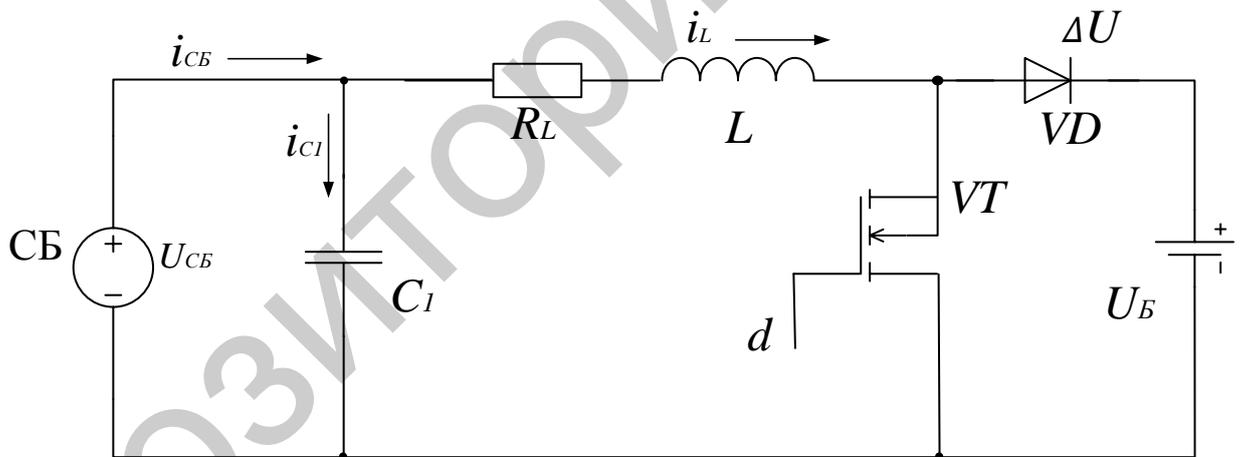


Рисунок 5 – Расчетная модель СПП

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{U}_{СБ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_1} & \frac{1}{R_B C_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{U}_{СБ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{U_{СБ} - \Delta U}{L} \\ 0 \end{bmatrix} d, \quad (12)$$

где d – отклонение скважности импульсов ШИМ – генератора; ΔU – падение напряжения на диоде VD в прямом направлении, символ " $\hat{}$ " – означает

приращение соответствующего параметра. Остальные обозначения соответствуют Рисунку 5. Динамическое сопротивление, R_B , имеющееся в (12), введено в качестве параметра, зависящего от условий эксплуатации (Рисунок 4), является отличительным признаком предложенной математической модели. R_B для каждого из участков определяется как отношение приращений напряжения и тока.

На основе (12) система может быть представлена соотношениями между приращением (малым параметром) напряжения СБ $\hat{U}_{СБ}$ и приращением скважности управляющих импульсов d . Эта передаточная функция приведена ниже

$$W_c(p) = \frac{K_0}{p^2 + 2\gamma_i\omega_i p + \omega_i^2}, \quad (13)$$

где

$$K_0 = \frac{U_{АБ} + \Delta U}{LC_1}; \quad \omega_i = \sqrt{\frac{-R_B + R_L}{-R_B LC_1}}; \quad \gamma_i = \frac{-R_B R_L C_1 + L}{2R_B LC_1 \omega_i}$$

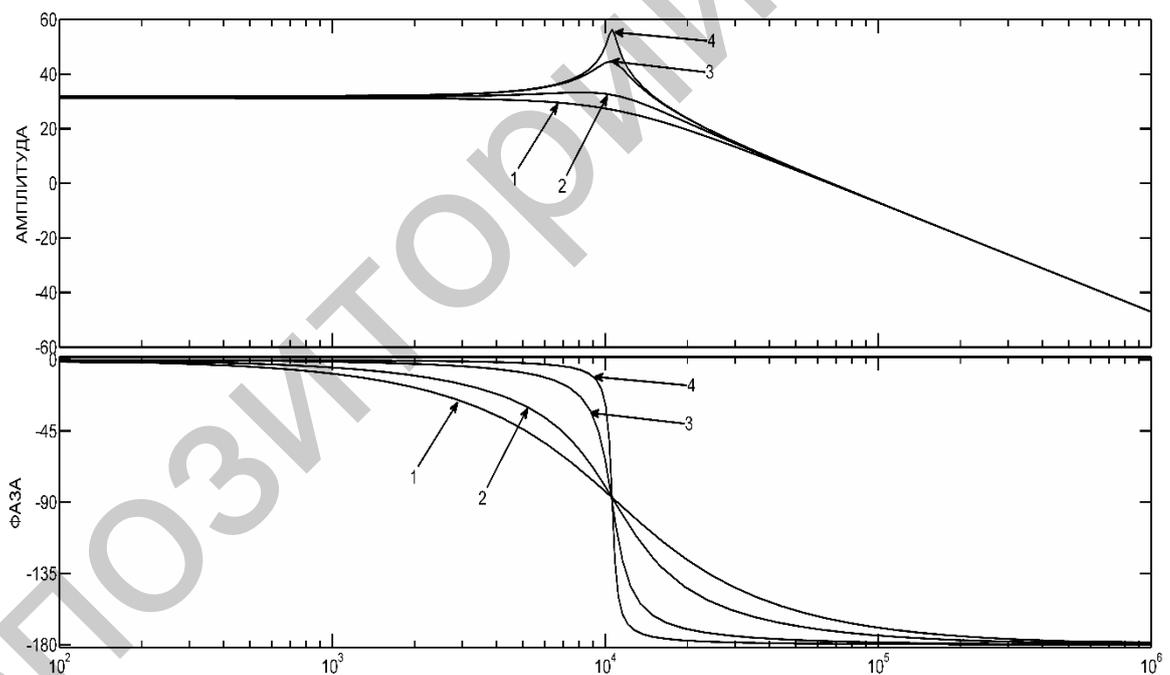


Рисунок 6 – Динамические характеристики (амплитудная и фазовая) линейризованной системы оптимального управления

Динамические характеристики системы (13) представлены на Рисунке 6, из которого следует, что на участке источника напряжения (Кривая 1) система обладает наиболее высокой степенью устойчивости. И наоборот, режим источника тока (Кривая 4) имеет наиболее высокую степень колебательности. Кривые 2 и 3 относятся к участкам Р-1 и Р-2. Сказанное является рекомендацией для проектирования контроллера управления, которая

заключается в том, что напряжение не должно выходить за пределы участка Р–2 (Рисунок 4).

В четвертой главе представлены разработанные математические модели основных типов преобразователей: понижающего; повышающего; комбинированного и преобразователя Кука.

Импульсные преобразователи постоянного тока, работающие в составе ФЭС, предназначены для регулирования напряжения на выходе. Это может быть сеть постоянного тока или инвертор для формирования напряжения переменного тока. Здесь рассмотрим управление СП с помощью скользящих режимов, что значительно упрощает проектирование и робастность при эксплуатации. Для рассмотренных типов преобразователей, переменная x_2 представляет собой среднее значение выходного напряжения, требуемое значение обозначим U^* . Скользящая поверхность в пространстве состояний описывается соотношением $x_2 = U^*$ и согласно теории скользящих режимов имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 < 0 & \text{ при } x_2 > U^* \\ \dot{x}_2 > 0 & \text{ при } x_2 < U^* \end{aligned} \tag{14}$$

Первое приближение может быть выбрано на основе следующего уравнения и соответственно обеспечивается скорость сходимости

$$\dot{x}_2 = -\lambda(x_2 - U^*), \tag{15}$$

где λ – положительное целое число, называемое фактором конвергенции.

На основе (15) можно утверждать, что увеличение фактора сходимости приведет к более быстрому достижению установившегося режима. Однако существуют чисто технические ограничения по ряду параметров, в частности продолжительности включения D , что делает невозможным увеличения фактора конвергенции сверх некоторого установленного предела.

При проектировании контроллера необходимо определить D^* в терминах переменных состояния и параметров системы. Такое уравнение очень важно с точки зрения возможности управления выходной величиной. Теперь необходимо определить скважность D как функцию времени, для этого используем соотношение конвергенции (14) применительно к силовому преобразователю понижающего типа СПН (Рисунок 7) в пространстве состояний, в результате чего получим

$$D(t) = \frac{U^* + \beta(x_2 - U^*)}{U_1}, \quad (16)$$

где

$$\beta = LC_0\lambda^2 - \frac{L}{R_H}\lambda + 1 \quad (17)$$

Синтезированный таким образом контроллер приведен на Рисунке 7.

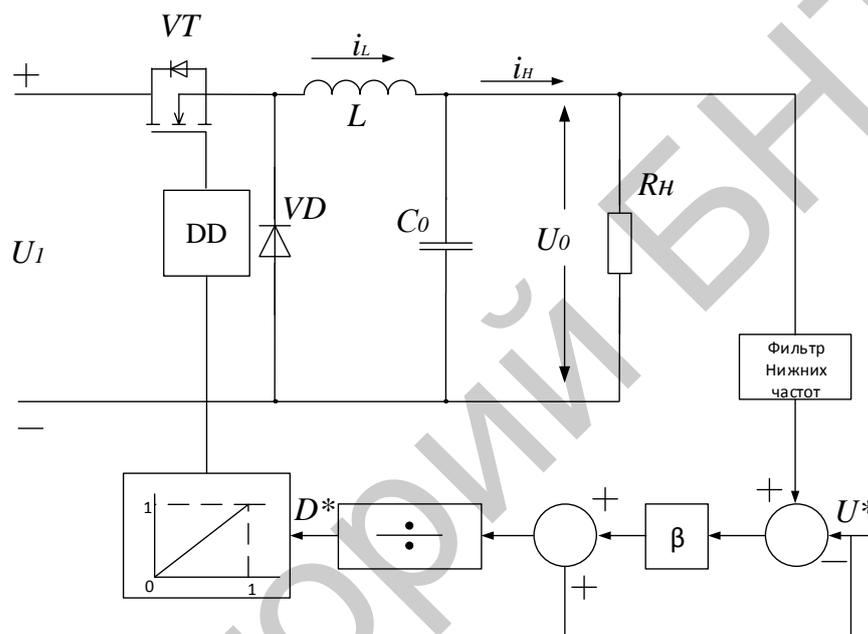


Рисунок 7 – Контроллер скользящего режима для силового преобразователя понижающего типа.

В Приложениях приведены результаты экспериментальных исследований и акты об использовании результатов диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основе системного анализа определены актуальные вопросы развития возобновляемых источников в Ливии. Наряду с использованием энергии ветра, биомассы и других ВИЭ, актуальным является использование солнечной энергии в виде автономных фотоэлектрических станций для удаленных районов, в особенности для станций катодной защиты трубопроводов имеющих протяженность несколько тысяч километров и пунктов питания мобильной связи, расположенных в пустынных и полупустынных районах. [1–А, 3–А, 4–А, 6–А, 8–А, 10–А].

2. Предложена структура автономной ФЭС с возможностью соединения с сетью и без нее. Предложен алгоритм управления ФЭС, предусматривающий взаимодействие всех ее компонентов в зависимости от текущего состояния и запрограммированного режиме работы [9–А, 14–А, 16–А, 18–А, 19–А].

3. Разработана имитационная модель солнечной батареи, входной информацией которой являются паспортные данные на СБ предприятий–изготовителей; наиболее целесообразной средой моделирования является Matlab–simulink

С помощью разработанной имитационной модели получены наиболее важные внешние характеристики солнечной батареи – вольтамперная и ватт–вольтная. Внешние характеристики с качественной и количественной стороны нашли подтверждение на основе экспериментальных данных, полученных на реальных модулях, выпускаемых промышленностью [2–А, 12–А, 13–А, 15–А, 17–А, 20–А, 21–А, 22–А, 23–А].

4. Предложены структуры и алгоритмы функционирования системы, обеспечивающей работу солнечных батарей в оптимальном режиме: –адаптивный алгоритм с переменным шагом поиска; –алгоритм на основе линеаризованной модели СБ, обладающий свойствами робастности. Реализован численный эксперимент и на основе полученных передаточных функций систем, исследованы их динамические свойства, подтверждающие их устойчивость и работоспособность [3–А, 9–А, 14–А].

5. Получена аналитическая модель идентификации точки максимальной мощности в реальном времени на основе полиминальной модели с помощью метода наименьших квадратов [23–А].

6. Обобщены математические модели скользящих режимов импульсных преобразователей, предающие им свойства робастности. Предложен алгоритм и структура скользящего управления на примере преобразователя понижающего типа [5–А, 7–А, 11–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Практическое использование результатов исследований подтверждается Актами внедрения. Предприятие М&S (Ливия) использовало методику проектирования установки с солнечными батареями для обеспечения функционирования удаленной станции нефтедобычи в пустыне и станций катодной защиты трубопроводов. В частности, при решении вопросов применения солнечных батарей использовано:

математическая модель солнечной батареи для получения их внешних характеристик;

математическая модель импульсных преобразователей при управлении током и в скользящем режиме;

алгоритм для получения максимальной выходной мощности, полученными при работе г-на Трещ А.М. над кандидатской диссертацией.

Предприятие H.G.O.S. (Ливия) использовало методику обоснования применения СБ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1–А. Трещ, А.М. Renewable energy in Libya, present and future / Y.N.Petrenko, A.M.Tresh // Доклады БГУИР. – Минск, 2011. – №2(56). – С. 40–46.

2–А. Трещ, А.М. Моделирование эксплуатационных характеристик солнечных батарей (в среде Matlab/Simulink)/ А.М. Трещ // Доклады БГУИР. – Минск, 2012. – №7(61). – С. 110–114.

3–А. Трещ, А.М. Система управления фотоэлектрической установкой при автономном использовании / Ю.Н. Петренко, А.М. Трещ // Наука и техника. Международный научно – технической журнал. – Минск 2013. – №1. – С. 53–56.

4–А. Трещ, А.М. Исследование солнечной энергии для питания бытовых потребителей / Ю.Н. Петренко, А.М.Трещ // Энергетика. – Минск, 2013. – №1 – С. 40–46.

5–А. Трещ, А.М. Математическая модель работающего в скользящем режиме импульсного преобразователя постоянного тока / А.М. Трещ // Доклады БГУИР. – Минск, 2013. – №2(72). – С. 93–98.

Тезисы докладов на научных конференциях

6–А. Трещ, А.М. Перспективы использования солнечной энергии в условиях Ливии / А.М. Трещ // Наука – образованию, производству, экономике: сб. научн. ст. материалов 7–ой между. научн. –техн. конф., Минск, 2009 г.: в 4 т. / БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2009. – Т. 1. – С. 165.

7–А. Трещ, А.М. Методы исследования энергоэффективных импульсных преобразователей постоянного тока / А.М. Трещ, Г.Н. Блинков, Ю.Н. Петренко // Энергоэффективные технологии – образование, наука, практика: сб. научн. ст. материалов между. науч. – практ. конф., в 3 т. / Минск, 20–21 мая 2010 г. / БНТУ. – Минск, 2010. – С. 147–150.

8–А. Трещ, А.М. Развитие возобновляемых источников энергии в Ливии / А. М. Трещ // Совершенствование систем автоматизации технологических процессов: сб. науч. ст. материалов межд. науч. – техн. конф., / Минск, 24 – 25 мая 2010 г. / БНТУ. – Минск, 2010. – С. 27.

9–А. Tresh, А. М. Renewable Energy for Standalone Users in Libya / А.М. Tresh // Информационные технологии в промышленности: сб. науч. ст. материалов 6–й межд. науч. – техн. конф., / Минск, 28–29 октября 2010 г. / ОИПИ НАН РБ. – Минск, 2010. – С. 174–175.

10–А. Tresh, А. М. Renewable Energy in Libya: Present and Future / А.М. Tresh // Информационные технологии в промышленности: сб. науч. ст. материалов 6–й межд. науч. – техн. конф., / Минск, 28–29 октября 2010 г. / ОИПИ НАН РБ. – Минск, 2010. – С. 172–173.

11–А. Трещ, А.М. Математические модели импульсных преобразователей. / А.М.Трещ // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: сб. науч. ст. мат. XIII Республ. науч. конф. студ. и аспирантов, Гомель, 15 – 17 марта 2010 г. / ГГУ им. Ф. Скорины; редкол.: О. М. Демиденко [и др.]. – Гомель, 2010 г. – С. 63–64.

12–А. Трещ, А.М. Исследование характеристик солнечных батарей / А.М. Трещ // Современные информационные технологии в системе научного и учебного эксперимента: опыт, проблемы, перспективы: материалы Респ. науч. – практ. конф., / Гродно, 4–5 апреля 2011г. / ГрГУ им. Я. Купалы. – Гродно, 2011. – С. 45–47.

13–А. Трещ, А. М. Matlab/simulink model for simulation of photovoltaic module / А.М. Tresh // Научно–инновационная деятельность в агропромышленном комплексе: сб. науч. ст. 5–ой Международной науч–практ. конф., / Минск, 21–22 апр. 2011 г. / БАТУ. – Минск, 2011. – С. 111–115.

14–А. Tresh, А М. Standalone renewable wind power system of hybrid design // А.М. Tresh, Y.N. Petrenko // Национальные и европейские контексты в научных исследованиях: сб. науч. ст. м–лов III Междунар. науч. – тех. конф., / Новополоцк, 27 – 28 апреля 2011 г., // Нополоцкий ГУ. – Новополоцк, 2011. – С. 144 – 146.

15–А. Трещ, А.М. Экспериментальные исследования характеристик солнечных батарей / А. М. Трещ // XIX Туполевские чтения: м–лы межд. науч. –тех. конф., / Казань, 24–26 мая 2011 г.: в 2 т. / Казанский ГТУ им. А.Н. Туполева. – Казань, 2011. – Т.1. – С. 374 – 375.

16–А. Трещ, А.М Интегрированная система электрообеспечения автономных объектов, на основе возобновляемых источников энергии / А.М. Трещ // Информационные технологии: наука, техника, технология,

образование, здоровье: тезисы докл. XIX межд. научно–практич. конф., / Харьков, 01–03 июня 2011г. / ХПИ. – Харьков, 2011. – С. 82.

17–А. Трещ, А.М. Исследование характеристик солнечных батарей / А.М. Трещ // Наука – образованию, производству, экономике: сб. научн. ст. материалов 9–ой межд. научн. –техн. конф., Минск, 2011 г.: в 4 т. / БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 242–243.

18–А.Трещ, А.М. Интегрированная система электрообеспечения автономных пользователей / А.М. Трещ // Наука – образованию, производству, экономике: сб. научн. ст. материалов 9–ой межд. научн. –техн. конф., Минск, 2011 г.: в 4 т. / БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 241–242.

19–А. Трещ, А.М. Многоуровневый инвертор напряжения для преобразования энергии солнечных батарей / А.М. Трещ, С.С. Воротницкий, Ю.С. Козлова, А.Н. Яцко, Ю.Н. Петренко// Информационные технологии в промышленности: сб. научн. ст. материалов 7–й межд. научн. – техн. конф., / Минск, 30–31 октября 2012 г. / ОИПИ НАН РБ. – Минск, 2012. – С. 85–86.

20–А. Трещ, А.М. Simulation of photovoltaic module in matlab/simulink / А.М. Трещ // Информационные технологии в промышленности: сб. научн. ст. материалов 7–й межд. научн. – техн. конф., / Минск, 30–31 октября 2012 г. / ОИПИ НАН РБ. – Минск, 2012. – С. 163–164.

21–А. Tresh, A. M. The basic electrical characteristics of silicon cells / А.М. Трещ // Информационные технологии и системы (ИТС): материалы межд. научно – техн. конф., Минск, 24 октября 2011 г. / БГУИР. – Минск, 2011. – С. 28–29

22–А . Tresh, A. M. Simulation of photovoltaic module in matlab/simulink cells / А.М. Трещ // Информационные технологии и системы (ИТС): материалы межд. научно – техн. конф., Минск, 24 октября 2011 г. / БГУИР. – Минск, 2011. – С. 92–93

23–А. Трещ, А.М. Моделирование солнечных батарей в среде MATLAB/SIMULINK / А.М. Трещ // Наука – образованию, производству, экономике: сб. научн. ст. материалов 10–ой межд. научн. –техн. конф., Минск, 2012 г.: в 4 т. / БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2012. – Т. 1. – С. 259.

РЭЗІЮМЭ

Трещ Абдунасер Мохамед

МАТЭМАТЫЧНАЕ МАДЭЛЯВАННЕ І АПТЫМІЗАЦЫЯ КІРАВАННЯ ФОТАЭЛЕКТРЫЧНАЙ ЎСТАНОЎКІ.

Ключавыя словы: аптымізацыя, рэжым працы, сістэма кіравання, матэматычнае мадэляванне, фотаэлектрычная станцыя.

Рост заклапочанасці з нагоды глабальнага пацяплення і ўплыву на навакольнае асяроддзе і якасцэму прыводзіць да нарастальным увазе развіцця альтэрнатыўных крыніц энергіі з высокай эфектыўнасцю. Сярод іх асаблівае становішча займае сонечная энергія з выкарыстаннем фотаэлектрычнага (ФЭ) эфекту, якая з'яўляецца найбольш важным і ўстойлівым рэсурсам для шэрагу рэгіёнаў, да якіх адносіцца і Лівія. Фотаэлектрычныя станцыі паспяхова выкарыстоўваюцца ў першую чаргу для атрымання электрычнай магутнасці. Выхадныя характарыстыкі фотаэлектрычных модуляў (напружанне і ток) залежаць ад параметраў навакольнага асяроддзя і, улічваючы нелінейны характар гэтай залежнасці, эфектыўным сродкам даследавання з'яўляецца матэматычнае мадэляванне. Прапанаваная мадэль адрозніваецца дружалюбным інтэрфейсам і выкарыстоўвае дыялогавыя вокны бібліятэкі Simulink. Гэта дазваляе будаваць абагульненую мадэль сонечнай батарэі (СБ) і сістэмы кіравання, уключаючы імпульсныя пераўтваральнікі. Улічваючы нелінейнасць знешніх характарыстык СБ, задачай з'яўляецца забеспячэнне працы ў экстрэмальнай пункце, пры якой мае месца максімальная выходная магутнасць (МВМ). Прапанаваны адаптыўны алгарытм пошуку, матэматычная мадэль і яе крокавая рэалізацыя. Для паляпшэння функцыянавання сістэмы прапанавана лінеарызаванная мадэль СБ, якая складаецца з чатырох участкаў. Атрымана перадаткавая функцыя сістэмы, структура якой ўтрымлівае СБ, сістэму кіравання МВМ і імпульсны пераўтваральнік. Аналіз дынамічных ўласцівасці сістэмы прыведзены на прыкладзе СБ, якая складаецца з чатырнаццаці панэляў, злучаных паслядоўна і павышае імпульсным пераўтваральніку з улікам унутраных супраціваў элементаў, якія працуюць на частаце 25 кгц. Дыяграма Бодэ і пераходная характарыстыка маюць здавальняючыя паказчыкі.

Прапанавана структура і выбар параметраў кантролера працуе ў слізгальнай рэжыме, што паляпшае дынамічныя паказчыкі сістэмы і надае яму якасці робастнага.

РЕЗЮМЕ

Трещ Абдунасер Мохамед

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИЕЙ

Ключевые слова: оптимизация, режим работы, система управления, математическое моделирование, фотоэлектрическая станция.

Рост озабоченности по поводу глобального потепления и влияния на окружающую среду и экосистему приводит к нарастающему вниманию развития альтернативных источников энергии с высокой эффективностью. Среди них особое положение занимает солнечная энергия с использованием фотоэлектрического (ФЭ) эффекта, которая является наиболее важным и устойчивым ресурсом для ряда регионов, к которым относится и Ливия. Фотоэлектрические станции успешно используются в первую очередь для получения электрической мощности. Выходные характеристики фотоэлектрических модулей (напряжение и ток) зависят от параметров окружающей среды и, учитывая нелинейный характер этой зависимости, эффективным средством исследования является математическое моделирование. Предложенная модель отличается дружественным интерфейсом и использует диалоговые окна библиотеки Simulink. Это позволяет строить обобщенную модель солнечной батареи (СБ) и системы управления, включая импульсные преобразователи. Учитывая нелинейность внешних характеристик СБ, задачей является обеспечение работы в экстремальной точке, при которой имеет место максимальная выходная мощность (МВМ). Предложен адаптивный алгоритм поиска, математическая модель и ее шаговая реализация. Для улучшения функционирования системы предложена линеаризованная модель СБ, состоящая из четырех участков. Получена передаточная функция системы, структура которой содержит СБ, систему управления МВМ и импульсный преобразователь. Анализ динамических свойства системы приведен на примере СБ, состоящей из четырнадцати панелей, соединенных последовательно и повышающем импульсном преобразователе с учетом внутренних сопротивлений элементов,

работающим на частоте 25 кГц. Диаграмма Боде и переходная характеристика имеют удовлетворительные показатели.

Предложена структура и выбор параметров контроллера работающего в скользящем режиме, что улучшает динамические показатели системы и придает ей свойства робастности.

SUMMARY

Tresch Abdunaser Mohamed

MATHEMATICAL MODELING AND PHOTOVOLTAIC PLANT CONTROL OPTIMIZATION.

Key words: optimization, mode of operation, control system, mathematical modeling, photovoltaic plant.

With increasing concerns about global warming, and damage to environment and ecosystem, the promising attention to develop alternative energy resources with high efficiency is of great importance. Among the renewable energy resources, the solar energy through the photovoltaic (PV) effect is considered the most essential and sustainable resource because of the sustainability of solar radiant energy especially for the country like Libya.

PV module represents the fundamental power conversion unit of a PV generator system. The output characteristics of PV module depends on the solar insolation, the cell temperature and output voltage of PV module. Since PV module has nonlinear characteristics, it is necessary to model it for the design and simulation of maximum power generation tracking (MPGT) for PV system applications. The proposed model is designed with a user-friendly icon and a dialog box like Simulink block libraries. This makes the generalized PV model easily simulated and analyzed in conjunction with switching converters for a MPGT. Taking the effect of sunlight irradiance and cell temperature into consideration, the output current and power characteristics of PV model are simulated and optimized using the proposed model. This enables the dynamics of PV control system to be easily simulated, analyzed, and optimized. An innovative perturb and observe algorithm was proposed: the technique's mathematical model, governing equations, and implementation. To improve system functioning linear mathematical model of PV module was derived as composition of four regions.

It has several advantages in implementation. On the basis of derived equations in order to investigate MPGT algorithm control –to-array transfer function was derived on the basis of the small signal equivalent circuit. For PV array composed by

fourteen panels connected in series with a boost controller operated at 25 kHz frequency and parasitic resistance taken into account Bode diagram and output response was studied.

The sliding-mode control structure of DC-DC converter was divided having robust properties.

Репозиторий БНТУ

Научное издание

ТРЕЩ АБДУНАСЕР МОХАМЕД

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИЕЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление
и обработка информации»