

БУТАРЕВ ИГОРЬ ЮРЬЕВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД
ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ
ТРЕХФАЗНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С
КОРРЕКЦИЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Потапов Леонид Алексеевич**,
доктор технических наук, профессор,
руководитель НИЛ АТМ ФГБОУ ВО
«Брянский государственный технический
университет»

Официальные оппоненты: **Белов Геннадий Александрович**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Промышленная
электроника» ФГБОУ ВО «Чувашский
государственный университет имени
И.Н.Ульянова»;

Безик Дмитрий Александрович,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры электроэнергетики и автоматике
ФГБОУ ВО «Брянский государственный
аграрный университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится 26 марта 2019 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.021.03 при ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» по адресу: 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д.10-Б, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» и на сайте:
<http://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/butarev-igor-yurevich>.

Отзывы на автореферат высылать по адресу: 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д.7, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, кандидат технических наук, доцент

М.Ю. Рытов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблемы энергосбережения и рационального использования энергии имеют высокую актуальность в настоящее время. Одними из наиболее распространённых видов преобразователей, применяемых в промышленности, являются трехфазные импульсные преобразователи с коррекцией коэффициента мощности (3Ф-ИПКМ). Их применение является одной из лучших мер решения проблем энергосбережения, так как такие преобразователи обладают следующими преимуществами: высокий коэффициент мощности, сниженный вес и стоимость, широкие возможности по регулированию и стабилизации уровня выходного напряжения.

Наряду с этим рост внедрения силовых электронных преобразователей породил проблему их негативного влияния на качество электроэнергии. Причиной этому является нелинейный и импульсный характер процессов преобразования электроэнергии посредством ключевых элементов, дискретно управляющих потоками электрической энергии.

Поскольку, возникающие в 3Ф-ИПКМ нелинейные процессы при экспериментальных исследованиях, приводят к необратимым результатам (часто - выходу из строя силовых компонентов преобразователей) экспериментальные работы встречают ряд весьма серьезных препятствий, а создание преобразователей и проведение экспериментов над ними требует значительных временных и денежных затрат, в задачах разработки и оптимизации параметров преобразователей широко используется математическое моделирование.

Совершенствованию 3Ф-ИПКМ препятствует то, что они являются сугубо нелинейными системами вследствие чего недостаточно изучена динамика их поведения, не разработаны адекватные поведенческие модели и методики расчета и подбора компонентов, учитывающие влияние нелинейной динамики при синтезе 3Ф-ИПКМ. Требуется разработка новых математических методов моделирования, учитывающих влияние нелинейных явлений, возникающих в 3Ф-ИПКМ. Математическое моделирование с использованием новых методов, должно позволять анализировать зависимость основных энергетических параметров в задачах синтеза 3Ф-ИПКМ, проводить исследование проектных режимов, учесть факторы, влияющие на развитие нелинейных процессов, предусмотреть их контроль и ограничить режимы работы с тем чтобы исключить их возникновение, или обеспечить надлежащее управление.

Изучению нелинейной динамики, математического моделирования и бифуркационных явлений в импульсных преобразователях посвящены работы Андриянова А.И., Анищенко В.С., Баушева В.С., Белова Г.А., Бородина К.В., Джиаураса Д., Жусубалиева Ж.Т., Кобзева А.В., Колмогорова А.Н., Колоколова Ю.В., Крюкова Б.И., Кузнецова С.П., Ланда П.С., Лихтенбега А., Магницкого Н.А., Малаханова А.А., Михальченко Г.Я., Михальченко С.Г., Ораби М., Рен Х., Тсе Ч.К., Фейгенбаума М., Фейгина М.Ю., Ченга В. и др.

Ни один из современных программных комплексов в области синтеза силовой электроники не учитывает влияние нелинейной динамики импульсно-модуляционных систем в процессе проектирования преобразователя. Зачастую программное обеспечение, имеющее возможности расчета нелинейных систем сложно в использовании, не применимо к прикладной задаче в построении преобразователей и требует специфических знаний и компетенций в области математики. Поэтому требуется создание программного комплекса, использующего математические модели, учитывающие нелинейную динамику.

Объектом исследования являются нелинейные динамические процессы в трехфазных импульсных преобразователях с коррекцией коэффициента мощности.

Предметом исследования являются математические модели, численные методы и алгоритмы, применяемые для исследования нелинейных динамических процессов, протекающих в трехфазных импульсных преобразователях с коррекцией коэффициента мощности.

Целью диссертационной работы является разработка новых математических моделей трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности, позволяющих повысить эффективность преобразователей на основе учета протекающих в них нелинейных динамических процессов.

Задачи исследования. Задачи, поставленные в диссертационной работе для достижения указанных целей:

1. Математическое моделирование современных трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности.

2. Разработка эффективного численного метода определения моментов коммутации в трехфазных импульсных преобразователях с коррекцией коэффициента мощности.

3. Разработка программного комплекса на основе предложенной методики для расчета режимов и автоматизации разработки трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности с учетом влияния нелинейной динамики и его практическое применение для проведения исследований и решения задач расширения областей «проектных» режимов при модельно-ориентированном проектировании трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности.

4. Исследования границ областей «проектных» динамических режимов, наблюдающихся в трехфазных импульсных преобразователях с коррекцией коэффициента мощности, для определения точных технических характеристик преобразователей.

5. Разработка способов, позволяющих исключить влияние нелинейных процессов, расширить область работы и улучшить технические характеристики современных трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности.

Научная новизна. В диссертации содержится решение актуальной научной задачи разработки методов, моделей и программ для исследования нелинейных динамических процессов в трехфазных импульсных преобразователях с коррекцией коэффициента мощности. Научная новизна сформулирована в приведенных ниже положениях.

1. Предложены математические модели трехфазных импульсных преобразователей, базирующиеся на системах дифференциальных уравнений, описывающих нелинейные процессы в указанных объектах и отличающиеся от прототипов учетом нелинейности характеристик.

2. Предложен численный метод определения моментов коммутации трехфазных преобразователей, базирующийся на решении дифференциальных уравнений состояния преобразователя, который описывает нелинейные процессы в трехфазных преобразователях и отличается заменой интерполяционного уравнения многочленом Лагранжа второго порядка, что позволяет сократить время расчета режимов на тактовом интервале работы трехфазного преобразователя без ущерба в точности полученных результатов.

3. Разработан программный комплекс для исследования нелинейных динамических процессов при проектировании трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности, сформированный на основе требований к структуре интерфейса, базирующийся на разработанных математических моделях и отличающийся возможностью выбора типа преобразователя и анализа характеристик процессов нелинейной динамики рассматриваемых объектов.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные теоретические положения позволили:

1. Решить задачи нелинейной динамики, разработать методы численного моделирования и модельно-ориентированного проектирования для разрабатываемых трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности.

2. Использовать результаты исследования для разработки методов структурно-параметрической идентификации и автопостроения поведенческих и мультифизических моделей интегральных схем и созданию на их базе программно-аппаратного измерительного комплекса при выполнении НИР по заданию Министерства образования и науки № 8.1729.2017/ПЧ.

3. На основе проведенных исследований разработать и изготовить промышленные преобразователи частоты с корректорами коэффициента мощности и силовые модули для преобразователей специального назначения на предприятиях ООО «Фрекон», г. Томск и ЗАО «Группа Кремний ЭЛ», г. Брянск.

Методология и методы исследования. Методология основана на анализе логической структуры методов и синтезе теоретических положений настоящей работы, верификации полученных результатов и предположений

Полученные результаты, положения и сделанные выводы использованы автором с учетом теории имитационного моделирования, теории дифференциальных уравнений, теории автоматического управления и поведенческого исследования нелинейных динамических систем.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обеспечивается использованием методов математического моделирования динамических процессов в созданном программном комплексе “*PhaseCor*” и сравнительном анализе полученных результатов с имитационными моделями из компонентов библиотеки *SimPowerSystems* в программном комплексе *Simulink*.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математические модели трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности, описывающие нелинейные процессы в указанных объектах.

2. Численный метод определения моментов коммутации, базирующийся на решении дифференциальных уравнений описания нелинейных процессов в трехфазных импульсных преобразователях с коррекцией коэффициента мощности.

3. Программный комплекс для исследования нелинейных динамических процессов в трехфазных импульсных преобразователях с коррекцией коэффициента мощности.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по следующим пунктам:

п.1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений»;

п.2. «Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей»;

п.4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента».

Степень достоверности и апробация результатов. Степень достоверности выводов и положений диссертационной работы определяется следующим:

- отсутствием противоречий с известными современными научными положениями;

- сопоставлением полученных результатов с результатами аналитических расчетов и результатами моделирования, опубликованными в научной литературе;

- корректным применением математического аппарата.

Апробация работы. Диссертационная работа обсуждалась на расширенном заседании кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» в 2018 году. Основные результаты диссертационной работы и ее отдельные разделы были представлены и

обсуждены на Международной научно-практической конференции «Актуальные задачи математического моделирования и информационных технологий» (2014 г., Сочинский государственный университет г. Сочи), международной научно-практической конференции «Наукоёмкие технологии и инновации (XXI научные чтения)» (2014 г., БГТУ Шухова, Белгород), XI и XII Всероссийской научно-технической конференции «Динамика Нелинейных Дискретных Электротехнических и Электронных Систем» (2015, 2017 г, ЧГУ им. Ульянова г. Чебоксары), I Международной научно-практической конференции «САПР и моделирование в современной электронике» (2017 г., БГТУ г. Брянск).

Личный вклад автора выражается в развитии теории нелинейной динамики и математического моделирования импульсных преобразователей, создании нового метода расчета режимов работы преобразователей при использовании разработанных математических моделей, разработке программного комплекса для исследования нелинейных динамических процессов в трехфазных импульсных преобразователях с коррекцией коэффициента мощности.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе три статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ; получено два свидетельства о государственной регистрации программы.

Реализация и внедрение результатов работы.

1. Результаты работы внедрены в ООО “Фрекон”, г. Томск, осуществляющей разработку и изготовление промышленных преобразователей частоты с корректорами коэффициента мощности (Акт внедрения от 19 октября 2018 г.).

2. Результаты работы внедрены в ЗАО «Группа Кремний Эл», г. Брянск для использования при разработке силовых модулей для преобразователей специального назначения (Акт внедрения № Т-582/ГК от 7 декабря 2018 г.).

3. Разработанные модели используются в учебном процессе в Брянском государственном техническом университете при подготовке студентов следующих направлений подготовки: 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» (профиль – Промышленная электроника), в курсах «Теория нелинейных импульсных систем» и «Импульсно-модуляционные системы».

4. В отчете НИР по заданию Министерства образования и науки № 8.1729.2017/ПЧ «Разработка методов структурно-параметрической идентификации и автопостроения поведенческих и мультифизических моделей интегральных схем и разработка на их базе программно-аппаратного измерительного комплекса».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы, включающего 122 наименования и 5 приложений. Работа содержит 160 страниц основного текста, включая 45 рисунков и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи работы, указаны применяемые в диссертационной работе методы исследований, рассмотрена научная новизна и практическая ценность работы, описана структура работы и сформированы положения, выносимые на защиту.

В главе 1 проведен обзор проблем, тенденций и решений в современной трехфазной преобразовательной технике, представлена классификация преобразователей и принципы синтеза систем управления современных преобразователей, рассмотрены способы математического моделирования 3Ф-ИПКМ, приведены основные факторы, влияющие на выбор 3Ф-ИПКМ.

Современные технологии и научные изыскания развили топологии и улучшили характеристики высокоэффективных трехфазных преобразователей в широком спектре их применений мощных и сверхмощных преобразовательных системах, таких как источники бесперебойного электропитания, различные АС/АС-преобразователи, конденсаторные блоки запаса энергии, электромобили и т.д.

При разработке таких устройств применяется математическое моделирование. В математических моделях электронных устройств начинает применяться поведенческое моделирование и методы “черного” и “серого” ящиков. Однако при выборе между затратами машинного времени и степенью адекватности модели, приоритет зачастую отдается снижению затрат и оговариваются ограничения модели. Одними из основных проблем, возникновение которых невозможно учесть в существующих математических моделях, являются явления нелинейной динамики, вызывающие выход из строя дорогостоящих устройств и представляющие большую опасность для пользователя.

Нелинейная динамика в проектировании трехфазных импульсных преобразователей напряжения начала применяться лишь в начале XXI века и находится на передовой границе современных научных изысканий. Основной целью при исследовании нелинейной динамики трехфазных импульсных преобразователей напряжения является определение границ рабочего режима, нахождение нелинейных эффектов, связанных с бифуркациями, предложения по их исключению в процессе работы преобразователя и расширение границ рабочего режима. Применение нелинейной динамики в разработке трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности может существенно повлиять на технические характеристики проектируемого устройства, расширить его рабочий режим, повысить качество передачи энергии и долговечность.

Динамика 3Ф-ИПКМ являлась объектом исследования работ П. Барбоса, Д. Грегфа, Ц.К. Тсе, Е.Е. Чаплыгина и Овчинникова Д.А. Основной их чертой является глубокое исследование физических явлений в рассматриваемых системах и построение математических моделей, зачастую базирующихся на

использовании метода установления, что ограничивает возможности бифуркационного анализа таких систем.

В главе 2 представлены поведенческие модели 3Ф-ИПКМ на основе инвертора напряжения и составных преобразователей SEPIC (преобразователь на несимметрично нагруженной первичной индуктивности), ZETA (составной преобразователь с регулированием входного напряжения), преобразователь Кука (инверсный преобразователь на несимметрично нагруженной первичной индуктивности) с использованием П-регулятора в системе управления, разработано многомерное обобщение метода Мюллера, применяемое для ускорения расчетов режимов работы 3Ф-ИПКМ на основе представленных поведенческих моделей.

Для создания поведенческих моделей 3Ф-ИПКМ были тщательно проработаны математические зависимости между силовыми и управляющими выходами и входами преобразователей. На примере схемы 3Ф-ИПКМ на основе инвертора напряжения, разработана и исследована математическая имитационная модель.

Был произведен подробный расчет параметров для всех типов участков постоянства структуры на примере 3Ф-ИПКМ с системой автоматического управления, построенной на базе П-регулятора в цепи обратной связи по напряжению, представленного на рис.1.

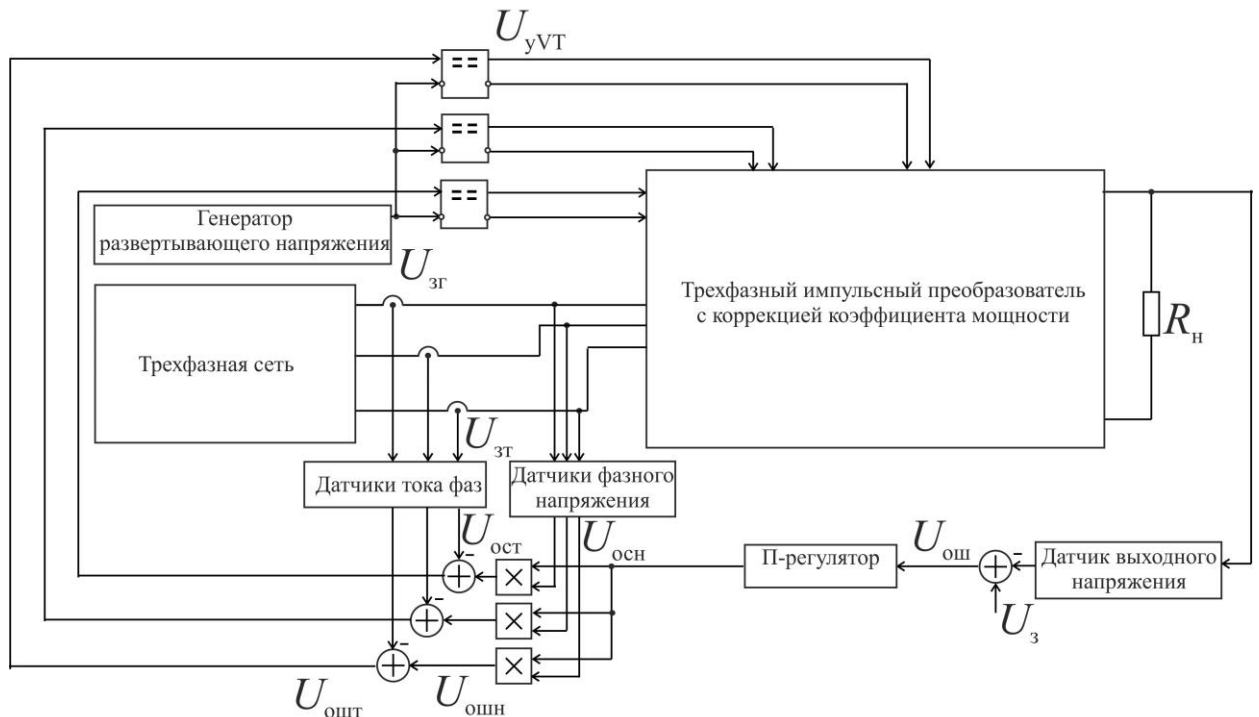


Рис.1. Исследуемая система автоматического управления трехфазным импульсным преобразователем с коррекцией коэффициента мощности с П-регулятором

С помощью полученных выражений возможен расчет трехфазного повышающего преобразователя с коррекцией коэффициента мощности с

обратной связью с помощью П-регулятора для любого заданного числа тактовых интервалов.

Основной задачей при создании моделей современных трехфазных импульсных преобразователей является получение функции стробоскопического отображения и уравнений переключения состояний системы.

Для этого требуется решить задачу Коши для систем линейных дифференциальных уравнений трехфазного импульсного преобразователя с коррекцией коэффициента мощности:

$$\mathbf{X}(t) = \exp[\mathbf{A}_i \cdot (t - t_0)] \bar{\mathbf{X}}_{0i} + \exp[\mathbf{A}_i \cdot (t - t_0)] \cdot \int_{t_0}^t \exp[-\mathbf{A}_i \cdot (\tau - t_0)] \mathbf{B} \mathbf{u}(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где t – текущий момент времени; t_0 – момент времени, соответствующий началу i -го участка непрерывности; \mathbf{A}_i – матрица постоянных коэффициентов на i -том участке постоянства структуры; $\bar{\mathbf{X}}_{0i}$ – вектор начальных условий в момент перехода на i -й участок непрерывности.

Значение переменных состояния на интервале для трехфазного повышающего преобразователя с коррекцией коэффициента мощности будет иметь вид:

$$\mathbf{X}(z) = \mathbf{P}(z) \cdot \bar{\mathbf{X}}_{0ki} + \frac{w^{-2} \mathbf{B} [\mathbf{A}_i \mathbf{u}(z) - \mathbf{P}(z) \mathbf{A}_i \mathbf{u}(z_{ki-1}) - w \mathbf{u}^*(z) + \mathbf{P}(z) w \mathbf{u}^*(z_{ki-1})]}{\mathbf{E} + w^{-2} \mathbf{A}_i^2}, \quad (2)$$

где $\mathbf{P}(z) = \exp[\mathbf{A}_i(z - z_{ki-1})]$; w – угловая частота напряжения питающей сети; \mathbf{E} – единичная матрица; векторы $\mathbf{u}(z)$ и $\mathbf{u}^*(z)$ – векторы трехфазного входного воздействия; z – относительное время тактового интервала.

Общая функция стробоскопического отображения для рассмотренных 3Ф-ИПКМ преобразователей имеет вид:

$$\mathbf{X}_k(z) = \left(\prod_{i=1}^N \exp[\mathbf{A}_i(z_{k,i} - z_{k,i-1})a] \right) \cdot \mathbf{X}_{k-i} + \sum_{j=1}^{N-1} \prod_{i=j+1}^N \left\{ \exp[\mathbf{A}_i(z_{k,i} - z_{k,i-1})a] \right\} \times \quad (3)$$

$$\times \left(\exp[\mathbf{A}_j(z_{k,j} - z_{k,j-1})a] - \mathbf{E} \right) \cdot \mathbf{A}_j^{-1} \mathbf{B}_j + \left(\exp[\mathbf{A}_N(z_{k,N} - z_{k,N-1})a] - \mathbf{E} \right) \mathbf{A}_N^{-1} \mathbf{B}_N,$$

где \mathbf{A}_i – матрица постоянных коэффициентов на i -том участке постоянства структуры; \mathbf{B}_i – вектор вынуждающих воздействий на i -том участке; \mathbf{X} – вектор переменных состояния; z_{kn} – n -й момент коммутации на k -м тактовом интервале в относительном времени; N – номер последней коммутации на k -том тактовом интервале.

Выражение (3) представляет собой обобщенную функцию стробоскопического отображения 3Ф-ИПКМ вида $\mathbf{X}_k = \Psi(\mathbf{X}_{k-1})$, связывающую векторы фазовых переменных в моменты коммутации.

Значения элементов матриц \mathbf{A}_i и векторов \mathbf{B}_i для каждого преобразователя выводятся отдельно и зависят от топологии на участке постоянства структуры.

Так как моменты коммутации на тактовом интервале при использовании широтно-импульсной модуляции первого рода (ШИМ-I) вычисляются в стробоскопические моменты времени, значения z_{k1} , z_{k2} и z_{k3} определяются

значениями компонент вектора сигналов управления U_y в моменты z_{k0} . При работе с моделью удобнее искать значения моментов коммутации ключей в стойках, подключенных к фазам входного напряжения z_{kA} , z_{kB} и z_{kC} , которые определяются значениями $U_{yA}(z_{k0})$, $U_{yB}(z_{k0})$, $U_{yC}(z_{k0})$.

$$U_{yA}(z, k) = \alpha_T [\alpha_n (U_{zn} - \beta_n U_{cf}(z)) \cdot \beta E_m \sin(\omega(k-1)\alpha + \varphi_A) - \beta_T i_A(z)]; \quad (4)$$

$$U_{yB}(z, k) = \alpha_T [\alpha_n (U_{zn} - \beta_n U_{cf}(z)) \cdot \beta E_m \sin(\omega(k-1)\alpha + \varphi_B) - \beta_T i_B(z)]; \quad (5)$$

$$U_{yC}(z, k) = \alpha_T [\alpha_n (U_{zn} - \beta_n U_{cf}(z)) \cdot \beta E_m \sin(\omega(k-1)\alpha + \varphi_C) - \beta_T i_C(z)]. \quad (6)$$

Поиск моментов коммутации z_{kn} обычно осуществляется численными методами на основе разностных функций. Полученные с помощью численных методов решения содержат некоторые погрешности, но снижение затраченного машинного времени и соблюдение установленной точности расчета нивелируют данный недостаток численных методов. Для решения уравнений определения моментов коммутации предложен эффективный метод, основанный на методе Мюллера.

Однако существенным недостатком данного метода является возможность использования только для поиска решений нелинейных уравнений с одной переменной. Зачастую в практических приложениях математических методов требуется решение систем уравнений с n -м количеством переменных. Для представленных моделей 3Ф-ИПКМ в системах линейных-дифференциальных уравнений требовалось нахождение трех переменных. Однако в случае применения сложных регуляторов в модели или построении моделей сложных систем требуется нахождение n -переменных. Была предложена реализация многомерного метода, основанного на методе Мюллера для нелинейных систем уравнений с n -м количеством переменных. Представлен алгоритм предложенного метода.

В главе 3 обсуждается процесс разработки программного комплекса *PhaseCOR*, предназначенного для моделирования статических и динамических процессов работы 3Ф-ИПКМ.

Зачастую программное обеспечение, имеющее возможности расчета нелинейных систем сложно в использовании, не применимо к прикладной задаче в построении преобразователей и требует специфических знаний и компетенции в области математики. В основном такое ПО не является коммерческим.

Была поставлена задача разработки программного комплекса для моделирования статических и динамических процессов работы 3Ф-ИПКМ с учетом влияния нелинейной динамики на основе полученных в главе 2 математических моделей.

При расчете режимов работы 3Ф-ИПКМ с помощью математических моделей основными характеристиками являются затраты машинного времени и точность полученных результатов. Главным фактором, влияющим на эти характеристики, является используемый численный метод.

Разработан программный комплекс *PhaseCOR*, в котором использован численный метод в задаче поиска времени коммутации на тактовом интервале

работы трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности, позволяющий ускорить расчет динамических процессов в 3Ф-ИПКМ без ущерба в обеспечении точности полученных результатов.

Представленные в главе 2 математические модели преобразователей, алгоритмы нахождения решений кусочно-непрерывных функций и математические методы позволили создать полную методику расчета трехфазных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности с учетом нелинейной динамики и бифуркационного подхода к проектированию.

Программный комплекс *PhaseCOR* предназначен для моделирования статических и динамических процессов работы трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности. Комплекс разработан в среде научных и инженерных расчетов *Matlab* с использованием его встроенных математических функций. Архитектура программного комплекса представлена на рис.2.

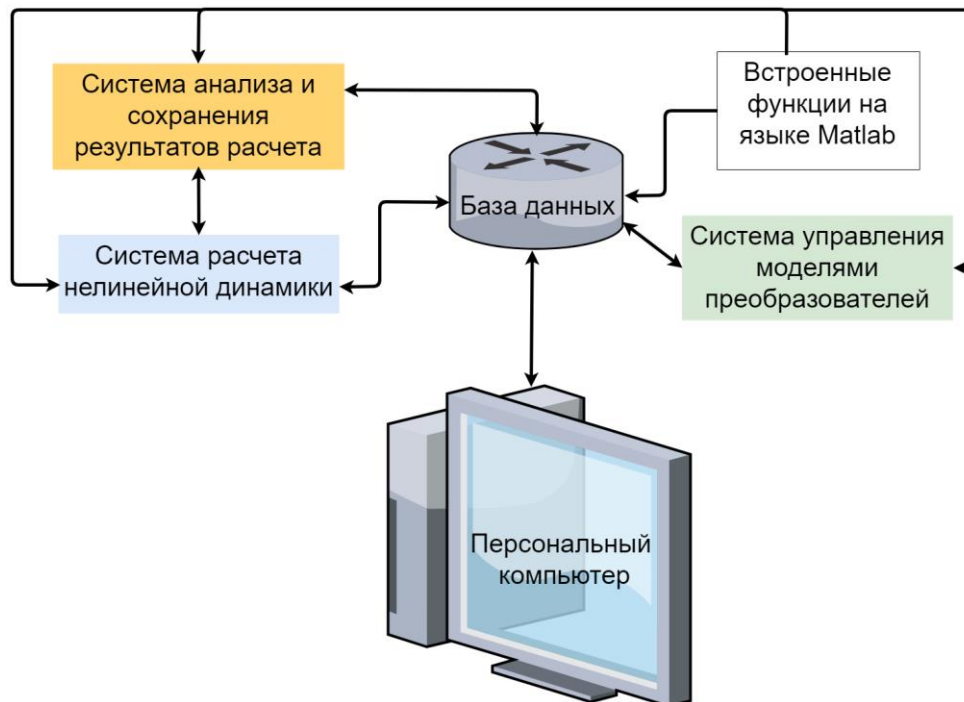


Рис.2. Архитектура программного комплекса *PhaseCOR*

Разработанный программный комплекс обладает высокой точностью и скоростью расчета режимов работы на основе предложенных моделей, модульной архитектурой, интуитивно-понятным интерфейсом пользователя с большими возможностями по работе с данными, их визуализацией и экспортом/импортом данных в стандартные форматы.

Пользователь может выбрать тип преобразователя (3Ф-ИПКМ на основе инвертора напряжения, SEPIC, ZETA или преобразователь Кука), входное напряжение, коэффициент заполнения, индуктивность фильтра, сопротивление индуктивности, ёмкость фильтра, сопротивление ёмкости,

сопротивление нагрузки и частоту переключений, параметры регулятора обратной связи.

Представленный комплекс имеет свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017660073. Встроенное в комплекс обобщение метода Мюллера имеет свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017660070.

Для подтверждения адекватности и точности созданных математических моделей были использованы блочные имитационные модели преобразователя на основе инвертора напряжения и составных преобразователей в *SimPowerSystems*.

Результаты моделирования идентичны, расхождение составляет менее 3%. Кроме того, затраты машинного времени *PhaseCOR* при сопоставимой точности до 10 раз меньше, чем при использовании имитационных моделей *SimPowerSystems* что обеспечивается использованием многомерного обобщения метода Мюллера, обладающего высокой сходимостью и малым числом итераций для достижения результата расчета.

В главе 4 представлен бифуркационный анализ 3Ф-ИПКМ на основе мостового инвертора и понижающе-повышающих преобразователей с помощью программного комплекса *PhaseCOR*, предложен и реализован алгоритм многопараметрического управления нелинейной динамикой импульсных преобразователей на основе линеаризации отображения Пуанкаре.

Основной задачей бифуркационного анализа импульсных преобразователей является нахождение местоположения первой бифуркационной границы на параметрических бифуркационных картах преобразователя. Эта граница так же является предельной для области номинального одноциклового режима и при её прохождении преобразователь переходит в сложные многоцикловые или хаотические режимы, при которых его работа не оптимальна и существует большая вероятность поломки. Для оценки опасности для преобразователя той или иной границы перехода обязательно нужно проанализировать значение амплитуд колебаний токов и напряжений при попадании преобразователя в эту границу работы. Представлено исследование нелинейной динамики составных трехфазных преобразователей напряжения с коррекцией коэффициента мощности с помощью программного комплекса *PhaseCOR*.

Установлено, что наибольшая площадь области желаемого 1-цикла обеспечивается в преобразователе SEPIC, а наименьшая – в преобразователе ZETA. Особенностью составных преобразователей является сужение области 1-цикла с увеличением задающего воздействия. При больших значениях задающего воздействия и коэффициента усиления регулятора α наблюдаются динамические режимы с большой амплитудой колебаний, которые могут быть отнесены к опасным. Наиболее оптимальным составным импульсным преобразователем постоянного напряжения с точки зрения нелинейной динамики является преобразователь Кука, который имеет приемлемую

площадь желаемого 1-цикла и минимальную амплитуду колебаний в области нежелательных режимов.

Правильный подбор параметров, согласно методикам, для 3Ф-ИПКМ, не учитывающий влияние нелинейной динамики, может привести к снижению его КПД, выходу из нормального режима работы, перегреву и поломке. Особенно большой угрозе подвержены конденсаторы фильтров в данных устройствах.

На рис. 3 показана конфигурация системы автоматического управления импульсным преобразователем с коррекцией коэффициента мощности, созданная с помощью структурного подхода к разработке.

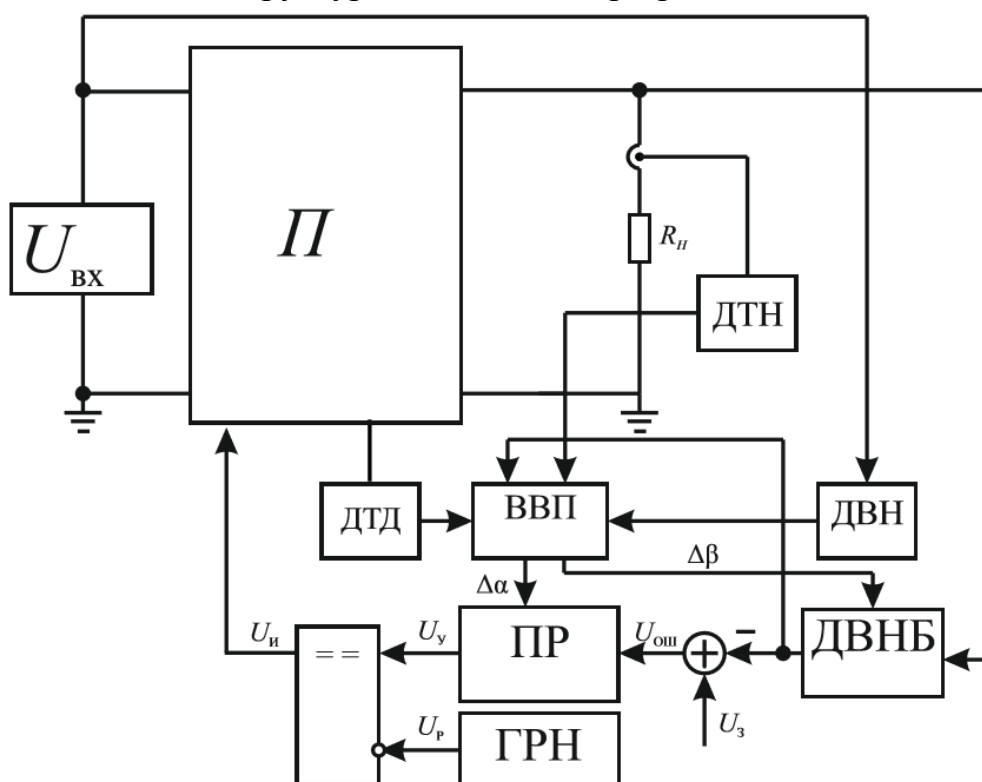


Рис. 3. Функциональная схема замкнутой системы автоматического управления с функцией управлением нелинейной динамикой

К преобразователю П, представляющему “черный” ящик, подключены источник напряжения $U_{вх}$ и сопротивление R_n в качестве нагрузки. На нагрузку установлены блоки-датчики «ДВНБ» (датчик выходного напряжения с коэффициентом β) и «ДТН» (датчик тока нагрузки). Значение входного напряжения $U_{вх}$ регистрирует блок-датчик «ДВН» (датчик входного напряжения). К дросселю в преобразователе подключен «ДТД» (датчик тока дросселя). Далее, как и в стандартной системе управления импульсным преобразователем с обратной связью по напряжению, значение напряжения с датчика ДВНБ вычитается из напряжения задания $U_з$. Результирующее напряжение ошибки $U_{ош}$ поступает на «ПР» (пропорциональный регулятор). Полученное после регулятора напряжение управления $U_у$ сравнивается на компараторе (= =) с развертывающим пилообразным напряжением $U_р$,

поступающим с блока «ГРН» (генератор развертывающего напряжения). В результате напряжение управление силовым ключом U_i поступает на ключ в преобразователе. В отличии от стандартной схемы управления в систему введена подсистема, управляющая нелинейной динамикой, основным блоком которой является блок «ВВП» (вычислитель возмущения параметров), который регулирует коэффициент пропорционального регулятора α и масштабный коэффициент цепи обратной связи β с помощью приращений $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$. В качестве блока вычислителя возмущения параметров может быть использован микроконтроллер и основной его задачей является реализация способа управления нелинейной динамикой.

Вектор стробоскопического отображения (3) в данном случае может быть представлен в следующем виде

$$\mathbf{X}_k = \Psi(\mathbf{X}_{k-1}, \mathbf{P}). \quad (7)$$

Здесь \mathbf{P} является вектором параметров преобразователя, изменяющим значения моментов коммутации z_{k1} и z_{k2} на каждом тактовом интервале в (3).

Главная цель при управлении нелинейной динамикой 3Ф-ИПКМ состоит в возвращении импульсного преобразователя в одноцикловый номинальный режим работы в случае, когда преобразователь перешел в многоцикловый непроектный или хаотический режим. В случае перехода в нежелательный режим, отличный от номинального, требуется задать корректирующий вектор воздействия \mathbf{P} , позволяющий вернуть преобразователь в одноцикловый номинальный режим.

Предложенный алгоритм был опробован на преобразователях SEPIC, Zeta и преобразователе Кука (рис.4). Были построены бифуркационные диаграммы зависимостей напряжения на выходном конденсаторе фильтра от коэффициента пропорционального регулятора.

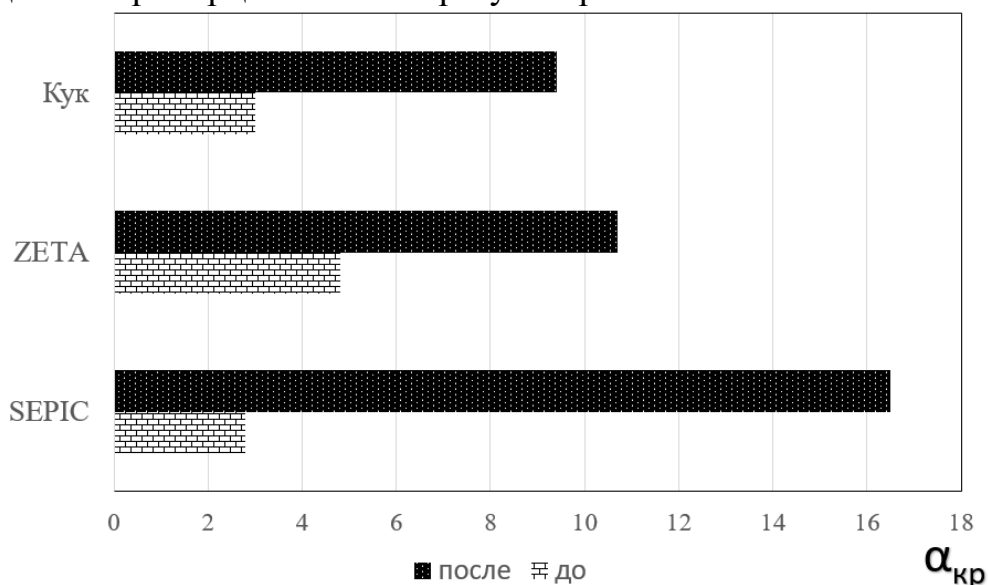


Рис. 4. Результаты применения алгоритма управления нелинейной динамикой 3Ф-ИПКМ

Из рис.4 видно, что бифуркационная граница $\alpha_{кр}$ для преобразователя SEPIC сдвинулась с 2,8 до 16,5, что свидетельствует о расширении рабочего

режима SEPIC в 5 раз. Бифуркационная граница $\alpha_{кр}$ преобразователя Кука сдвинулась с 3 до 9,4, что свидетельствует о расширении рабочего режима преобразователя Кука в 3 раза. Бифуркационная граница $\alpha_{кр}$ преобразователя Zeta сдвинулась с 4,8 до 10,7, что свидетельствует о расширении рабочего режима преобразователя Zeta в 2 раза.

Полученные результаты говорят о том, что лучший результат использования применённого алгоритма наблюдается в преобразователе SEPIC. Однако даже расширение в 2 раза рабочего режима в преобразователе Zeta свидетельствует о работоспособности алгоритма в области подавления нелинейных явлений и можно ожидать, что его применение в реальных устройствах приведет к значимому улучшению характеристик преобразователя. Исходя из полученных результатов можно говорить о том, что при применении стандартного варианта системы управления лучше использовать преобразователя Кука, а при применении предложенного способа, позволяющего управлять нелинейной динамикой, преобразователь SEPIC будет более предпочтителен.

Представленные исследования и алгоритм расширения рабочего режима используются при разработке и производстве промышленных преобразователей частоты с корректорами коэффициента мощности и силовых модулей для преобразователей специального назначения на предприятиях ООО «Фрекон», г. Томск и ЗАО «Группа Кремний ЭЛ», г. Брянск.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Обосновано положение о том, что использование традиционных (не модельно-ориентированных) методик проектирования трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности не обеспечивает максимально возможного КПД, а также не исключает непрогнозируемый выход из строя преобразователей вследствие неучета нелинейных режимов их работы.

2. Разработаны математические модели трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности, описывающие нелинейные процессы в указанных объектах и в отличающиеся от прототипов учетом нелинейности характеристик.

3. Разработан численный метод в задаче поиска времени коммутации на тактовом интервале работы трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности, базирующийся на дифференциальных уравнениях состояния преобразователя и позволяющий значительно сократить время расчета режимов на тактовом интервале работы трехфазного преобразователя без ущерба в точности полученных результатов.

4. Проведено сравнение математических моделей с существующими и получен результат при котором расхождение между расчетами режимов работы в моделях составляет менее 3%, а использование предложенного численного метода снижает затраты машинного времени по сравнению с

существующими моделями более чем в 10 раз при аналогичных параметрах точности расчета моделей.

5. Разработан программный комплекс “*PhaseCor*” на основе сформулированных требований, базирующийся на разработанных математических моделях и отличающийся возможностью выбора типа трехфазного импульсного преобразователя с коррекцией коэффициента мощности и анализа характеристик нелинейных динамических процессов, протекающих в рассматриваемых преобразователях.

6. Проведено исследование нелинейных динамических процессов в трехфазных импульсных преобразователях с коррекцией коэффициента мощности, определены границы существования областей нелинейных режимов работы преобразователей, даны рекомендации по выбору параметров преобразователей с учетом влияния нелинейных динамических процессов.

7. Предложен подход к проектированию трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности, базирующийся на бифуркационных явлениях, возникающих в преобразователях, внедренный на предприятиях ООО “Фрекон”, г. Томск и ЗАО «Группа Кремний ЭЛ», г. Брянск.

8. Разработан и проверен в численном эксперименте алгоритм системы управления, позволяющий для трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности в областях параметров со сложной динамикой обеспечить проектный динамический режим.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Андриянов А.И. Алгоритм многопараметрического управления нелинейной динамикой импульсных преобразователей на основе линеаризации отображения Пуанкаре/ А.И. Андриянов, И.Ю. Бутарев // Известия вузов. Электроника, №6 (110), 2014. – С. 51-59.

2. Андриянов А.И. Сравнительный анализ систем управления с составными преобразователями напряжения по конфигурации первых бифуркационных границ/ А.И. Андриянов, И.Ю. Бутарев, А.А. Малаханов // Электротехнические комплексы и системы управления, №2, 2015. – С. 55-64.

3. Бутарев, И.Ю. Математическая модель трехфазного корректора коэффициента мощности на основе инвертора напряжения / Вестник БГТУ - Брянск, БГТУ - №3 - 2016 - С.36-42.

Документы на объекты интеллектуальной собственности

4. Свид. 2017660070 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета систем уравнений с помощью многомерного метода Мюллера / Андриянов А. И., Бутарев И.Ю.; заявитель и правообладатель ГБОУ ВО БГТУ (RU). -

2017660070; заявл. 17.07.2017; опубл. 14.09.2017, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

5. Свид. 2017660073 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа моделирования динамики трехфазных корректоров коэффициента мощности / Андриянов А. И., Бутарев И.Ю.; заявитель и правообладатель ГБОУ ВО БГТУ (RU). - 2017660073; заявл. 17.07.2017; опубл. 14.09.2017, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

Статьи в сборниках научных трудов, тезисы докладов конференций

6. Андриянов, А.И. Управление нелинейной динамикой в области мультистабильности на основе линеаризации отображения Пуанкаре / А.И. Андриянов, И.Ю. Бутарев // “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика”: Девятнадцатая междунар. науч.-тех. конф. студентов и аспирантов (27-28 февраля 2014 г., г.Москва): Тез. докл. в 4 т. Т. 1 М.: Издательский дом МЭИ, 2014 г.- С.201.

7. Андриянов, А.И. Обеспечение проектных динамических режимов непосредственного понижающего преобразователя. / А.И. Андриянов, И.Ю. Бутарев, А.С. Потапов // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых - 2013 [Текст]: материалы Международной молодежной научной конференции (13-15 ноября 2013 года), в 6-х томах, Том 6, Юго-Зап. гос. ун-т., А.А. Горохов, Курск, 2013, 404 с.С.29-34.

8. Андриянов, А.И. Обобщенная математическая модель транзисторных преобразователей напряжения. / А.И. Андриянов, И.Ю. Бутарев // Перспектива – 2014: материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Т. IV. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2014. – С.124-127.

9. Андриянов, А.И. Исследование нелинейной динамики замкнутых систем управления с преобразователем на несимметричной первичной обмотке / А.И. Андриянов, И.Ю. Бутарев, Н.М. Булохов, А.С. Потапов // Тенденции формирования науки нового времени: сборник статей Т33 Международной научно-практической конференции. 27-28 декабря 2013 г.: в 4 ч. Ч.4 / отв. Ред. А.А. Сукиасян – Уфа: РИЦ БашГУ, 2014 – 330 с. С.65-67.

10. Andryanov, A. I. Mathematical modeling of nonlinear dynamics of single-phase power factor correction / A. I. Andryanov, I. Yu. Butarev // Modeling of artificial intelligence научный издательский дом "Исследователь" (Сочи), 2014.- №4 –с.152-158.

11. Андриянов, А.И. Адаптация параметров метода направления на цель при управлении нелинейной динамикой импульсных преобразователей напряжения / А.И. Андриянов, И.Ю. Бутарев // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XI Всероссийской научно-технической конференции. Чебоксары, 2015 г.- с.10-13.

12. Андриянов, А.И. Математическая модель трехфазных корректоров коэффициента мощности / А.И. Андриянов, И.Ю. Бутарев // Информационные

Технологии В Электротехнике И Электроэнергетике: материалы X всероссийской научно-технической конференции. Чебоксары, 2016 г.- с.80-83.

13. Андриянов, А.И. Трехфазный корректор мощности на основе инвертора напряжения / А.И. Андриянов, И.Ю. Бутарев // сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика» (филиал МЭИ г.Смоленск), 2016 г.- с.221-225.

14. Бутарев, И.Ю. Исследование аварийных режимов в трехфазном корректоре коэффициента мощности / И.Ю. Бутарев, Д.А. Крестниковский // “САПР и моделирование в современной электронике”. Сборник научных трудов I международной научно-практической конференции, Брянск, 22–23 ноября 2017 г. Под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина - Брянск, БГТУ - 2017г. - С. 162-169.

15. Бутарев, И.Ю. Использование цифрового фильтра в Matlab при аппроксимации данных измерения динамических параметров силовых модулей / И.Ю. Бутарев, А.В. Толочко // “САПР и моделирование в современной электронике”. Сборник научных трудов I международной научно-практической конференции, Брянск, 22–23 ноября 2017 г. Под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина - Брянск, БГТУ - 2017г. - С. 72-76.

16. Бутарев, И.Ю. Математическая модель трёхфазного корректора коэффициента мощности / И.Ю. Бутарев, А.И. Андриянов // “САПР и моделирование в современной электронике”. Сборник научных трудов I международной научно-практической конференции, Брянск, 22–23 ноября 2017 г. Под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина - Брянск, БГТУ - 2017г. - С.136-145.

17. Андриянов, А.И. Система управления нелинейной динамикой инвертора напряжения с запаздывающей обратной связью / А.И. Андриянов, Д.Ю. Михальцов, И.Ю. Бутарев, А.В. Пивторак // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем, Чебоксары, 02 июня 2017 г. С.142-146.

18. Бутарев, И.Ю. Математическое моделирование трехфазных корректоров коэффициента мощности / И.Ю. Бутарев, Д.Ю. Азьмуко // Радиоэлектроника, Электротехника И Энергетика: Двадцать третья междунар. науч.-тех. конф. студентов и аспирантов (2-3 марта 2017 г., г.Москва): Тез. докл. в 3 т. Т. 1 М.: Издательский дом МЭИ, 2017 г.- С.148.

Подписано в печать _____ Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная. Офсетная печать. Печ. л. 1 Т. 100 экз. Заказ № 27. Бесплатно.

Брянский государственный технический университет
241035, Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7,
Лаборатория оперативной печати БГТУ, ул. Институтская, 16