

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию Бутарева Игоря Юрьевича «Математическое моделирование и численный метод исследования нелинейной динамики трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

### **Актуальность темы диссертации**

Диссертация И.Ю. Бутарева посвящена задаче исследования и реализации моделей и методов численного расчета нелинейной динамики трехфазных импульсных корректоров коэффициента мощности. Общеизвестно, что в последние десятилетия количество электронных приборов, использующих импульсные источники, питания увеличилось. Такие источники генерируют гармонические и нелинейные искажения потребляемого тока, которые отрицательно влияют на электросеть и электроприборы, подключенные к ней. Это влияние выражается в разного рода помехах, сказывающихся на работе чувствительных устройств и снижении КПД передачи энергии. Один из возможных путей решения этой проблемы – встраивание в схему источника питания корректора коэффициента мощности. Но зачастую инженерный подход не учитывает возможность проявления нелинейной динамики в таких устройствах. Все это обуславливает необходимость разработки новых моделей трехфазных преобразователей с коррекцией мощности, позволяющих оценить степень влияния нелинейной динамики в этих устройствах.

В диссертационной работе Бутарева И.Ю. предложен подход к построению математических моделей трехфазных преобразователей на основе учёта нелинейности характеристик протекающих в них процессов. Метод расчета, предложенный автором, позволяет существенно снизить время получения результатов моделирования. Основное внимание в диссертационном исследовании сосредоточено на создании новых моделей

преобразователей и исследовании бифуркационных явлений, происходящих в них.

Помимо применения в работе бифуркационного подхода, также стоит отметить разработанный программный комплекс для представленных моделей и метода. Результаты исследования используются на предприятиях исследуемой отрасли, что отмечено актами о внедрении.

Теоретические исследования существующих подходов к управлению трехфазными преобразователями и их развитие в виде предложенного автором алгоритма развивают теории нелинейной динамики и автоматического управления в рамках моделирования устройств силовой электроники.

*Поставленная в диссертации цель разработки новых математических моделей трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности, позволяющих повысить эффективность преобразователей на основе учета протекающих в них нелинейных динамических процессов является актуальной.*

### **Структура и краткая характеристика работы**

Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы из 122 наименований, и пять приложений.

Первая глава работы носит обзорный характер – автор описывает существующие современные топологии трехфазных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности и приводит их классификацию, описывает тенденции развития, приводит основные факторы при выборе конкретного преобразователя. В главе сравниваются существующие подходы к моделированию трехфазных преобразователей и описываются исследования в области нелинейной динамики силовой электроники. Также формулируется цель разработки поведенческих математических моделей для данных преобразователей и исследования нелинейной динамики на разработанных моделях с задачей их обобщения.

Во второй главе описывается разработка поведенческих моделей, представленных в первой главе преобразователей. Описаны модели



трёхфазный преобразователей с корректором мощности (SEPIC, преобразователь Кука, Zeta). Представлен алгоритм разработки поведенческой модели и обобщение метода Мюллера, который позволяет ускорить решение уравнений переключения.

Третья глава описывает предложенный на основе представленных в главе 2 моделей программный комплекс. Представлены требования к проектируемому комплексу, его структура, интерфейс и проведена верификация с имитационными моделями в Matlab, результатом которой стало подтверждение работоспособности представленных моделей.

В четвертой главе проведен сравнительный анализ карт динамических режимов трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности. Анализ динамических карт показал, что при выбранных параметрах силовой части, рассмотренным корректорам мощности присуща сложная квазипериодическая динамика, характеризующаяся большой амплитудой колебаний выходного напряжения. В главе предложен способ управления нелинейной динамикой трехфазных корректоров коэффициента мощности, применение которого в реальных устройствах приведет к значительному приросту характеристик преобразователя.

В целом, работа производит весьма хорошее впечатление. Автором проведено серьезное исследование проблемы, рассмотрен широкий спектр разработанных подходов и проанализированы их недостатки. Автор грамотно подошел к построению новых моделей, с их использованием разработал и успешно реализовал соответствующие алгоритмы.

### **Новизна, обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

В процессе исследования автором получены три основных результата:

1. Представлены математические модели трехфазных импульсных преобразователей, базирующиеся на системах дифференциальных

уравнений, описывающих нелинейную динамику трехфазных импульсных преобразователей и отличающиеся 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 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, отличающийся возможностью выбора типа преобразователя и анализа характеристик процессов нелинейной динамики рассматриваемых объектов.

Результаты получили в диссертации обоснованное подтверждение путем внедрения в работу предприятий ООО «Фрекон», г. Томск и ЗАО «Группа Кремний ЭЛ», г. Брянск и при выполнении НИР по заданию Министерства образования и науки № 8.1729.2017/ПЧ.

*В целом сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации обладают новизной, достаточно обоснованы и достоверны.*

### **Научная и практическая значимость результатов**

Представленные в работе результаты имеют теоретическую и практическую ценность.

Теоретическая ценность заключается в развитии поведенческого моделирования нелинейной динамики трехфазных импульсных преобразователей с коррекцией коэффициента мощности и расширении числа математических методов, позволяющих исследовать процессы нелинейного поведения устройств такого рода более полно и адекватно.

Значение результатов для практики заключается в использовании результатов исследования для разработки методов структурно-параметрической идентификации и построения поведенческих и мультифизических моделей схем корректоров мощности и создании на этой базе программно-аппаратного измерительного комплекса применяемого при изготовлении промышленных преобразователей частоты с корректорами коэффициента мощности и силовых модулей для преобразователей на предприятиях электронной отрасли.

*Полученные в работе результаты следует признать значимыми как для теории, так и для практики.*

### **Подтверждение опубликования результатов исследования**

По материалам диссертационного исследования было опубликовано 16 печатных работ, среди которых 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Публикации в достаточной степени отражают содержание диссертации. Все полученные автором результаты, обладающие признаками научной новизны, отражены в статьях, опубликованных в журналах из Перечня ВАК РФ. Также автором получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

### **Достоинства и недостатки работы**

Как квалификационная работа, диссертация Бутарева И.Ю. характеризуется внутренним единством, выражающимся в том, что все результаты представляют собой последовательное развитие от постановки задачи, разработки моделей и методов, создания программного комплекса на их основе и проведения численного эксперимента с помощью представленного комплекса.

Поставленные научные задачи в диссертации достигнуты. Формулировки выводов и заключение правильно отражают существо исследований.



Язык изложения материала достаточно грамотный и свидетельствует о высоком научном уровне подготовки диссертанта. Имеется небольшое количество грамматических ошибок и стилистических неточностей.

Работа имеет несколько недостатков:

1. На рис. 4.20 - 4.22 проведено сравнение бифуркационных диаграмм для различных выходных напряжений. Следовало привести эти диаграммы для одинаковых рабочих параметров.

2. При выборе параметров модели для проверки программного комплекса были выбраны не очень удачные параметры (слишком большое значение активного сопротивления дросселей).

3. Было бы желательно осуществить проверку адекватности модели в натурном эксперименте, а не путем сравнения с другими моделями.

4. В тексте присутствуют неточности в описании смысла переменных и синтаксические ошибки в формулах (формула (2.39)  $a$  и  $\alpha$ , на стр.60 для  $\xi$  нет расшифровки, стр. 84 циклическая частота представлена в герцах).

5. В автореферате в научной новизне не отражена разработка алгоритма адаптации параметров настройки регулятора.

*Приведенные недостатки не препятствуют положительной оценке работы в целом, и поэтому могут рассматриваться как пожелания для дальнейших исследований.*

### **Заключение**

Диссертационная работа Бутарева И.Ю. соответствует специальности 05.13.18 (пп. 1, 2, 4 паспорта специальности) и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, результатом которой является решение важной задачи актуального направления в моделировании преобразовательной техники. Работа обладает научной новизной и практической значимостью, в достаточной степени освещена в печати. Разработанное программное обеспечение прошло государственную регистрацию. Результаты работы нашли применение в учебном процессе

Брянского государственного технического университета и на специализированных предприятиях ООО «Фрекон», г. Томск и ЗАО «Группа Кремний Эл», г. Брянск. Автореферат в достаточной степени отражает основные положения и выводы диссертации.

В целом, представленная диссертация соответствует предъявляемым к кандидатским диссертациям требованиям, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней» а ее автор, Бутарев Игорь Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

### **Официальный оппонент**

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

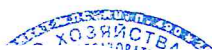
Безик Дмитрий Александрович

3 марта 2019 г.

### **Контактные данные официального оппонента**

243365, Россия, Брянская область, Выгоничский район,  
с. Кокино, ул. Советская 2А  
тел./факс +7-48341-24-227,  
e-mail: [bda20101@yandex.ru](mailto:bda20101@yandex.ru)

*Подпись Безика Дмитрия Александровича заверяю:*



Зав. канцелярией ФГБОУ ВО  
«Брянский государственный аграрный университет»

Потапушина Алла Александровна

