

На правах рукописи



Сорокин Дмитрий Александрович

**РАЗРАБОТКА ТРЕХФАЗНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО
ТОКА В ПОСТОЯННЫЙ С КОРРЕКЦИЕЙ ВХОДНОГО ТОКА**

Специальность 05.09.03

Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Вольский Сергей Иосифович

Официальные оппоненты: **Корнев Александр Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, профессор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

Коняхин Вячеслав Сергеевич, кандидат технических наук, заместитель начальника отделения систем электроснабжения АО «Аэроэлектромаш»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта (ЭКАО)

Защита состоится “20” ноября 2020 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.125.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте www.mai.ru/events/defence/.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.07,
кандидат технических наук, доцент



Д. С. Дежин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в электротехнических комплексах большинство первичных источников электрической энергии являются трёхфазными генераторами напряжения переменного тока. Потребители при этом разнообразны как по уровню питающего напряжения, так и по роду тока, частоте, количеству фаз и многим другим показателям качества электроэнергии. На практике функцию согласования выходных параметров первичного источника электрической энергии с требуемыми параметрами потребителей возложена на промежуточное звено постоянного тока, которое во многих случаях содержит входной преобразователь, осуществляющий выпрямление трёхфазного напряжения сети.

Одним из перспективных направлений применения выпрямительных преобразователей являются электротехнические комплексы самолетов, в которых системы электроснабжения базируются на использовании магистрального двухполярного напряжения 270 В постоянного тока. Так в структуре бортовой системы генерирования электрической энергии пассажирского самолёта Boeing 787 уже используют такие установки, преобразующие трехфазное напряжение магистрального генератора в напряжение + 270 В постоянного тока.

Другим направлением применения указанных преобразователей являются электротехнические комплексы, содержащие ветроэнергетические, автономные дизельные или газотурбинные установки, которые в случае поддержания энергоэффективного режима работы имеют нестабильную частоту вращения ротора генератора, и соответственно нестабильные параметры по действующему значению и частоте выходного трехфазного напряжения. В этом случае к перспективному решению следует отнести также использование промежуточного звена постоянного тока со стабилизированным выходным напряжением на базе трехфазного выпрямительного преобразователя.

Также перспективным направлением использования выпрямительных преобразователей являются системы, в которых первичным источником электроэнергии является генератор переменного напряжения со сверхпроводниковыми обмотками. Явление сверхпроводимости определённых материалов основано на равенстве нулю электрического сопротивления в условиях, когда температура и мгновенные значения плотности тока и магнитной индукции ниже их критических значений.

В свою очередь преобразователи, осуществляющие выпрямление, по отношению к сети являются нелинейной нагрузкой и в значительной степени искажают форму потребляемых фазных токов. Это приводит как к ухудшению гармонического состава потребляемого фазного тока из сети, так и к увеличению действующего значения потребляемых фазных токов и, следовательно, к повышению массы и габаритов подводящих проводов, обмоток трансформаторов и электрических генераторов.

Особенно остро проблема искажения формы потребляемых фазных токов касается электромеханических генераторов переменного напряжения с

применением сверхпроводниковых обмоток, состояние которых зависит от мгновенного значения плотности тока.

В связи с этим для обеспечения квазисинусоидального потребления фазных токов применяют трехфазные преобразователи переменного тока в постоянный повышающего типа (в дальнейшем именуемые трехфазные АС/DC преобразователи повышающего типа).

Такие преобразователи позволяют:

- формировать выходное напряжение постоянного тока на заданном стабильном уровне при широком изменении входного фазного напряжения по действующему значению и частоте;

- исключить «переразмеривание» и повысить КПД системы генерирования за счет практически синусоидального тока потребления с коэффициентом мощности, близким к единице;

- реализовать простую параллельную работу с другими промежуточными звеньями системы электроснабжения и «горячее резервирование» благодаря возможности контроля уровня выходного тока;

- обеспечить высокое быстродействие благодаря возможностям полупроводниковой техники и микропроцессорного управления, тем самым существенно снизить всплески и провалы выходного напряжения при работе системы электроснабжения на импульсную и динамическую нагрузки;

- постоянно улучшать массогабаритные показатели системы электроснабжения за счет потенциальных возможностей усовершенствования силовых полупроводниковых приборов и микропроцессорной техники.

В последнем случае, например, внедрение перспективных карбид кремниевых (SiC) транзисторов, которые имеют на порядок низкие динамические потери по сравнению с существующими IGBT приборами и диодами, в ближайшее будущее даст возможность существенно повысить частоту коммутации при одновременном снижении потерь в полупроводниковых приборах и соответственно снизить массу и габариты рассматриваемого класса преобразователей.

В настоящее время данной области электротехнических комплексов посвящены многие научно-исследовательские работы и разработки таких известных отечественных и зарубежных ученых, как Г. С. Зиновьев, В. И. Мелешин, Е. Е. Чаплыгин, П. А. Бачурин, И. А. Харченко, Д. В. Коробов, А. В. Левин, С. А. Харитонов, С. Б. Резников, Б. Ф. Дмитриев, С. Я. Галушин, В. В. Бочаров, Д. Е. Кондратьев, А. Е. Волков, И. Ю. Краснов, В. Р. Черемисин, Д. А. Шевцов, Tu A Rong Jie, J. W. Kolar, U. Drogenik, I. Moir, F. C. Zach, T. Friedli и другие.

Тем не менее вопросы повышения коэффициента полезного действия трехфазных АС/DC преобразователей повышающего типа, а также пересмотр существующих схемотехнических решений и синтез энергоэффективных силовых схем с учетом развития элементной полупроводниковой базы и микропроцессорной техники как в области летательных аппаратов, так и в области наземных альтернативных или автономных электротехнических

комплексов, всегда будут актуальными и востребованными, а их практическая реализация будет иметь народно-хозяйственное значение.

Целью диссертационной работы является разработка трехфазного преобразователя переменного напряжения в постоянное напряжение повышающего типа, имеющего пониженные потери мощности и функционирующего в электротехнических комплексах с высокими требованиями к качеству потребляемых токов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- выполнен анализ существующих схмотехнических решений трёхфазных AC/DC преобразователей повышающего типа с определением классифицирующих признаков и критериев сравнения;

- произведен синтез силовой схемы и системы управления трёхфазного AC/DC преобразователя повышающего типа с повышенным коэффициентом полезного действия, которая способна обеспечить синусоидальную форму потребляемого фазного тока, независимо от других фаз тока, и стабилизацию выходного напряжения при коэффициенте мощности близком к единице;

- разработана математическая модель силовой схемы и системы управления предлагаемого трёхфазного AC/DC преобразователя повышающего типа для исследования рабочих электрических процессов и проектирования рассматриваемого устройства;

- определены расчетные выражения для вычисления параметров реактивных элементов разработанного трехфазного AC/DC преобразователя, потерь в полупроводниковых приборах и коэффициентов усилителей ошибок, учитывающих особенности рабочих процессов устройства;

- разработана компьютерная имитационная модель предложенной силовой схемы в комплексе с системой управления трёхфазного AC/DC преобразователя повышающего типа для исследования рабочих электрических процессов и проектирования устройства;

- выполнен анализ рабочих электрических процессов в разработанной силовой схеме AC/DC преобразователя повышающего типа с использованием предложенной компьютерной имитационной модели и системы управления;

- проведена экспериментальная проверка на макетном образце основных теоретических положений, результатов компьютерного моделирования и работоспособности разработанной силовой схемы трёхфазного AC/DC преобразователя повышающего типа.

Методы исследования. При решении поставленных в диссертационной работе задач были использованы методы теории электрических линейных и нелинейных цепей, методы математического анализа, теория дифференциальных уравнений, методы теории оптимизации, современные программные продукты компьютерного моделирования и экспериментальные методы исследования.

При создании математической модели и расчете параметров трехфазного AC/DC преобразователя повышающего типа был применен математический

пакет MathCAD. Имитационное компьютерное моделирование предложенной силовой схемы в комплексе с системой управления трёхфазного AC/DC преобразователя повышающего типа было проведено в среде имитационного моделирования Matlab – Simulink с использованием библиотек физического моделирования SimScape SimPowerSystems.

При проектировании макетного образца разработанной силовой схемы трёхфазного AC/DC преобразователя была применена система трехмерного твердотельного компьютерного моделирования Autodesk Inventor.

Научная новизна. При решении задач, поставленных в диссертационной работе, были получены следующие новые научные результаты:

1 Предложен новый способ исследования схмотехнических решений трехфазных AC/DC преобразователей повышающего типа посредством учета особенностей принципа действия и выработанных допущений, практическое применение которого существенно снижает необходимое количество исследуемых схем замещения и соответственно сокращает время на проведение сопоставительного анализа рассматриваемых устройств.

2 Выработаны и обоснованы классификационные признаки и критерии сравнения силовых схем трехфазных AC/DC преобразователей повышающего типа, которые позволили синтезировать новое схмотехническое решение с повышенным коэффициентом полезного действия.

3 Разработаны оригинальные математические модели предложенных силовой схемы и системы управления трехфазного AC/DC преобразователя повышающего типа, обеспечивающие эффективное исследование рабочих электрических процессов и проектирование рассматриваемого устройства.

4 Предложены на базе ограничения среднего геометрического значения максимальных величин переключающих функций критерии выбора и выведены формулы для поиска коэффициентов усилителей ошибки системы управления, при которых коэффициент гармонических составляющих потребляемого фазного тока принимает минимальное значение при заданном коэффициенте мощности разработанного трехфазного AC/DC преобразователя.

5 Выявлены критерии выбора и выведены формулы для определения параметров реактивных элементов (входных реакторов и выходных конденсаторов) предложенной силовой схемы трехфазного AC/DC преобразователя повышающего типа на базе ограничения размаха пульсаций и амплитуды третьей гармонической составляющей потребляемого фазного тока.

6 Предложен способ расчета статических и динамических потерь в полупроводниковых приборах рассматриваемого преобразователя посредством перехода от переключающих функций к непрерывным усредненным с применением огибающих потребляемых фазных токов.

7 Получены оригинальные аналитические выражения для расчета статических и динамических потерь в полупроводниковых приборах предложенной силовой схеме трехфазного AC/DC преобразователя.

Практическая значимость работы:

1 Разработанное новое схемотехническое решение трёхфазного АС/DC преобразователя повышающего типа улучшает энергоэффективность устройства за счет снижения потерь мощности в полупроводниковых приборах на 7...11 % по сравнению с известными аналогами. Приоритет предложенной силовой схемы защищен патентом №192844 от 18.07.2018.

2 Предложенная система управления трехфазного АС/DC преобразователя повышающего типа на базе оригинального расчета установленной активной мощности обеспечивает форму входных фазных токов близкую к синусоидальной форме соответствующих входных фазных напряжений, при которой величина реактивной мощности, потребляемой из сети, стремится к нулю.

3 Разработанная оригинальная компьютерная имитационная модель предложенной силовой схемы с системой управления позволяет проводить весь комплекс исследований электрических процессов трехфазного АС/DC преобразователя повышающего типа, определять параметры реактивных элементов и полупроводниковых приборов.

4 Предложенный алгоритм определения коэффициентов усилителей ошибки системы управления разработанного трехфазного АС/DC преобразователя повышающего типа обеспечивает в 2...2,5 раза снижение времени поиска требуемых значений с точностью до 10 %, что приемлемо при проведении инженерных расчетов.

5 Выявленные граничные значения параметров реактивных элементов (входных реакторов и выходных конденсаторов) предложенной силовой схемы трехфазного АС/DC преобразователя повышающего типа позволяют на практике учитывать ограничения размаха пульсаций и амплитуды третьей гармонической составляющей входного фазного тока.

6 Полученные оригинальные аналитические выражения для расчета статических и динамических потерь в полупроводниковых приборах разработанного трехфазного АС/DC преобразователя обеспечивают возможность проведения теплового расчета реального устройства.

7 Разработанный алгоритм расчета рассматриваемого трехфазного АС/DC преобразователя повышающего типа позволяет в комплексе определить как параметры реактивных элементов и полупроводниковых приборов предложенной силовой схемы, так и коэффициенты усилителей ошибки разработанной системы управления.

Следует отметить, что разработанные силовая схема и система управления трехфазного АС/DC преобразователя повышающего типа в комплексе с полученными результатами диссертационной работы могут быть эффективно использованы при создании перспективных бортовых электротехнических комплексов систем электроснабжения летательных аппаратов с магистральным двухполярным напряжением 270 В, а также при проектировании автономных электростанций с дизельными или газотурбинными установками, функционирующими в энергоэффективном режиме работы. Другой областью применения полученных результатов

являются испытательные стенды с рекуператорами мощности, которые осуществляют возврат в трехфазную сеть электрической энергии, генерируемой испытуемым устройством, например, синхронным или асинхронным генератором, или статическим преобразователем, синтезирующим выходное трехфазное напряжение.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы были использованы при разработке рекуператора мощности РМ90 УХЛ4 ТКРМ90.000.000.00, предназначенного для проведения приемо-сдаточных, предварительных, приёмочных и других видов испытаний преобразователей собственных нужд электровазов, пассажирских вагонов и электропоездов постоянного и переменного тока, что подтверждено Актом №503/20 о практическом использовании от 05.03.2020 г. (приложение А).

Теоретические положения диссертационной работы в части исследования электрических процессов, проектирования компьютерных имитационных моделей и расчета статических и динамических потерь силовых полупроводниковых приборов были внедрены в учебный процесс в соответствии с учебно-методическими планами кафедры 310 «Энергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ, что подтверждено Актом №1/5 внедрения в учебный процесс Московского Авиационного института от 15.05.2020.

Апробация работы. Положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XLIV Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения – 2018» (МАИ, г. Москва, 2018 г.), на международной конференции Smart Energy Systems 2019 (КЭИ, г. Казань, 2019 г.), 18-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика» (МАИ, г. Москва, 2019 г.), международной конференции Power Conversion and Intelligent Motion and Power Quality (г. Нюрнберг, 2019 г.), XLVI Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» (МАИ, г. Москва, 2020 г.), Всероссийской научной конференции «XVII Научные чтения по авиации посвященных памяти Н.Е. Жуковского» (МГТУ ГА, г. Москва, 2020 г.), международной конференции Power Conversion and Intelligent Motion and Power Quality (г. Нюрнберг, 2020 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 15 научных работ, среди них 5 – в изданиях, рекомендуемых Высшей Аттестационной Комиссией РФ и 4 - в изданиях, индексируемых в базах Scopus, а также получен 1 патент РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемых источников и приложения. Основная часть работы содержит 174 машинописных страниц, в том числе 60 рисунков и 24 таблицы. Список используемых источников включает 67 наименований. Общий объем работы – 176 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбора темы диссертационной работы, проведен анализ литературы, определена научная новизна и практическая ценность, а также дана общая характеристика работы.

В первой главе проведен сопоставительный анализ существующих схемотехнических решений трехфазных AC/DC преобразователей повышающего типа. Для повышения эффективности анализа использован оригинальный способ исследования силовых схем, основанный на применении схем замещения и учитывающий особенности принципа действия рассматриваемого класса преобразователей.

Выбраны следующие критерии сравнения силовых схем:

- количество полупроводниковых приборов и реактивных элементов, включая силовые реакторы и конденсаторы;
- максимальное количество полупроводниковых приборов, через которые одновременно может протекать силовой ток;
- максимальное напряжение, прикладываемое к разомкнутому управляемому и неуправляемому полупроводниковому прибору;
- возможность независимого управления процессом нарастания и спада входного фазного тока.

В результате сопоставительного анализа возможных силовых схем, который приведен в таблице 1, выделены классифицирующие признаки трехфазных AC/DC преобразователей, которые позволяют систематизировать и проводить синтез схемотехнических решений данного класса устройств, где «3-/-» и «4-/-» – схемы с трёх- и четырёхпроводным подключением; «L~» и «L=» – схемы с расположением реактора на стороне переменного и постоянного тока; «VT=» – схемы с применением ключей постоянного тока; «S~Y» и «S~ Δ» – схемы с применением ключей переменного тока, соединённых звездой и треугольником; «NY», «NC-C» и «NVT-VT» – схемы с подключением нейтрального провода в звезду, образованную ключами переменного тока, в среднюю точку емкостного делителя напряжения и в среднюю точку дополнительного полумоста соответственно.

Во второй главе приведено описание функционирования синтезированной схемы AC/DC преобразователя (рисунок 1). Разработанная силовая схема обладает повышенным коэффициентом полезного действия по отношению к прототипу за счет расположения выпрямительных диодов VD1...VD6 последовательно с транзисторами VT1...VT6. Кроме того, благодаря расположению реакторов L1...L6 на стороне постоянного тока следует существование контуров протекания токов данных элементов при внезапном отключении источника питания.

Таблица 1

№ критерия Силовая схема	I				II	III		IV
	L	VT	VD	C		VD	VT	
4-/- L~ S~Y NY	3	6	12	1	VD – 3, VT – 1	U_R	U_R	Возможно
3-/- L~ S~Δ	3	6	12	1	VD – 1, VT – 1;	U_R	U_R	Невозможно
					VD – 2			
3-/- L~ S~Y NYC-C	3	6	12	2	VD – 2, VT – 1;	U_R	$U_R/2$	Невозможно
4-/- L~ S~Y NYC-C	3	6	12	2	VD – 1, VT – 1	U_R	$U_R/2$	Возможно
4-/- L~ VT= NYC-C	3	6	18	2	VD – 1, VT – 1	$U_R/2$	$U_R/2$	Возможно
					VD – 2			
4-/- L= VT= NYC-C	6	6	18	2	VD – 1, VT – 1	$U_R/2$	$U_R/2$	Возможно
					VD – 2			
3-/- L~ VT=	3	6	6	1	VD – 1, VT – 1	U_R	U_R	Невозможно
					VD – 2			
4-/- L~ VT= NC-C	3	6	6	2	VD – 1, VT – 1	U_R	U_R	Невозможно
4-/- L~ VT= NVT-VT	3	8	8	1	VD – 1, VT – 1	U_R	U_R	Возможно
					VD – 2			

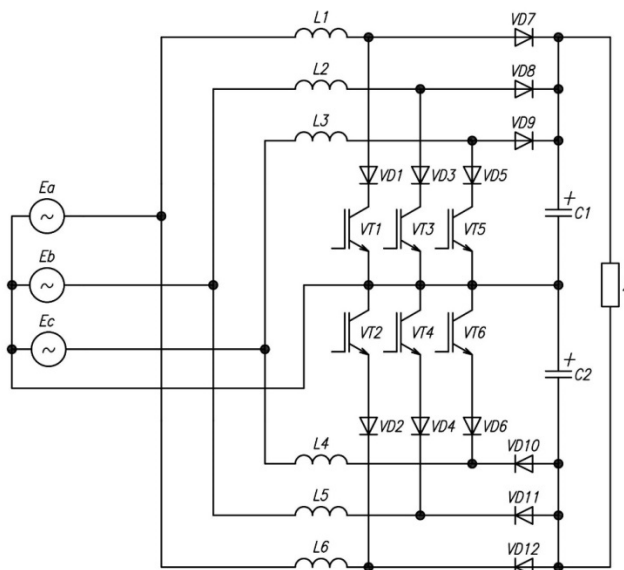


Рисунок 1 – Силовая схема синтезированного преобразователя

Математическая модель силовой части схемы представляет собой пять дифференциальных уравнений, которые содержат переключающие функции транзисторов VT1...VT6 и может быть решена известными методами в существующем программном обеспечении (например, MathCAD, Matlab, Maple):

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di_a}{dt} + R_L i_a + \frac{u_{DC}}{2} (\overline{d_{VT1}} + \overline{d_{VT2}}) + \frac{\Delta u_{DC}}{2} (\overline{d_{VT1}} - \overline{d_{VT2}}) = u_a \\ L \frac{di_b}{dt} + R_L i_b + \frac{u_{DC}}{2} (\overline{d_{VT3}} + \overline{d_{VT4}}) + \frac{\Delta u_{DC}}{2} (\overline{d_{VT3}} - \overline{d_{VT4}}) = u_b \\ L \frac{di_c}{dt} + R_L i_c + \frac{u_{DC}}{2} (\overline{d_{VT5}} + \overline{d_{VT6}}) + \frac{\Delta u_{DC}}{2} (\overline{d_{VT5}} - \overline{d_{VT6}}) = u_c \\ i_a (\overline{d_{VT1}} + \overline{d_{VT2}}) + i_b (\overline{d_{VT3}} + \overline{d_{VT4}}) + i_c (\overline{d_{VT5}} + \overline{d_{VT6}}) - C \frac{du_{DC}}{dt} - 2 \frac{u_{DC}}{R} = 0 \\ i_a (\overline{d_{VT1}} - \overline{d_{VT2}}) + i_b (\overline{d_{VT3}} - \overline{d_{VT4}}) + i_c (\overline{d_{VT5}} - \overline{d_{VT6}}) + (i_a + i_b + i_c) - C \frac{d\Delta u_{DC}}{dt} = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

где i_a, i_b, i_c – фазные токи; u_a, u_b, u_c – фазные напряжения; u_{DC} – сумма напряжений на выходных конденсаторах; Δu_{DC} – разность напряжений на выходных конденсаторах; L – индуктивность реакторов; R_L – сопротивление обмоток реакторов; C – ёмкость выходных конденсаторов; $\overline{d_{VT1}} \dots \overline{d_{VT6}}$ – переключающие функции транзисторов.

Выполнено сравнение существующих способов управления АС/DC преобразователей повышающего типа и обоснован выбор прямого управления мощностью с применением d-q преобразования.

Сделано прямое преобразование Парка-Горева математической модели синтезированного преобразователя и произведен переход от проекций изображающего вектора фазных токов i_d, i_q, i_0 к мощностям – активной p , реактивной q и мощности z , обусловленной протеканием тока в нейтральном проводе:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{2}{3} L \frac{dp}{dt} + \frac{2}{3} R_L p + \frac{2}{3} L \omega q + \frac{u_d u_{DC}}{2} (\overline{d_{d+}} + \overline{d_{d-}}) + \frac{u_d \Delta u_{DC}}{2} (\overline{d_{d+}} - \overline{d_{d-}}) = u_d^2 \\ \frac{2}{3} L \frac{dq}{dt} + \frac{2}{3} R_L q - \frac{2}{3} L \omega p + \frac{u_d u_{DC}}{2} (\overline{d_{q+}} + \overline{d_{q-}}) + \frac{u_d \Delta u_{DC}}{2} (\overline{d_{q+}} - \overline{d_{q-}}) = u_d u_q \\ \frac{2}{3} L \frac{dz}{dt} + \frac{2}{3} R_L z + \frac{u_d u_{DC}}{2} (\overline{d_{0+}} + \overline{d_{0-}}) + \frac{u_d \Delta u_{DC}}{2} (\overline{d_{0+}} - \overline{d_{0-}}) = u_d u_0 \\ p (\overline{d_{d+}} + \overline{d_{d-}}) + q (\overline{d_{q+}} + \overline{d_{q-}}) + 2z (\overline{d_{0+}} + \overline{d_{0-}}) = C u_d \frac{du_{DC}}{dt} + 2 u_d \frac{u_{DC}}{R} \\ p (\overline{d_{d+}} - \overline{d_{d-}}) + q (\overline{d_{q+}} - \overline{d_{q-}}) + 2z (\overline{d_{0+}} - \overline{d_{0-}}) - 2z = C u_d \frac{d\Delta u_{DC}}{dt} \end{array} \right. \quad (2)$$

Затем математическая модель (2) преобразована в матричный вид:

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{J} \mathbf{x} + \mathbf{R} \mathbf{x} = \mathbf{u}, \quad (3)$$

где \mathbf{x} – вектор переменных состояния; \mathbf{u} – вектор свободных членов; \mathbf{M} – матрица коэффициентов при первых производных переменных состояния; \mathbf{J} – матрица реактивных сопротивлений и переключающих функций; \mathbf{R} – матрица активных сопротивлений.

Посредством анализа установившегося режима преобразователя установлена однозначная связь между выходным напряжением преобразователя и потребляемой из сети активной мощностью при условии минимизации потребления реактивной мощности:

$$p^* = \frac{3 u_d^2}{4 R_L} - \sqrt{\left(\frac{3 u_d^2}{4 R_L} \right)^2 - \frac{3 u_d^2 u_{DC}^{*2}}{2 R_L R}} \quad (4)$$

где u_{DC}^* – установленное выходное напряжение, p^* – установленная активная мощность, u_d – проекция изображающего вектора фазных напряжений на ось d , R – сопротивление нагрузки преобразователя.

В результате применения данного выражения уменьшено количество отрицательных обратных связей, требующихся для стабилизации выходного напряжения, обеспечения единичного коэффициента мощности и балансировки напряжений на силовых выходных конденсаторах.

Посредством ввода в матричное уравнение (3) вектора рассогласования $\sigma = (R + R_a)(x - x^*)$, где $R_a = (r_{a1} \ r_{a2} \ r_{a3} \ r_{a4} \ r_{a5})^{diag}$ – матрица коэффициентов усилителей ошибки, и с учётом того, что вблизи точки устойчивого равновесия $M\dot{x} \rightarrow 0$, получены аналитические выражения для переключающих функций в dq0-координатах.

$$\begin{cases} \bar{d}_d = \frac{2}{u_d u_{DC}} \left(u_d^2 + r_{a1}(p - p^*) - \frac{2}{3} R_L p^* - \frac{2}{3} L \omega q \right) \\ \bar{d}_q = \frac{2}{u_d u_{DC}} \left(u_d u_q + r_{a2} q + \frac{2}{3} L \omega p \right) \\ \bar{d}_0 = \frac{2}{u_d u_{DC}} (u_d u_0 + r_{a3} z) \end{cases} \quad (5)$$

Обратное преобразование Парка-Горева выражений (5) определяет переключающие функции $\bar{d}_a, \bar{d}_b, \bar{d}_c$. Посредством их сравнения с функциями треугольного вида $f_{triag+}(t)$ с областью определения $[0;1]$ и $f_{triag-}(t)$ $[-1;0]$ формируются широтно-модулированные последовательности импульсов для управления транзисторами VT1...VT6:

$$d_{VT1} = \begin{cases} 0, & \bar{d}_a > f_{triag+}(t) \\ 1, & \bar{d}_a < f_{triag+}(t) \end{cases} \quad (6)$$

$$d_{VT2} = \begin{cases} 0, & \bar{d}_a > f_{triag-}(t) \\ 1, & \bar{d}_a < f_{triag-}(t) \end{cases} \quad (7)$$

$$d_{VT3} = \begin{cases} 0, & \bar{d}_b > f_{triag+}(t) \\ 1, & \bar{d}_b < f_{triag+}(t) \end{cases} \quad (8)$$

$$d_{VT4} = \begin{cases} 0, & \bar{d}_b > f_{triag-}(t) \\ 1, & \bar{d}_b < f_{triag-}(t) \end{cases} \quad (9)$$

$$d_{VT5} = \begin{cases} 0, & \bar{d}_c > f_{triag+}(t) \\ 1, & \bar{d}_c < f_{triag+}(t) \end{cases} \quad (10)$$

$$d_{VT6} = \begin{cases} 0, & \bar{d}_c > f_{triag-}(t) \\ 1, & \bar{d}_c < f_{triag-}(t) \end{cases} \quad (11)$$

В выражениях (6)...(11) «0» и «1» соответствуют замкнутому и разомкнутому состоянию транзисторов VT1...VT6.

В результате созданы математические модели трехфазного AC/DC преобразователя повышающего типа и его системы управления, которые позволяют проводить исследование и анализ электрических процессов, и разработана блок-схема системы управления устройства (рисунок 2).

В третьей главе получены выражения для определения требуемой индуктивности реакторов, требуемой ёмкости выходных конденсаторов, а также для расчета потерь мощности в полупроводниковых приборах.

С целью проведения анализа рабочих процессов произведена замена импульсных переключающих функций на усреднённые переключающие функции. Данный переход проиллюстрирован на рисунке 3, из которого видно, что при усреднении d_{VT1} при достаточно большой частоте коммутации транзисторов, усреднённую переключающую функцию $d_{VT1}(t)$ можно считать гладкой и всюду дифференцируемой функцией.

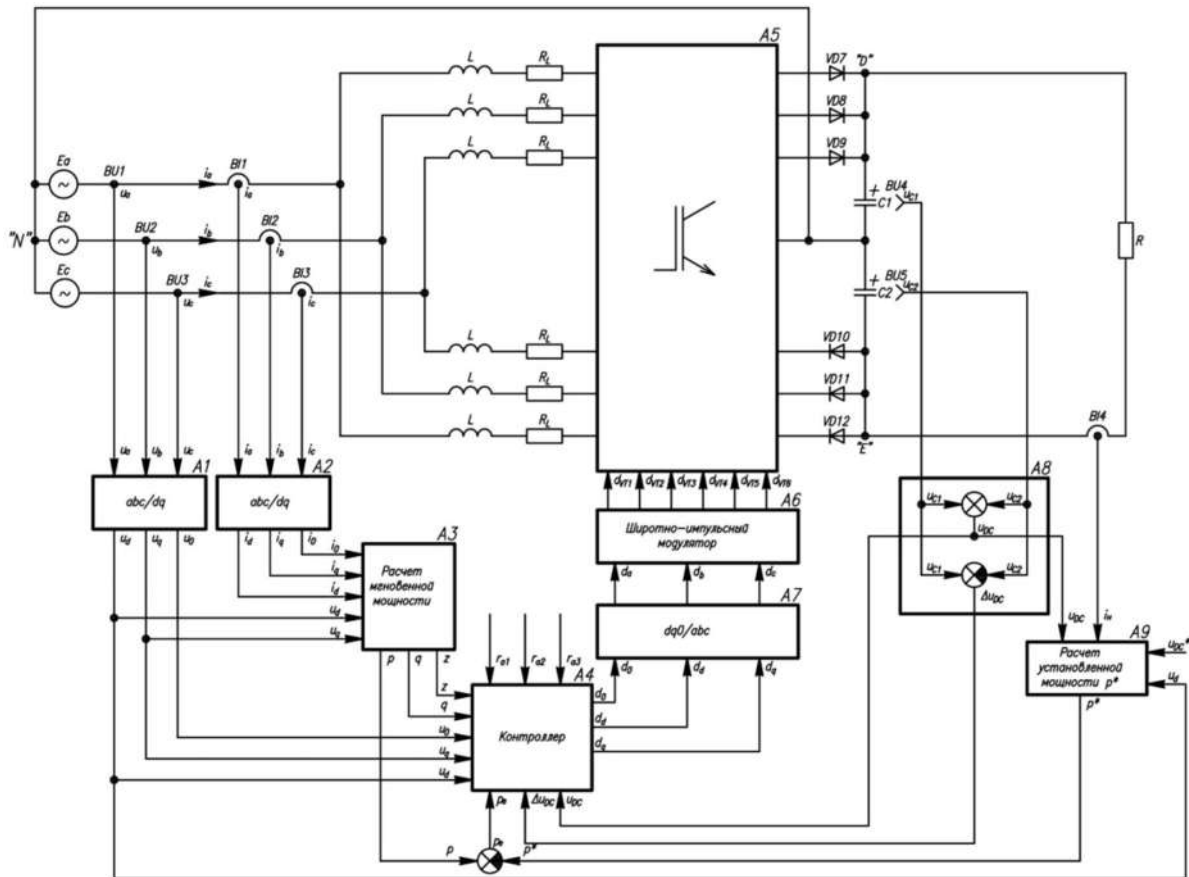


Рисунок 2 - Блок схема системы управления синтезированного преобразователя

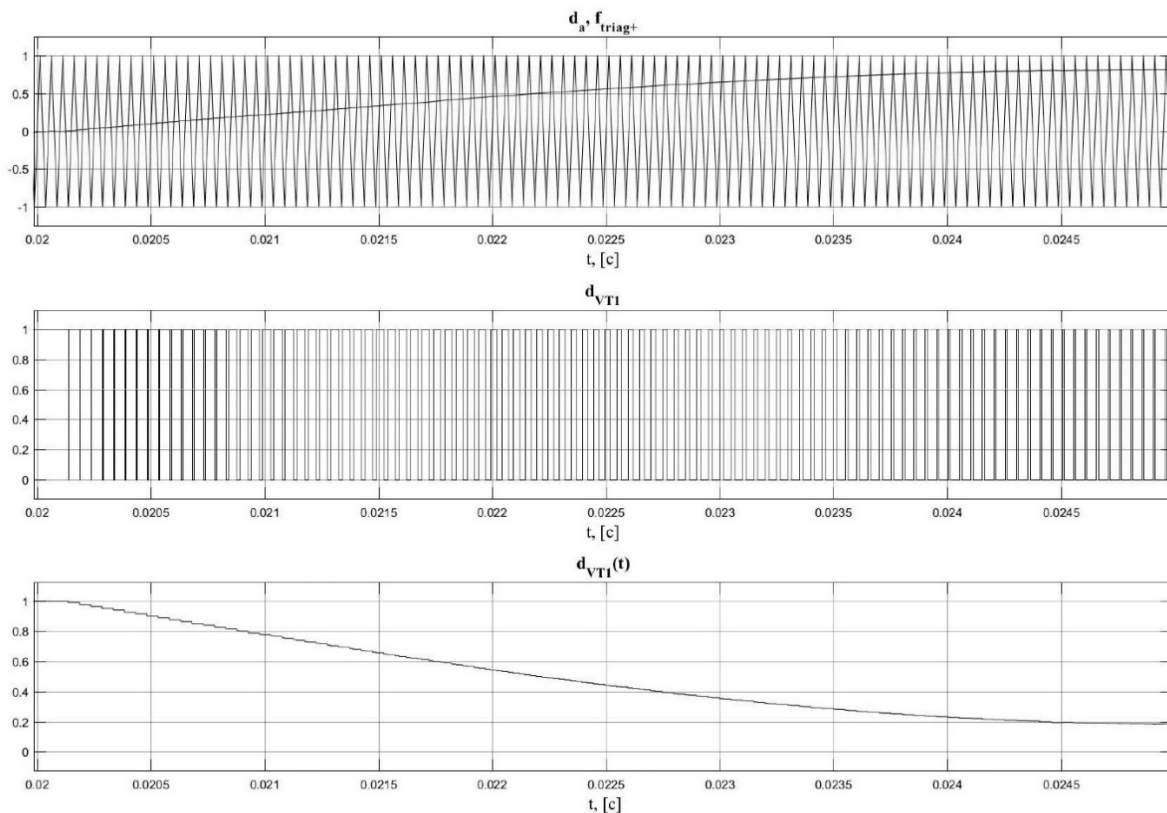


Рисунок 3 – Переключающая функция d_a , функция треугольной формы $f_{triag+}(t)$, импульсная переключающая функция d_{VT1} и усреднённая переключающая функция $d_{VT1}(t)$

В результате анализа рабочих электрических процессов разработанного AC/DC преобразователя повышающего типа получена функция огибающей размаха пульсации фазного тока (рисунок 4) и найден максимум размаха пульсации. Ограничение максимума размаха пульсации относительно амплитуды фазного тока легло в основу выражения для расчета требуемой индуктивности фазного тока:

$$L_{\min} = \frac{3\sqrt{2} U_{\text{DC}} U_{\phi.\min} \eta}{16 k_1 f_{VT} P_{\text{ВЫХ}}} \quad (12)$$

где $U_{\phi.\min}$ – минимальное фазное напряжение; η – коэффициент полезного действия преобразователя; k_1 коэффициент, учитывающий долю от наибольшей амплитуды тока низкочастотной составляющей фазного тока; f_{VT} – частота коммутации силовых транзисторов; $P_{\text{ВЫХ}}$ – выходная мощность преобразователя.

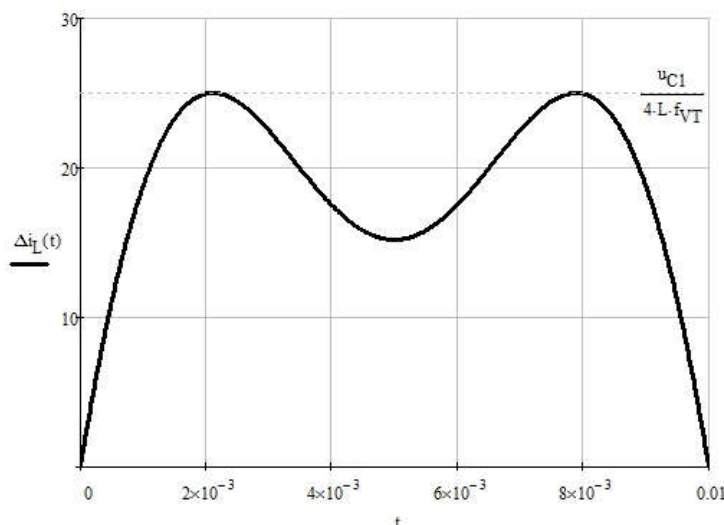


Рисунок 4 – Размах пульсации фазного тока (на полупериоде)

Анализ рабочих электрических процессов выявил наличие в напряжении выходных конденсаторах низкочастотной пульсации напряжения утроенной сетевой частоты. При этом пульсации напряжения на выходных конденсаторах существуют в противофазе, благодаря чему выходное напряжение не содержит низкочастотной пульсации (рисунок 5).

Предложены два критерия для определения требуемой ёмкости выходных конденсаторов $C1$ и $C2$ преобразователя. При первом критерии емкость выходных конденсаторов выбирается исходя из ограничения размаха пульсации низкочастотной составляющей напряжения на выходных конденсаторах в соответствии с выражением:

$$C = \frac{3\sqrt{2} T P_{\text{ВЫХ}}}{12 \pi^2 U_{\text{DC}}^2 k_2 \eta} \quad (13)$$

где k_2 – заданная доля размаха пульсации напряжения выходного конденсатора от номинального значения выходного напряжения.

При втором критерии емкость конденсаторов выбирается такой, чтобы амплитуда третьей гармонической составляющей не превышала нормируемого значения в соответствии с выражением:

$$C \geq \frac{\sqrt{2} P}{96 \pi^3 f c^2 L u_{\text{DC}} I_{3.\text{норм}} k_{6.3}} \quad (14)$$

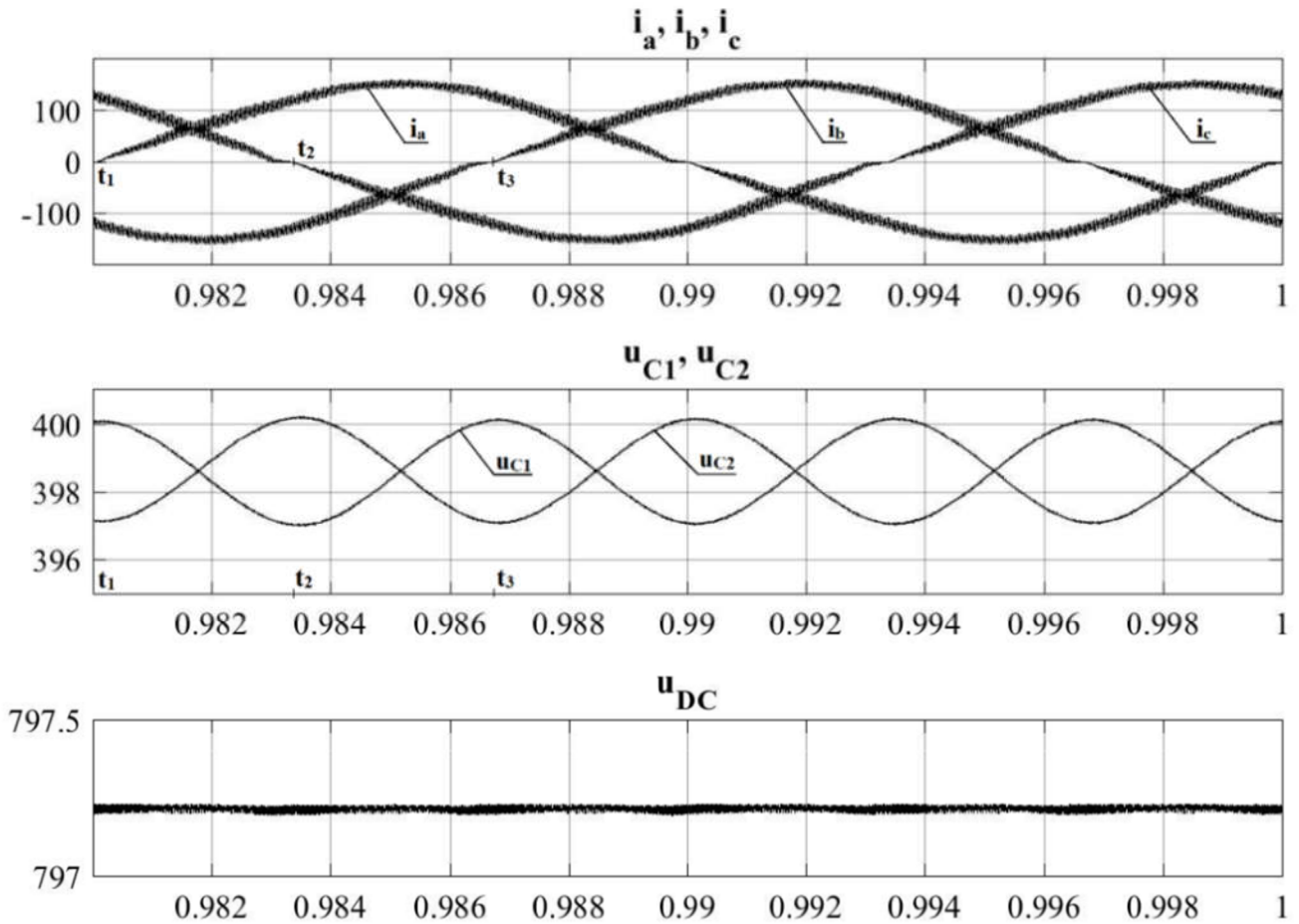


Рисунок 5 – Осциллограммы фазных токов i_a , i_b , i_c , напряжения на выходных конденсаторах u_{C1} и u_{C2} и выходного напряжения u_{DC}

где $k_{6.3}$ – коэффициент запаса по нормируемому значению $I_{3.норм}$.

Статические потери мощности в VD1...VD6, VD7...VD12 и VT1...VT6 определены с использованием линейной аппроксимации вольт-амперных характеристик:

$$P_{ст.VD1} = \frac{4}{9} \left(\frac{P_{ВЫХ}}{U_a \eta} \right)^2 r_{T.VD1} \left(\frac{1}{4} - \frac{4}{3\pi} \frac{U_a}{U_{C1}} + \frac{3}{16} \left(\frac{U_a}{U_{C1}} \right)^2 \right) + \frac{\sqrt{2} P_{ВЫХ}}{3 U_a \eta} V_{T0.VD1} \left(\frac{1}{\pi} - \frac{U_a}{4U_{C1}} \right), \quad (15)$$

$$P_{ст.VD7} = \frac{P_{ВЫХ}^2 r_{T.VD7}}{24 U_{C1}^2 \eta^2} + \frac{P_{ВЫХ} V_{T0.VD7}}{6 U_{C1} \eta}, \quad (16)$$

$$P_{ст.VT1} = \frac{4}{9} \left(\frac{P_{ВЫХ}}{U_a \eta} \right)^2 r_{T.VT1} \left(\frac{1}{4} - \frac{4}{3\pi} \frac{U_a}{U_{C1}} + \frac{3}{16} \left(\frac{U_a}{U_{C1}} \right)^2 \right) + \frac{\sqrt{2} P_{ВЫХ}}{3 U_a \eta} V_{T0.VT1} \left(\frac{1}{\pi} - \frac{U_a}{4U_{C1}} \right), \quad (17)$$

где $r_{T.VD1}$ сопротивление диода VD1 в открытом состоянии; $V_{T0.VD1}$ – условное пороговое напряжение диода VD1; $r_{T.VD7}$ сопротивление диода VD7 в открытом состоянии; $V_{T0.VD7}$ – условное пороговое напряжение диода VD7; $r_{T.VT1}$ сопротивление транзистора VT1 в открытом состоянии; $V_{T0.VT1}$ – условное пороговое напряжение транзистора VT1.

Динамические потери мощности определены с учётом реальной формы фазного тока и моментов переключения полупроводниковых приборов VT1...VT6 и VD7...VD12 с последующим переходом от суммы к интегрированию:

$$P_{\text{дин.VT1}} = \frac{U_{C1}}{V_{DD}} f_{VT} \left[\frac{2}{3\pi} \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{U_a \eta} (k_{\text{он.VT1}} + k_{\text{офф.VT1}}) + \frac{U_a}{2L f_{VT}} \left(\frac{U_a}{4U_{C1}} - \frac{1}{\pi} \right) (k_{\text{он.VT1}} - k_{\text{офф.VT1}}) \right] \quad (18)$$

$$P_{rr.VD7} = \frac{U_{C1}}{V_R} f_{VT} k_{rr.VD7} \left[\frac{2}{3\pi} \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{U_a \eta} + \frac{1}{2\pi} \frac{U_a}{U_a L f_{VT}} - \frac{U_a^2}{8U_{C1} L f_{VT}} \right] \quad (19)$$

где $k_{\text{он.VT1}}$ и $k_{\text{офф.VT1}}$ – коэффициенты, определяющий наклон зависимостей энергии потерь на включение и выключения соответственно от тока коллектора вблизи номинального значения тока, протекающего через транзистор; V_{DD} – напряжение, при котором были получены зависимости энергии потерь от тока коллектора транзистора; $k_{rr.VD7}$ – коэффициент, определяющий наклон зависимости энергии на обратное восстановление диода от прямого тока диода; V_R – напряжение, при котором получена зависимость энергии на обратное восстановление от прямого тока диода.

В четвертой главе выполнено компьютерное моделирование трехфазного AC/DC преобразователя повышающего типа.

Разработанная имитационная компьютерная модель в программной среде Matlab-Simulink приведена на рисунке 6. Имитационная компьютерная модель системы управления преобразователем соответствует блок-схеме, приведенной на рисунке 2.

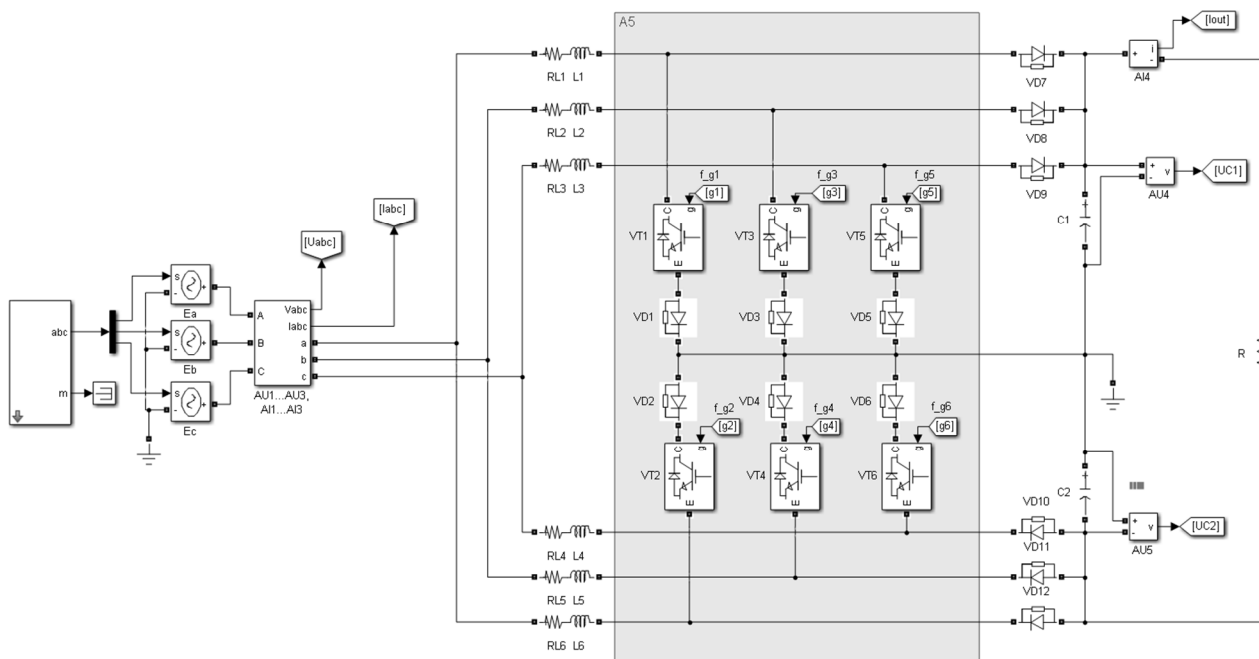


Рисунок 6 - Имитационная компьютерная модель силовой части

Важными параметрами системы управления преобразователя являются коэффициенты усилителей ошибки γ_{a1} , γ_{a2} , γ_{a3} . В четвёртой главе проанализировано влияние величин коэффициентов усилителей ошибки на качество работы преобразователя и сделаны следующие выводы:

– значения тройки коэффициентов γ_{a1} , γ_{a2} , γ_{a3} целесообразно ограничить средним геометрическим максимальных значений переключающих функций в целях обеспечения корректной работы широтно-импульсного модулятора:

$$\sqrt{\bar{d}_d^2 + \bar{d}_q^2 + \bar{d}_0^2} = 1 \quad (20)$$

– с увеличением значения r_{a1} происходит уменьшение суммарного коэффициента гармонических составляющих фазных токов, уменьшение времени переходного процесса при сбросе-набросе нагрузки, а также увеличение коэффициента мощности преобразователя;

– с увеличением значения r_{a2} происходит уменьшение реактивной составляющей потребляемой из сети мощности с одновременным повышением суммарного коэффициента гармонических составляющих;

– при повышении значения r_{a3} происходит уменьшение составляющей мощности, обусловленной током в нейтральном проводе при одновременном увеличении реактивной составляющей потребляемой мощности.

Полученные выражения переключающих функций (5) в dq0 координатах представлены в виде постоянной и переменной составляющих:

$$\begin{cases} \bar{d}_d = f_{d.ош} + f_{d.уст} \\ \bar{d}_q = f_{q.ош} + f_{q.уст} \\ \bar{d}_0 = f_{0.ош} + f_{0.уст} \end{cases} \quad (21)$$

Максимальное значение r_{a1} , которое удовлетворяет условию (20) определяется в соответствии с выражением:

$$r_{a1.max} = \frac{4}{3} L f_{VT} (1 - f_{d.уст}), \quad (22)$$

При фиксированном $r_{a1} < r_{a1.max}$ получена такая зависимость коэффициентов усилителей ошибки r_{a2} , r_{a3} , которая удовлетворяет условию (20):

$$r_{a2} = -f_{q.уст} + \frac{u_d u_{DC}}{2q} \sqrt{1 - \bar{d}_{d.max}^2 - \left(\frac{2}{u_d u_{DC}} r_{a3} z\right)^2} \quad (23)$$

На рисунке 7 представлены графики зависимостей $r_{a3}(r_{a2})$ при фиксированных r_{a1} . Причём максимальные значения коэффициента r_{a2} определяется в соответствии с выражением:

$$r_{a2.max} = \frac{u_d u_{DC}}{2q} \sqrt{1 - \bar{d}_{d.max}^2} - f_{q.уст} \quad (24)$$

Сделано предположение и доказано, что существует такая пара коэффициентов r_{a2} , r_{a3} , при которой значение коэффициента гармонических составляющих фазных токов минимально.

На основе сделанных выводов предложен алгоритм определения коэффициентов усилителей ошибки, который заключается в поиске точки на поверхности $HD40 = f(r_{a2}, r_{a3})$, соответствующей минимальному коэффициенту гармоник вдоль кривой $r_{a2} = f(r_{a3})$ при фиксированном коэффициенте r_{a1} . При этом последовательное приближение к точке минимума коэффициента гармоник обеспечивается сравнением экстремумов, полученных вдоль кривых $r_{a2} = f(r_{a3})$ при различных r_{a1} .

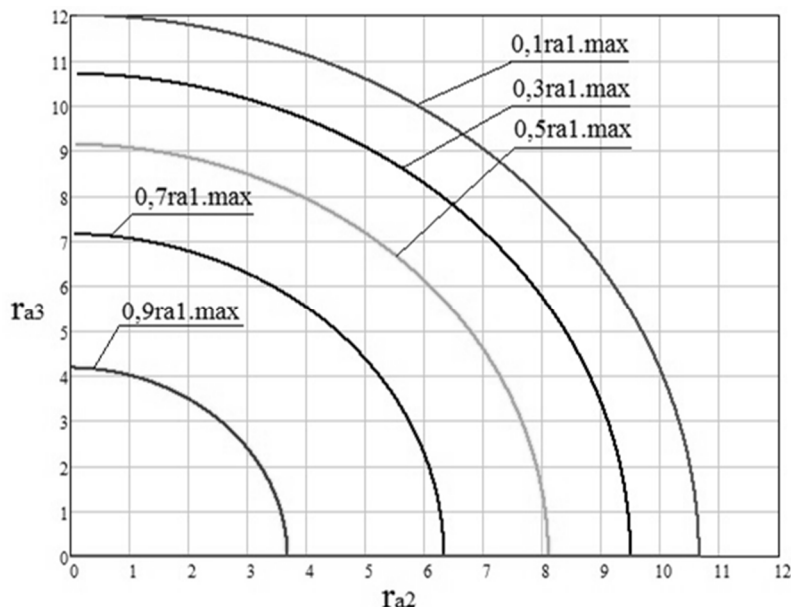


Рисунок 7 – Зависимости коэффициентов усилителей ошибки $r_{a3}(r_{a2})$ при фиксированном r_{a1}

Значения коэффициентов получены с использованием компьютерного моделирования посредством предложенного алгоритма и метода перебора. Сопоставление результатов, полученных двумя методами позволило сделать вывод об адекватности предложенного алгоритма определения коэффициентов усилителей ошибки. При этом данный алгоритм позволил существенно сократить число итераций компьютерного моделирования, что снижает затраты времени на проектирование системы управления преобразователем.

Посредством компьютерного моделирования проведено исследование рабочих электрических процессов в установившемся режиме работы, при сбросе-набросе нагрузки, а также при несимметричных значениях входного напряжения преобразователя. В качестве примера, на рисунке 7 приведены осциллограммы фазных токов i_a , i_b , i_c , и выходного напряжения преобразователя u_{DC} при сбросе нагрузки. При этом изменение выходного напряжения составляет менее 0,2%.

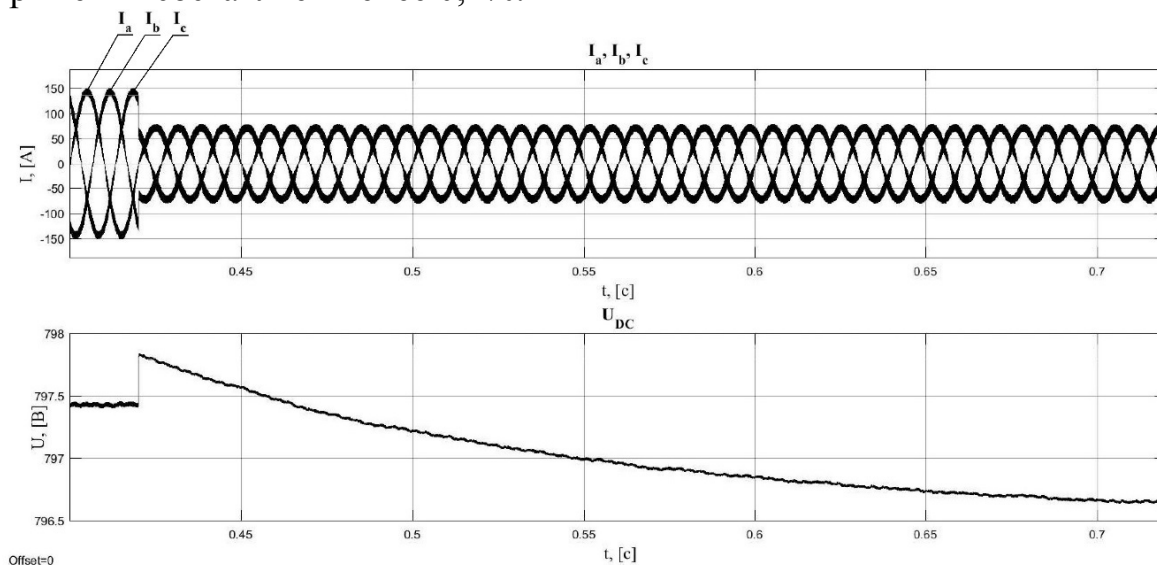


Рисунок 8 - Осциллограммы фазных токов i_a , i_b , i_c , и выходного напряжения преобразователя u_{DC} при сбросе нагрузки.

Проведенные исследования показали, что разработанная имитационная компьютерная модель и предложенный алгоритм расчета коэффициентов усилителей ошибки обеспечивают работоспособность преобразователя и позволяют проводить анализ электрических процессов как в установившихся, так и в переходных режимах работы, включая сброс, наброс нагрузки, режимы с несимметричными входными фазными напряжениями и т.п.

В пятой главе приведены результаты компьютерных и экспериментальных исследований разработанного трехфазного AC/DC преобразователя повышающего типа.

С целью подтверждения достоверности и обоснования правильности полученных теоретических положений, а также разработанных имитационных моделей, был изготовлен макетный образец силовой схемы в комплекте с системой управления. При этом все электрические компоненты силовой схемы и системы управления, кроме входных реакторов $L_1...L_6$ были размещены на модуле ТКР27 (рисунок 8), который преобразовывает трёхфазное напряжение переменного тока 400 В 50 Гц в напряжение постоянного тока 750 В и имеет номинальное значение выходной мощности 70 кВт.

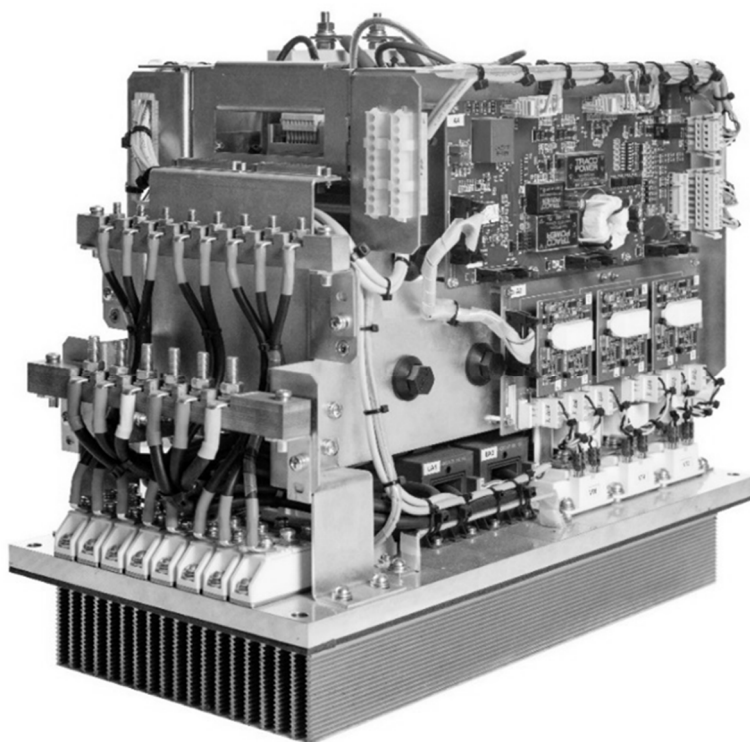


Рисунок 9 - Внешний вид модуля ТКР27

В качестве примера на рисунке 9 приведены осциллограммы входного напряжения (кривая 1) и тока (кривая 2) фазы А, полученные при экспериментальных исследованиях макетного образца при номинальном значении выходной мощности.

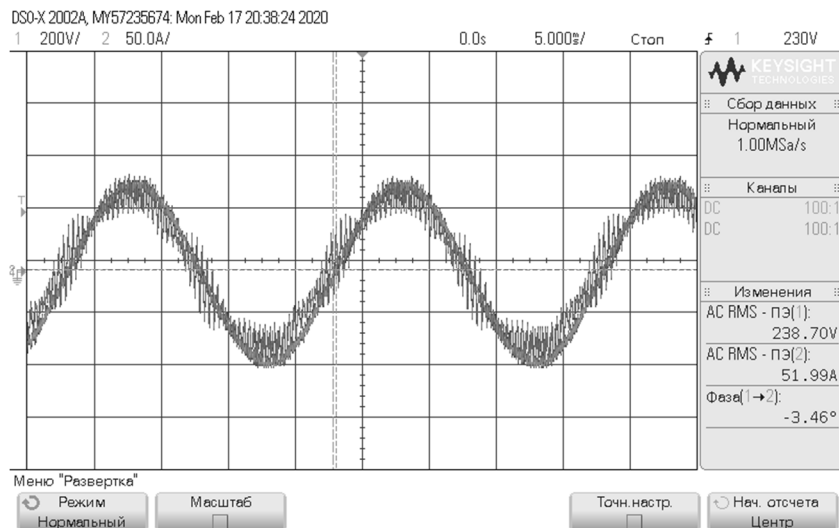


Рисунок 10 - осциллограммы напряжения и тока фазы А

В таблице 2 приведены результаты обработки экспериментальных исследований и компьютерного моделирования, где K_{PF} – коэффициент мощности; K_{HD40} – коэффициент гармонических составляющих; ΔI_{in} – максимальное значение размаха пульсации фазного тока; I_{3in} – значение третьей гармонической составляющей фазного тока.

Таблица 2

Искомые характеристики	K_{PF}	K_{HD40}	ΔI_{in}	I_{3in}
Заданные значения	$> 0,97$	$< 5 \%$	$< 25,3$	$< 5,1 \text{ A}$
Результаты экспериментальных исследований	0,973	2,1 %	21,9 A	4,1 A
Результаты компьютерного моделирования	0,997	1,8 %	24,0 A	4,5 A

На рисунке 10 представлены зависимости суммарных потерь мощности от текущей мощности преобразователя. Кривые 1 и 2 соответствуют суммарным потерям мощности силовой схемы разработанного AC/DC преобразователя, полученным в ходе экспериментальных исследований макетного образца и компьютерного моделирования, кривая 3 соответствует суммарным потерям мощности прототипа силовой схемы.

Экспериментальные исследования в комплексе с компьютерным моделированием подтвердили достоверность полученных теоретических положений диссертационной работы, работоспособность разработанной силовой схемы в комплексе с системой управления трехфазного AC/DC преобразователя и эффективность предложенного принципа регулирования посредством вычисления расчетной установочной активной мощности. При этом выявленные расхождения между расчетными, компьютерными и экспериментальными результатами составляют не более 13%, что приемлемо для проведения исследований электрических процессов и проектирования таких сложных электротехнических устройств, каким является разработанный трехфазный AC/DC преобразователь с коррекцией входного тока.

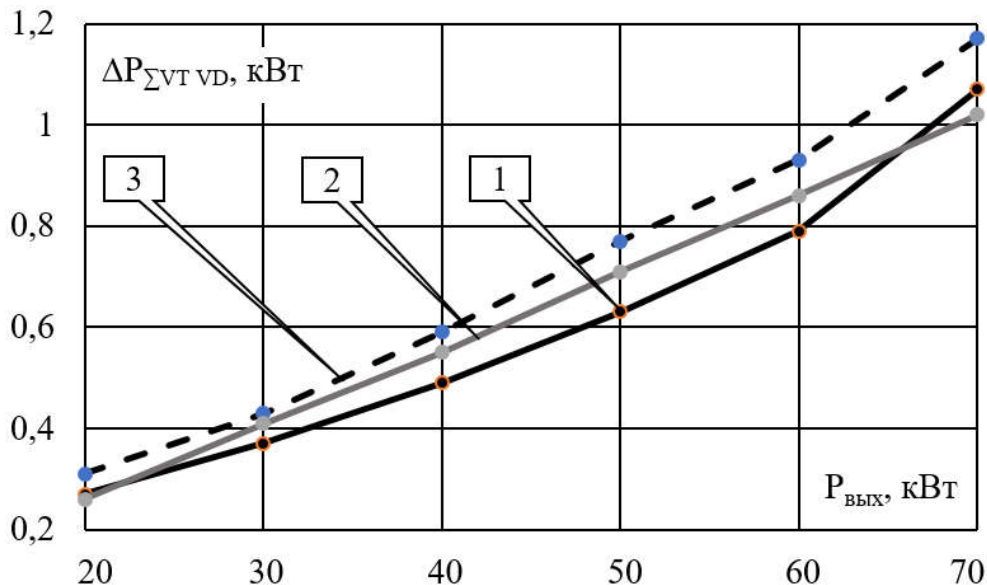


Рисунок 11 – Зависимости суммарных потерь мощности от текущей мощности

На базе проведенных исследований и анализа рабочих электрических процессов, полученных математических и имитационных компьютерных моделей был разработан алгоритм проектирования разработанного трёхфазного АС/DC преобразователя повышающего типа.

В заключении приведены основные выводы и результаты диссертационной работы:

1 Проведенный анализ существующих схемотехнических решений трёхфазных АС/DC преобразователей повышающего типа в комплексе с сформированными классифицирующими признаками, критериями сравнения и предложенным новым способом проведения сопоставительного анализа способствовал разработке новой силовой схемы, обеспечивающей снижение потерь мощности в полупроводниковых приборах на 7-11 % по сравнению с известными аналогами.

2 Разработанная оригинальная математическая модель силовой схемы в комплексе с системой управления предложенного трёхфазного АС/DC преобразователя повышающего типа позволяет проводить как исследование рабочих электрических процессов, так и проверку работоспособности рассматриваемого трехфазного АС/DC преобразователя.

3 Предложенный принцип регулирования на базе вычисления расчетной установочной активной мощности в текущем времени обеспечивает синусоидальную форму потребляемого фазного тока, независимо от других фаз тока, и стабилизацию выходного напряжения при коэффициенте мощности близком к единице.

4 Рекомендованный новый способ поиска коэффициентов усилителей ошибки системы управления на базе ограничения среднего геометрического значения максимальных величин переключающих функций способствует снижению в 2...2,5 раза времени поиска требуемых значений с точностью до 10 %, что приемлемо при проведении инженерных расчетов.

5 Выявленные граничные значения параметров реактивных элементов (входных реакторов и выходных конденсаторов) разработанной силовой схемы трехфазного АС/DC преобразователя повышающего типа обеспечивают на практике учет заданных ограничений по размаху пульсаций и амплитуде третьей гармонической составляющей входного фазного тока

6 Разработанная компьютерная имитационная модель предложенной силовой схемы в комплексе с системой управления в совокупности в полученных расчетными выражениями является эффективным инструментом для проведения исследований рабочих электрических процессов и для проектирования разработанного трёхфазного АС/DC преобразователя повышающего типа.

7 Проведенные экспериментальные исследования электрических процессов на макетном образце и практическая апробация на промышленных образцах подтвердили правильность достоверность полученных теоретических положений диссертационной работы, работоспособность разработанной силовой схемы в комплексе с системой управления и точность разработанных компьютерных имитационных моделей. При этом выявленные расхождения между расчетными, компьютерными и экспериментальными результатами составляют не более 13 %, что приемлемо для проведения исследований электрических процессов и проектирования таких сложных электротехнических устройств.

8 Разработанный алгоритм расчета трехфазного АС/DC преобразователя повышающего типа позволяет определить, как параметры реактивных элементов и полупроводниковых приборов предложенной силовой схемы, так и коэффициенты усилителей ошибки системы управления.

9 Полученные теоретические положения, компьютерные имитационные модели и разработанный алгоритм расчета были использованы при разработке рекуператора мощности РМ90 УХЛ4 ТКРМ90.000.000.00, предназначенного для проведения приемо-сдаточных, приёмочных, квалификационных и типовых испытаний преобразователей собственных нужд электровозов и электропоездов постоянного и переменного тока.

В целом, разработанный трехфазный преобразователь переменного тока в постоянный с коррекцией входного тока, предложенные соответствующие ему теоретические положения и компьютерные имитационные модели, исследованные рабочие электрические процессы, выработанные алгоритмы и рекомендации по проектированию являются весьма актуальными и востребованными при создании перспективных электротехнических комплексов самолётов, в которых системы электроснабжения базируются на использовании магистрального двухполярного напряжения 270 В постоянного тока, а так же при проектировании электротехнических комплексов, содержащих автономные ветро-, дизель- или газо-энергетические установки, что определяют народно-хозяйственное значение диссертационной работы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК:

1. Сорокин Д. А. Сопоставительный анализ схмотехнических решений трехфазных преобразователей АС/DC/ **Д. А. Сорокин**, С. И. Вольский// Электроника и электрооборудование транспорта, №5, 2018 – с. 10-15.
2. Сорокин Д. А. Универсальный подход к исследованию АС/DC преобразователей повышающего типа/ **Д. А. Сорокин**, С. И. Вольский// Вестник МЭИ, №2, 2019 – с. 65-72.
3. Сорокин Д. А. Определение реактивных параметров трехфазного корректора коэффициента мощности/ **Д. А. Сорокин**, С. И. Вольский// Электроника и электрооборудование транспорта, №3, 2019 – с. 30-33.
4. Сорокин Д. А. Математическая модель трехфазного корректора мощности с улучшенным коэффициентом полезного действия/ **Д. А. Сорокин**, С. И. Вольский// Электричество, №5, 2019 – с. 58-66.
5. Сорокин Д. А. Математическая модель трехфазного преобразователя переменного тока с двухполярной несбалансированной нагрузкой/ **Д. А. Сорокин**, С. И. Вольский// Практическая силовая электроника, №2(74), 2019 – с.2-7.

В журналах, входящих в базы Scopus:

6. Volskiy S. High-Voltage Converter for the Traction Application/ S. Volskiy, Y. Skorokhod, **D. Sorokin**// Advances in Power Electronics, 2016 – 9 pages
7. Sorokin D. Development of the Control System for Three-Phase Power Factor Corrector/ **D. Sorokin**, S. Volskiy, Y. Skorokhod// PCIM Europe, 2019 – p. 1813-1819.
8. Sorokin D. A. Three-phase power factor corrector with direct power control and power supply of the unbalanced industrial network/ **D. A. Sorokin**, S. I. Volskiy, Y. Y. Skorokhod// E3S Web of Conferences №124, 2019
9. Sorokin D. Power Factor Corrector for Bipolar Unbalanced Load and Assymetrical Three-Phase Power Supply/ **D. Sorokin**, S. Volskiy, Y. Skorokhod// PCIM Europe 2020.

Патенты:

10. **Сорокин Д. А.**, Вольский С. И. Трехфазный преобразователь переменного тока в постоянный с повышенным коэффициентом мощности. Патент №192844 от 18.07.2018 г.

Материалы научных конференций:

11. **Сорокин Д. А.** Исследование схем замещения АС/DC преобразователей с коррекцией коэффициента мощности// Гагаринские чтения – 2018. Сборник тезисов докладов XLIV Международной молодежной научной конференции, 2018 – с. 321.
12. Sorokin D. A. Three-Phase Power Factor Corrector with Direct Power Control and Power Supply of the Unbalanced Industrial Network/ **D. A. Sorokin**, S.

I. Volskiy, Y. Y. Skorokhod// International Scientific and Technical Conference «Smart Energy Systems – 2019», 2019 – p.73.

13. **Сорокин Д. А.** Компьютерное моделирование трехфазного корректора коэффициента мощности с прямым управлением мощностью// Гагаринские чтения – 2019 Сборник тезисов докладов XLV Международной молодежной научной конференции, 2019 – с. 480.

14. **Сорокин Д. А.** Корректор коэффициента мощности применительно к полностью электрифицированному самолету / Д. А. Сорокин, С. И. Вольский// 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019» Тезисы, 2019 – с. 108-109.

15. **Сорокин Д. А.** Способ определения коэффициентов ошибки в корректоре коэффициента мощности// Гагаринские чтения – 2020 Сборник тезисов докладов XLVI Международной молодежной научной конференции, 2020 – с. 580.