

МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



ТУРЧЕНКО ИГОРЬ СЕРГЕЕВИЧ

Регулируемые выпрямительные устройства на базе однообмоточных дросселей насыщения для подсистемы 27В систем электроснабжения летательных аппаратов

Специальность 05.09.03 – "Электротехнические комплексы и системы"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2015 г.

Работа выполнена на кафедре "Микроэлектронные электросистемы" Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор
Шевцов Даниил Андреевич

Официальные оппоненты:

Мыцык Геннадий Сергеевич, доктор
технических наук, профессор,
профессор кафедры
«Электротехнические комплексы
автономных объектов и электрический
транспорт» НИУ МЭИ;

Овчинников Денис Александрович,
кандидат технических наук, 1-й
заместитель генерального директора
ЗАО «Связь инжиниринг»

Ведущая организация

ЗАО «ММП-Ирбис»

Защита состоится 28 декабря 2015 г. в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 при Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д.4, корп. «Г», ауд. 302 (кафедра 310).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью учреждения, просим направлять по указанному адресу.

Автореферат разослан "___" _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.07
к.т.н.



В.С. Степанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одними из основных функциональных узлов, формирующих постоянное напряжение на борту современных летательных аппаратов (ЛА), являются регулируемые выпрямительные устройства (РВУ).

РВУ имеют разные варианты решения, которые возможно реализовать применением как полупроводниковых (транзисторных или тиристорных), так и магнитных ключей.

Магнитные ключи, также известные как магнитные усилители и дроссели насыщения (ДН), исторически предшествовали полупроводниковым ключам.

Традиционные устройства, построенные на ДН, отличались от транзисторных и тиристорных аналогов простотой реализации, высокой надежностью, лучшей электромагнитной совместимостью, но имели такие недостатки, как низкое быстродействие и большая масса.

В настоящее время среди иностранных научно-технических статей, диссертационных работ и материалов конференций упоминается о разработках новых магнитно-регулируемых выпрямительных устройств и внедрении их зарубежными фирмами в системы электроснабжения (СЭС) современных ЛА.

Возобновление интереса к ДН обусловлено разработкой новой элементной базы развитием новых технологий, появлением новых идей. Во-первых, применение перспективных аморфных и нанокристаллических магнитомягких сплавов приводит к значительному улучшению электромагнитных характеристик и массо-энергетических параметров ДН. Во-вторых, применение однообмоточных ДН (ОДН) позволяет существенно улучшить технологичность и уменьшить габаритные параметры РВУ. В третьих, использование современной полупроводниковой элементной базы открывает новые возможности для построения высокоэффективных цепей управления ОДН.

Однако используемые в серийных разработках структурные и схемотехнические решения и методики проектирования РВУ на ОДН не публикуются в открытой печати в связи с защитой авторских прав и соблюдением коммерческой тайны.

Таким образом, разработка принципов построения и методов проектирования РВУ на базе ОДН с использованием новейших магнитомягких материалов и современной полупроводниковой элементной базы, на сегодняшний день является актуальной и целесообразной задачей. Успешное решение этой задачи открывает широкие возможности для построения централизованных РВУ на базе ОДН, входящих в состав подсистем напряжения постоянного тока СЭС ЛА.

Цель и задачи работы. Целью работы является разработка и исследование принципов построения и методов проектирования регулируемых выпрямительных устройств на базе однообмоточных дросселей насыщения с использованием современной элементной базы для подсистемы 27В современных и перспективных СЭС ЛА.

Достижение поставленной цели возможно при решении следующих **задач**:

1. Анализ характеристик, свойств и параметров современных магнитомягких материалов на основе аморфных и нанокристаллических сплавов.
2. Разработка структурных, функциональных и схмотехнических решений силовых каскадов РВУ на базе ОДН с использованием современной элементной базы.
3. Разработка структурных и схмотехнических решений устройства управления ОДН с использованием современной элементной базы.
4. Разработка способов защиты РВУ на базе ОДН от аварийных перегрузок по току и коротких замыканий цепи нагрузки.
5. Разработка методов проектирования ОДН для РВУ.
6. Разработка методов проектирования цепей коррекции для обеспечения устойчивой работы РВУ на ОДН как замкнутой системы автоматического управления.
7. Исследование диапазона регулирования и анализ процессов в установившихся, переходных и аварийных режимах работы РВУ на базе ОДН с помощью компьютерного моделирования.
8. Сравнительный анализ массогабаритных и энергетических характеристик РВУ на базе ОДН с аналогичными тиристорными и транзисторными устройствами.
9. Разработка и исследование трансформаторного и безтрансформаторного вариантов многопульсных РВУ на базе ОДН.

Объект исследования – устройства преобразования электроэнергии.

Предмет исследования – принципы построения регулируемых выпрямительных устройств на базе однообмоточных дросселей насыщения.

Область исследования – системы электроснабжения и электрооборудования летательных аппаратов.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе, заключается в следующем:

1. Разработаны структуры РВУ на основе ОДН для однофазных и трехфазных сетей переменного тока.
2. Предложен принцип построения устройства управления ОДН для однофазных, трёхфазных и многопульсных РВУ.

3. Разработана методика проектирования ОДН для РВУ.
4. Разработана методика проектирования цепей коррекции для обеспечения устойчивой работы РВУ на ОДН как замкнутой системы автоматического управления.
5. Предложен способ построения узла защиты РВУ на базе ОДН от аварийных перегрузок по току и коротких замыканий цепи нагрузки.
6. Предложены принципы построения многопульсных трансформаторных и безтрансформаторных РВУ на основе ОДН.

Практическая полезность работы состоит в том, что:

1. Проведен анализ зарубежных и отечественных публикаций о разработках и применениях РВУ на базе ОДН на современной элементной базе.
2. Проведен сравнительный анализ характеристик, свойств и параметров современных аморфных и нанокристаллических магнитомягких сплавов с традиционными материалами.
3. Предложены схмотехнические решения функциональных узлов РВУ на основе ОДН для однофазных и трехфазных сетей переменного тока.
4. Предложен вариант корректирующего устройства, обеспечивающего устойчивую работу РВУ на ОДН.
5. С помощью имитационного компьютерного моделирования (ИКМ) исследованы и проанализированы регулировочные и динамические характеристики РВУ на основе ОДН для однофазных и трехфазных сетей переменного тока.
6. С помощью ИКМ исследованы процессы в РВУ на основе ОДН в номинальных, переходных и аварийных режимах для различных типов выходных сглаживающих фильтров.
7. Проведен сравнительный анализ массогабаритных и энергетических характеристик РВУ на базе ОДН с аналогичными тиристорными и транзисторными устройствами в диапазоне мощностей от 3кВт до 12кВт.

Методология и методы исследования: при выполнении диссертационной работы теоретические исследования проводились с использованием методов теории электрических цепей, теории автоматического управления, методов дифференциального и интегрального исчислений, а также численных методов математического анализа с использованием компьютерного моделирования в пакете программ OrCAD 9.2. Исследование рабочих процессов в регулируемых выпрямительных устройствах проводилось с помощью имитационного компьютерного моделирования. Такой способ проверки работоспособности схем позволяет сократить время и расходы на создание макетного образца. Обработка результатов расчетов и моделирования проводилась с применением программы MS Excel.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Структуры силовых каскадов РВУ на основе ОДН для однофазных и трехфазных сетей переменного тока.
2. Принцип построения и способ реализации устройства управления ОДН.
3. Методика проектирования ОДН для РВУ.
4. Методика проектирования цепей коррекции для обеспечения устойчивой работы РВУ на ОДН как замкнутой системы автоматического управления.
5. Принцип построения и способ аппаратной реализации узла защиты РВУ на базе ОДН от аварийных перегрузок по току и коротких замыканий цепи нагрузки.
6. Варианты построения многопульсных трансформаторных и безтрансформаторных РВУ на основе ОДН.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием положений теории электрических цепей, теории автоматического управления; применяемым математическим аппаратом, имитационным компьютерным моделированием с использованием лицензионных сертифицированных программ. Помимо этого, достоверность полученных результатов подтверждается сопоставлением проведенных исследований с опубликованными материалами других авторов.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы были использованы в НИР кафедры № 306 «Микроэлектронные электросистемы» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (договор № 44310-03060 от 04.06.2012г.), а также в учебном процессе по кафедре № 306 «Микроэлектронные электросистемы» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) в курсах «Источники вторичного электропитания», «Устройства управления преобразователями электроэнергии».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись на следующих конференциях:

- 12-й международной конференции «Авиация и космонавтика – 2013» (г. Москва, 2013г.);
- 13-й международной конференции «Авиация и космонавтика – 2014» (г. Москва, 2014 г.);
- 2-х конкурсах научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики» (г. Москва, 2013 и 2014 гг.);
- 15-й Международной конференции молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам «EDM 2014» (респ. Алтай, Эрлагол, 2014 г.);

– 16-й Международной конференции молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам «EDM 2015» (респ. Алтай, Эрлагол, 2015 г.);

– XII Всероссийской научно–технической конференции «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского» (г. Москва, 2015 г.).

Публикации. По результатам исследования опубликовано 16 научных работ, в том числе 6 научных статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК Мин. Обр. и Н. РФ, получено 2 патента на полезные модели.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 145 страницах и состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, приложений. Работа включает в себя 85 рисунков, 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и целесообразность разработки новых структур РВУ на основе ДН для подсистем постоянного напряжения 27В СЭС ЛА.

Проведен обзорный анализ существующих способов построения РВУ на основе транзисторов, тиристоров, дросселей насыщения.

Проведен анализ отечественных и зарубежных научно-технических публикаций, касающихся вопросов построения регулируемых выпрямительных устройств на базе дросселей насыщения.

Определены цели и задачи исследований, показаны: научная новизна и практическая полезность работы; методология и методы исследования; положения, выносимые на защиту; приведены сведения о достоверности и апробации результатов работы, а также сведения о публикациях и структуре диссертационной работы.

В первой главе проводится анализ характеристик, свойств и параметров современных магнитомягких материалов на основе аморфных и нанокристаллических сплавов.

Современные аморфные и нанокристаллические сплавы позволяют строить ДН с высокими эксплуатационными параметрами и имеют такие преимущества, как меньшие потери на перемагничивание и вихревые токи, меньший вес и объем, более узкая прямоугольная петля гистерезиса (ППГ), расширенный рабочий температурный диапазон, по сравнению с традиционными материалами.

В связи с этим можно говорить о целесообразности применения новых магнитных материалов для магнитопроводов ДН, входящих в состав РВУ.

В главе дается обзорное описание традиционных структур силовой части РВУ на базе двухобмоточных дросселей насыщения и способов управления двухобмоточными ДН.

Рассмотрен принцип действия быстродействующего ОДН в схеме простейшего регулятора напряжения, приведенной на рис. 1а).

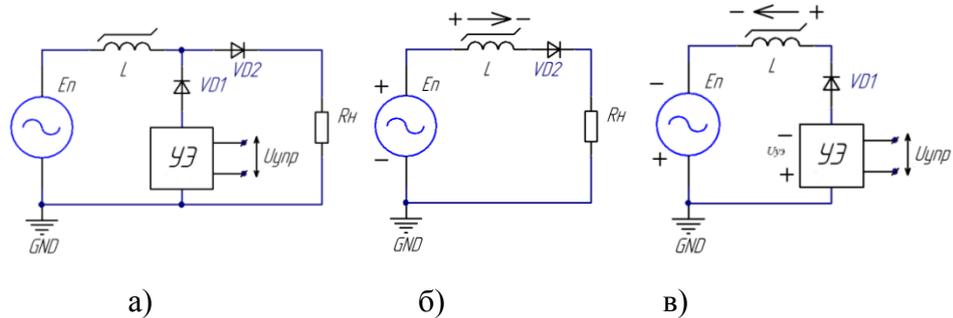


Рис. 1. а) схема простейшего регулятора напряжения на базе ОДН;

б) процессы для положительного (рабочего) полупериода E_n ; в) процессы для отрицательного (управляющего) полупериода E_n

Полупериод, соответствующий проводящему состоянию диода VD_2 , является рабочим для дросселя L (см. рис. 1б), для него справедливо соотношение:

$$Sw \frac{\Delta B}{\Delta t} = U_{п}(t) - U_{н} \quad (1)$$

Второй полупериод, когда проводит диод VD_1 , является управляющим (см. рис. 1в) для L , для него справедливо соотношение:

$$Sw \frac{\Delta B}{\Delta t} = U_{п}(t) - U_{уэ} \quad (2)$$

В соответствии с (1) и (2), регулирование напряжения на нагрузке обеспечивается изменением напряжения на УЭ под действием сигнала $U_{упр}$.

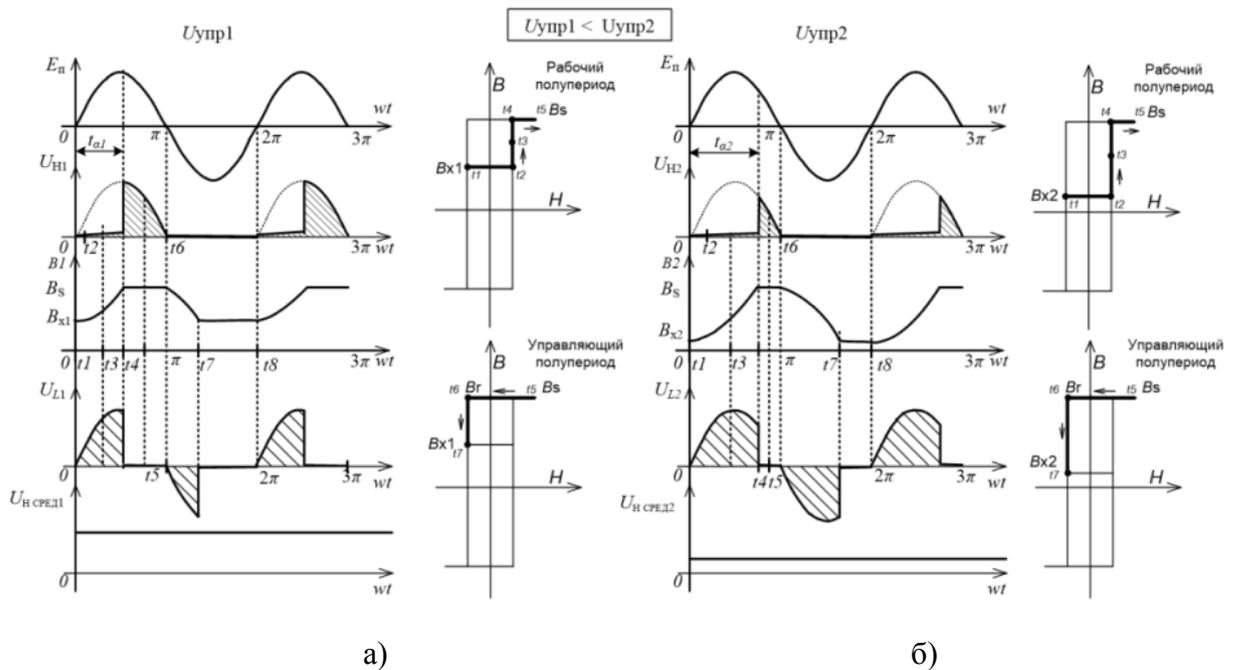


Рис. 2. Временные диаграммы, поясняющие работу простейшего однофазного регулятора напряжения на базе ОДН

На временных диаграммах, приведенных на рис. 2 и поясняющих работу схемы, представлены: напряжение E_n питающего источника, мгновенное U_n и среднее U_n сред напряжение на нагрузке, индукция B в магнитопроводе ОДН, напряжение U_L на ОДН.

Для регулирования напряжения на нагрузке необходимо изменять время намагничивания сердечника в рабочем полупериоде, т.е. изменять угол α включения ОДН.

Разным углам включения α соответствуют разные напряжения на нагрузке. При увеличении $U_{упр}$ увеличивается угол α , и, как следствие, уменьшается U_n .

Однообмоточный дроссель насыщения характеризуется повышенной технологичностью, сниженной себестоимостью, а также лучшими динамическими свойствами, по сравнению с двухобмоточным вариантом, что позволяет сделать вывод о перспективности применения таких устройств для построения РВУ.

Предложен принцип построения управляющего элемента (устройства управления) для ОДН. Элемент, управляющий процессом размагничивания ОДН, должен обладать свойством источника напряжения с возможностью ограничения тока, при этом он должен иметь малые потери на управление и высокое быстродействие.

Управляющий элемент (УЭ) формирует напряжение размагничивания ОДН под действием сигнала управления. При этом УЭ должен ограничивать ток размагничивания ОДН, предотвращая попадание рабочей точки петли гистерезиса в область глубокого магнитного насыщения.

В соответствии с требованиями была разработана функциональная схема УЭ и предложен вариант её схематехнической реализации, удовлетворяющий всем выше перечисленным требованиям.

На рис. 3 представлена регулировочная характеристика среднего значения напряжения нагрузки от различных напряжений управления $U_{упр}$ для простейшего регулятора напряжения на базе ОДН.

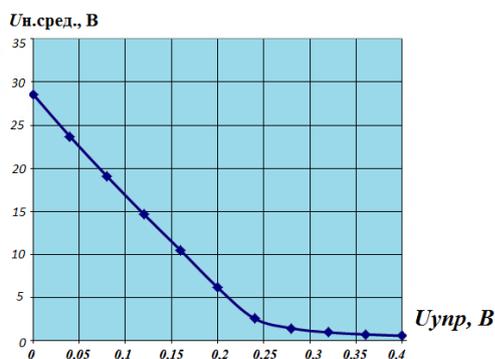


Рис. 3. Регулировочная характеристика, отражающая зависимость напряжения нагрузки U_n от напряжения управления $U_{упр}$.

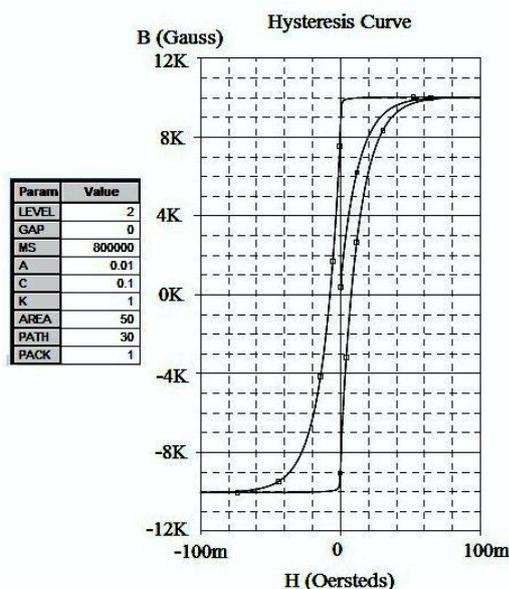


Рис. 5. Модель статической петли магнитного гистерезиса материала сердечника дросселя насыщения, задаваемая в программе OrCAD 9.2

Для исследования характера протекающих процессов в установившихся, переходных и аварийных режимах были созданы имитационно-компьютерные модели данного устройства с RL-, RC-, RLC-сглаживающими фильтрами.

Предложен способ построения узла защиты от аварийных перегрузок по току и коротких замыканий цепи нагрузки для РВУ на базе ОДН.

На рис. 6 представлена имитационная компьютерная модель (ИК-модель) узла токовой защиты (УТЗ).

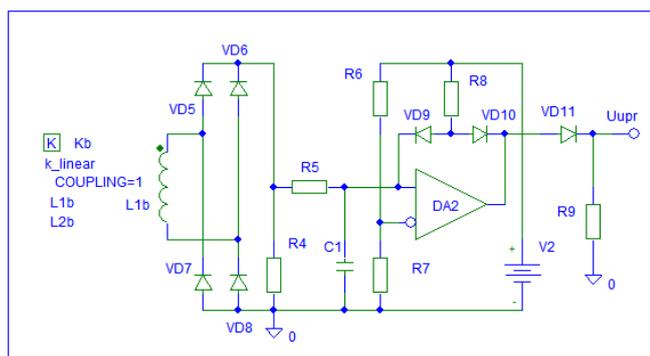


Рис. 6. Схема модели узла токовой защиты 1Ф-ТРВУ-ОДН для исследования аварийных режимов работы

На рис. 7 приведена структурная схема трехфазного 6-пульсного трансформаторного РВУ на базе ОДН (3Ф6П-ТРВУ-ОДН). Дано описание принципа работы 3Ф6П-ТРВУ-ОДН и с помощью ИКМ исследованы процессы в переходных установившихся, и аварийных режимах для различных типов выходных сглаживающих фильтров.

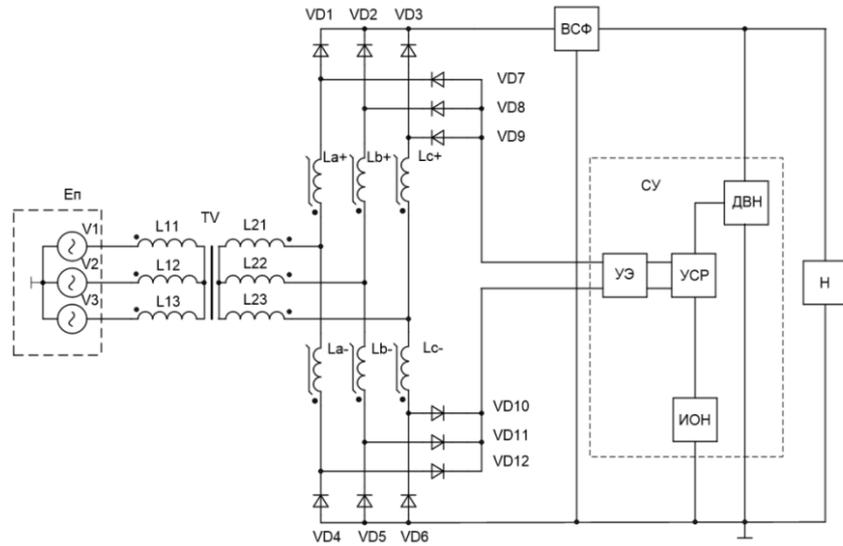


Рис. 7. Структурная схема трехфазного трансформаторного РВУ на базе ОДН (3Φ6П-ТРВУ-ОДН)

На рис. 8 представлены временные диаграммы процессов в ИК-модели 3Φ6П-ТРВУ-ОДН, где отражены изменения тока нагрузки I_H , напряжения нагрузки U_H , а также фазного тока источника входного напряжения $I_{ВХ}$ при коротком замыкании нагрузки в установившемся режиме работы при токе нагрузки 25А.

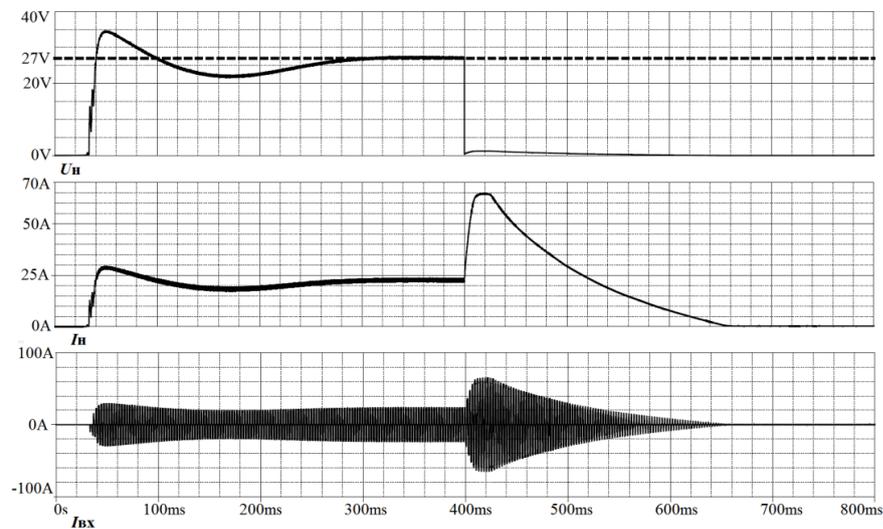


Рис. 8. Результаты моделирования защиты от аварийных режимов работы 3Φ6П-ТРВУ-ОДН с LC-фильтром

Проведенные исследования подтверждают, что ОДН, включенные во вторичную цепь выпрямителя, позволяют регулировать выходное напряжение, а также способны обеспечивать защиту силовой цепи при включении на короткозамкнутую цепь нагрузки и при коротком замыкании нагрузки в установившемся режиме работы устройства.

Предложена методика проектирования ОДН для РВУ, справедливая для однофазных, трехфазных и многофазных (многопульсных) выпрямительных устройств.

Проектирование ОДН, в рамках предложенной методики, ведется по конструктивному и тепловому критериям.

Габаритная мощность ОДН, может быть найдена по формуле:

$$P_{\Gamma} = U_{\text{макс}} \cdot I_{W \text{ макс}} \quad (3)$$

Напряжение на ОДН может быть найдено по формуле:

$$U_{\text{макс}} = \frac{w \cdot S_{\text{ст}} \cdot K_{\text{ст}} \cdot \delta B}{\delta t} \quad (4)$$

Произведение $S_{\text{ст}} \cdot S_{\text{окна}}$, называемое геометрическим фактором (сердечника ОДН) может быть найдено как:

$$S_{\text{ст}} \cdot S_{\text{окна}} = \frac{P_{\Gamma}}{4 \cdot B_s \cdot j \cdot f_c \cdot K_{\text{окна}} \cdot K_{\text{ст}}} \quad (5)$$

Максимальный ток управления $I_{\text{упр макс}}$ при размагничивании ОДН определяется максимальной напряженностью динамической петли гистерезиса $H_{\text{д макс}}$, параметры которой также зависят и от температуры (рис. 9в):

$$I_{\text{упр макс}} = \frac{H_{\text{д макс}} \cdot l_{\text{ст}}}{w}, \quad (6)$$

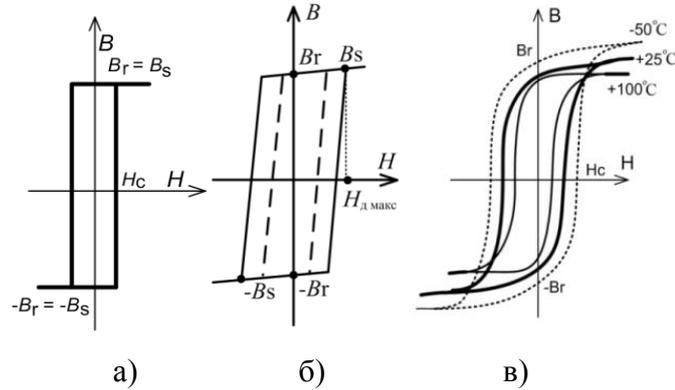


Рис. 9. Варианты представления ППГ для ОДН:

- а) идеальная статическая, с учетом ширины петли; б) деформированная динамическая для различных частот работы; в) деформированная динамическая для различных температур

Потери в магнитопроводе ОДН оцениваются согласно

$$P_c = P_0 \cdot B_s^\alpha \cdot f_c^\beta \cdot V_{\text{серд}} \quad (7)$$

Суммарные потери в ОДН могут быть найдены, как

$$P_{\Sigma} = P_c + P_{\text{обм}} \quad (8)$$

Максимальная температура ОДН рассчитывается как

$$T_{\text{макс}} = T_{\text{ср макс}} + P_{\Sigma} \cdot R_t \quad (9)$$

Для ОДН, выполненном на магнитопроводе кольцевого типа, $S_{\text{охл}}$ рассчитывается согласно следующей формуле

$$S_{\text{охл}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot 2 + \pi \cdot D \cdot h \quad (10)$$

В третьей главе представлена графо-аналитическая методика проектирования корректирующего устройства (КУ), обеспечивающего стабильную работу РВУ, как замкнутой системы автоматического регулирования с отрицательной обратной связью. Методика разработана на основе критерия устойчивости Найквиста, использующего исходные и желаемые логарифмические АЧХ и ФЧХ.

На основании функциональной схемы РВУ на базе ОДН, приведённой на рис. 10, получена передаточная функция (ПФ) разомкнутой системы РВУ на базе ОДН имеет вид:

$$W_{\text{РС}} = W_{\text{КУ}} \cdot W_{\text{УЭ}} \cdot W_{\text{СЧ}} \cdot W_{\text{ФНЧ}} \cdot W_{\text{ДВН}} \quad (11)$$

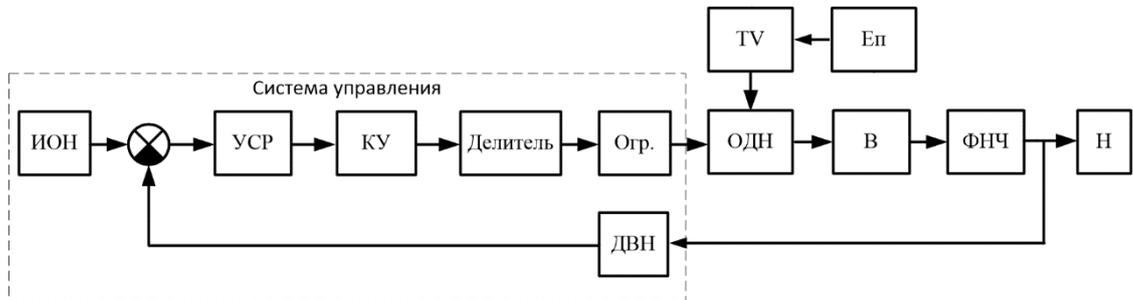


Рис. 10. Функциональная схема РВУ на базе ОДН

ПФ ОДН, как звена чистого запаздывания, $W_{\text{ОДН}}$ имеет следующий вид:

$$W_{\text{ОДН}} = e^{-\tau_{\text{ОДН}} \cdot S} \quad (12)$$

Постоянную времени ОДН можно выразить как:

$$\tau_{\text{ОДН}} = \frac{T_c}{2} \quad (13)$$

ПФ силовой части $W_{\text{СЧ}}$ имеет следующий вид:

$$W_{\text{СЧ}} = k_y \cdot W_{\text{ОДН}} = k_y \cdot e^{-\tau_{\text{ОДН}} \cdot S} \quad (14)$$

Желаемые логарифмические АЧХ и ФЧХ с последовательным корректирующим устройством описываются следующими выражениями:

$$L_{\text{жел}}(\omega) = 20 \log(|W_{\text{СЧ}}(\omega) \cdot W_{\text{ФНЧмакс}}(\omega) \cdot W_{\text{УЭ}}(\omega) \cdot W_{\text{ДВН}}(\omega) \cdot W_{\text{КУ}}(\omega)|) \quad (15)$$

$$F_{\text{жел}}(\omega) = (\arg(W_{\text{ДВН}}(\omega)) + \arg(W_{\text{ФНЧмакс}}(\omega)) + \arg(W_{\text{УЭ}}(\omega)) + \arg(W_{\text{КУ}}(\omega)) - (\tau \cdot \omega)) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (16)$$

На рисунках 11, 12 представлены возможные варианты скорректированных АЧХ и ФЧХ разомкнутой системы РВУ на базе ОДН.

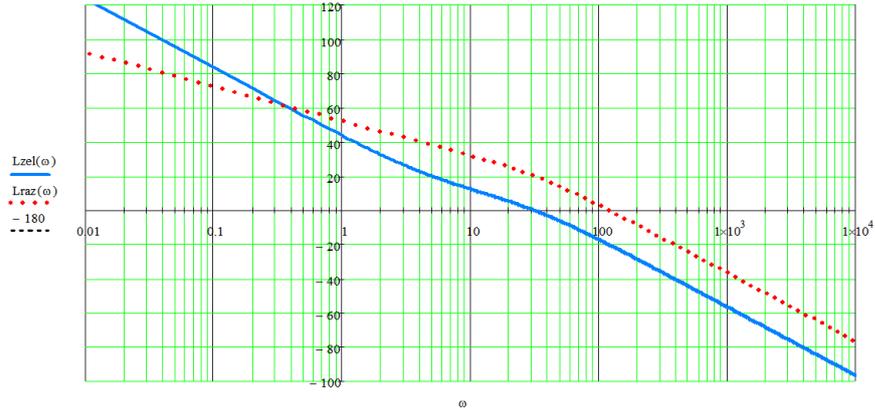


Рис. 11. Скорректированная ЛАЧХ и располагаемая ЛАЧХ РС РВУ на базе ОДН

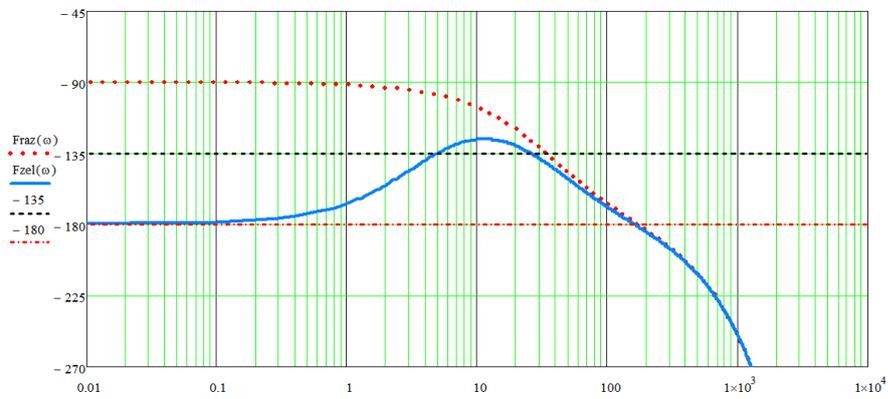


Рис. 12. Скорректированная ЛФЧХ и располагаемая ЛФЧХ РС РВУ на базе ОДН

Предложенная методика выбора КУ позволяет обеспечить устойчивую работу РВУ во всем диапазоне изменения тока нагрузки от холостого хода до максимального.

Предложен вариант схемотехнической реализации КУ на основе операционного усилителя, охваченного частотно-зависимой местной отрицательной обратной связью (см. рис. 13).

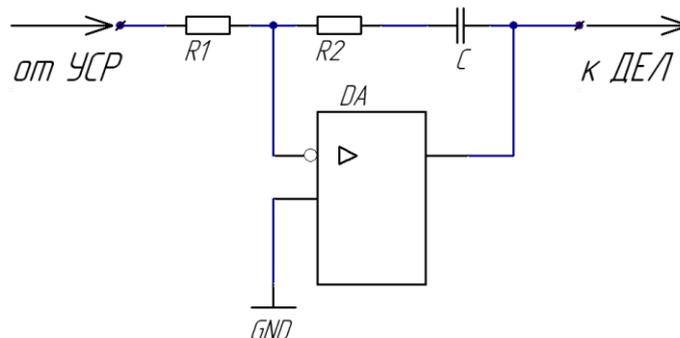


Рис. 13. Схемотехническая реализация КУ для РВУ на базе ОДН

Устройство, принципиальная схема которого приведенное на рис. 12, имеет следующую передаточную функцию:

$$W_1(S) = k \cdot \frac{T_1 \cdot S + 1}{T_1 \cdot S} \quad (17)$$

Параметры ПФ (17) могут быть определены, согласно схеме (см. рис. 13), следующим образом:

$$T_1 = R1 \cdot C \quad (18)$$

$$k = \frac{R2}{R1} \quad (19)$$

С помощью ИКМ проанализировано качество переходных процессов в однофазном и трехфазном РВУ на базе ОДН с корректирующими устройствами, спроектированными по предложенной методике. переходные процессы отвечают требованиям ГОСТ Р 54073-2010.

На рис. 14 и рис. 15 приведены временные диаграммы процессов в 3Ф6П-ТРВУ-ОДН при изменении тока нагрузки и параметров напряжения питания соответственно.

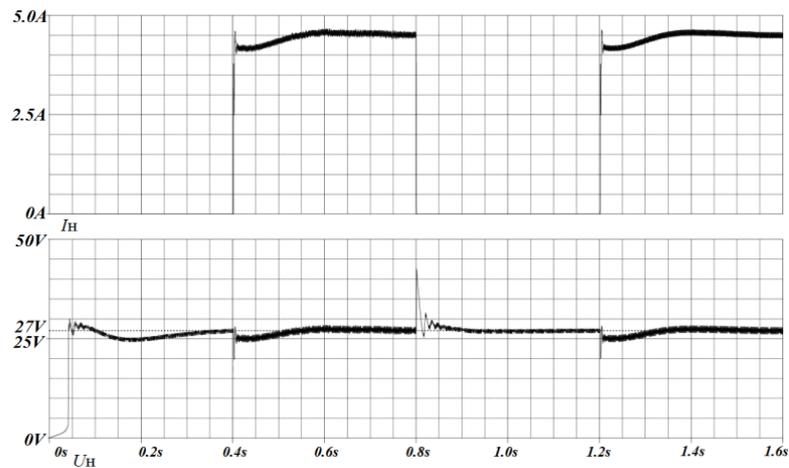


Рис. 14. Временные диаграммы процессов в модели 3Ф6П-ТРВУ-ОДН при изменении тока нагрузки

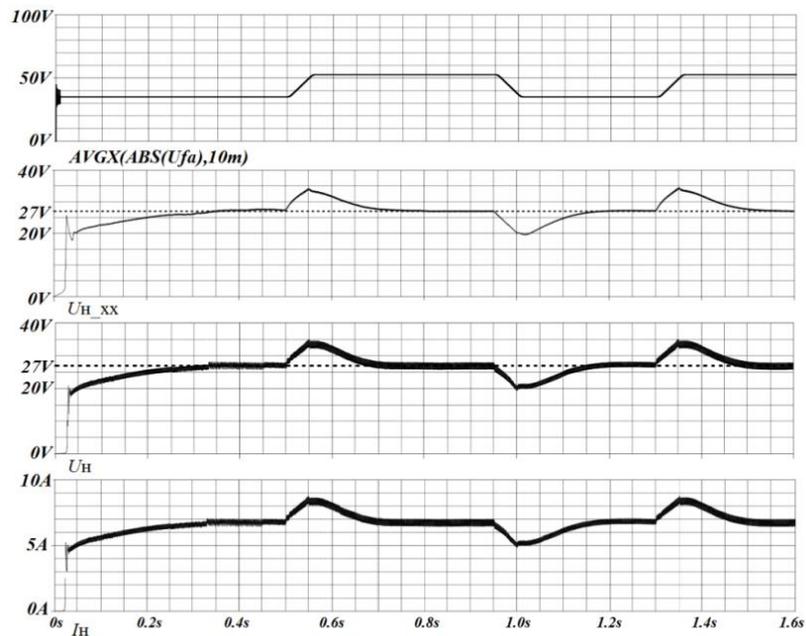


Рис. 15. Временные диаграммы процессов в модели 3Ф6П-ТРВУ-ОДН при изменении параметров питающего напряжения

В четвертой главе рассматриваются вопросы построения многопульсных РВУ на базе ОДН и приводятся результаты их исследования с помощью ИКМ.

Предложены структурные и схмотехнические решения многопульсных (12-, 18-пульсных) трансформаторных и безтрансформаторных РВУ на ОДН и способ управления ими.

Отмечено, что реализовать многопульсное выпрямление можно разными способами, но одним из простейших способов является построение силового трёхфазного трансформатора (СТ) с несколькими трёхфазными системами обмоток. При этом для 12-ти пульсности две системы вторичных обмоток СТ должны быть сформированы со сдвигом в 30 ± 60 электрических градусов (см. рис.16).

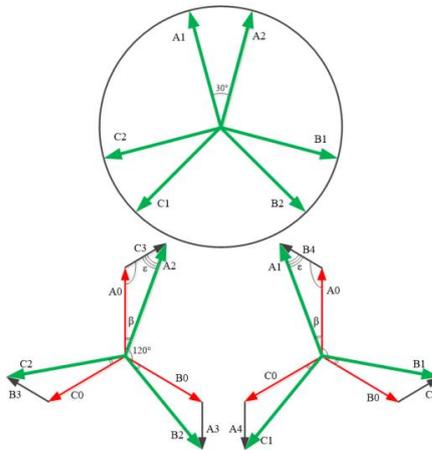


Рис. 16. Векторные диаграммы, поясняющие принцип построения 6-фазной системы напряжений силового трансформатора с формированием систем вторичных обмоток

С помощью ИКМ исследованы и проанализированы динамические характеристики многопульсных трансформаторных РВУ на ОДН в переходных, установившихся и аварийных режимах работы и показано, что качество переходных процессов отвечает требованиям ГОСТ Р 54073-2010 (см. рис.17).

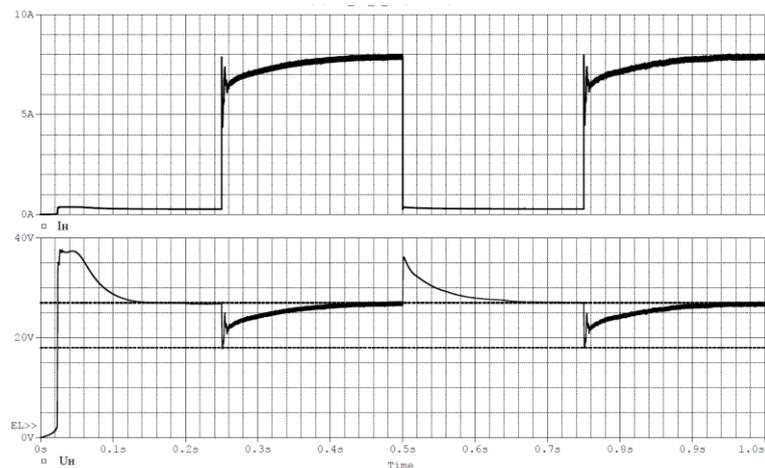


Рис. 17. Временные диаграммы процессов в модели 3Ф12П-ТРВУ-ОДН при изменении тока нагрузки

На рис.18 представлена структурная схема 18-пульсного трансформаторного РВУ на базе ОДН.

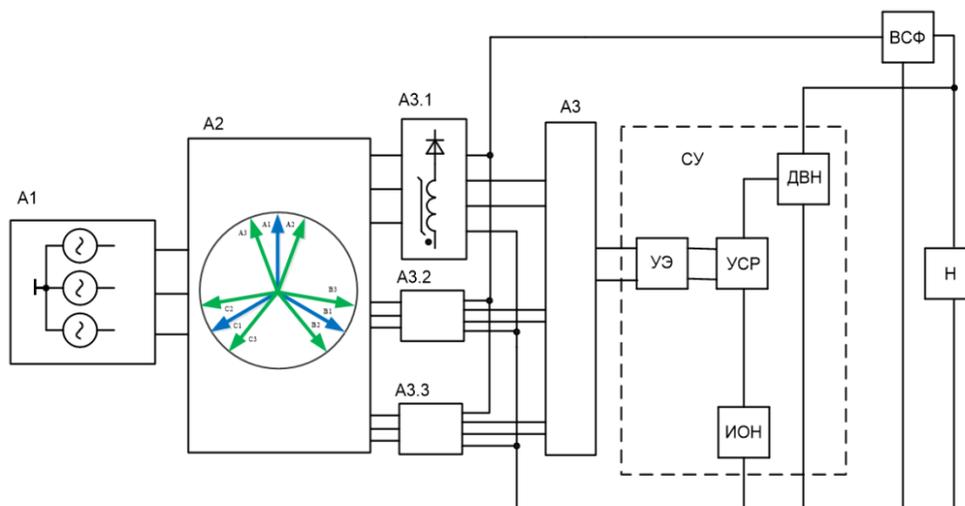


Рис. 18. Структурная схема 3Ф18П-ТРВУ-ОДН

С помощью ИКМ исследованы формы потребляемого тока и показано, что трансформаторные многопульсные РВУ на ОДН могут выполнять функцию пассивного корректора коэффициента мощности.

На рис. 19 приведены диаграммы формы потребляемого тока и пульсаций выходного напряжения для 6-, 12- и 18-пульсных ВУ.

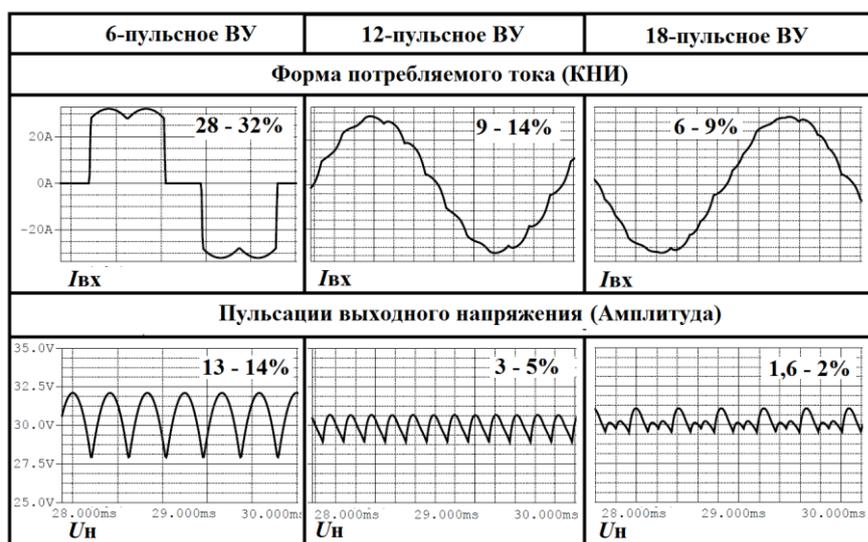


Рис. 19. Диаграммы формы потребляемого тока и пульсаций выходного напряжения для 6-, 12- и 18-пульсных ВУ

Отмечено, что применение в многопульсных структурах РВУ специализированного многофазного генератора переменного тока позволяет исключить силовой трансформатор и громоздкий выходной фильтр на электролитических конденсаторах. Это приводит как к уменьшению массы устройства, так и к повышению его надежности.

Предложены структурные и схмотехнические решения для многопульсных безтрансформаторных РВУ на ОДН и с помощью ИКМ исследованы их регулировочные и динамические характеристики. На рис. 20 представлена структурная схема n-пульсного безтрансформаторного РВУ на базе ОДН.

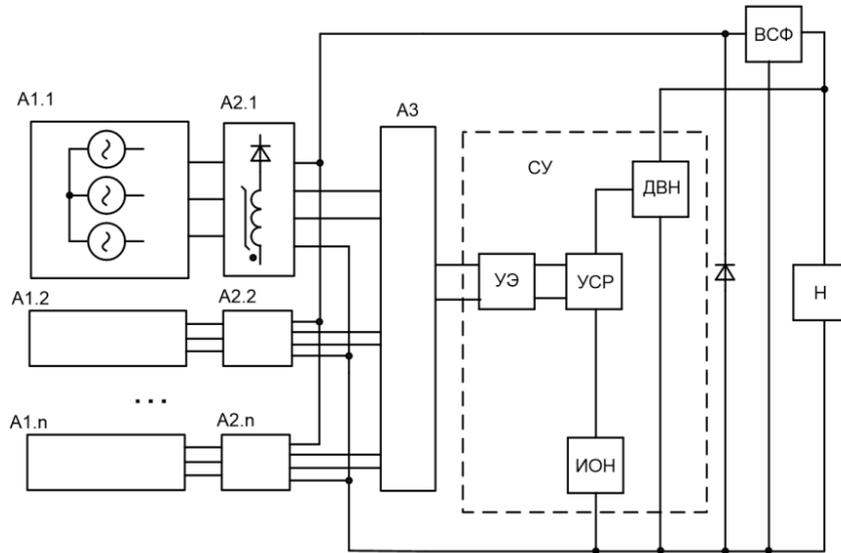


Рис. 20. Структурная схема 18-пульсного безтрансформаторного РВУ на базе ОДН для перспективных СЭС ЛА

Рассчитаны массо-энергетические характеристики и параметры РВУ на ОДН для номинальных мощностей от 3кВт до 12кВт. Проведен расчет массогабаритных характеристик многопульсных РВУ на ОДН.

На рис. 21 приведены графики зависимости суммарных КПД всех ОДН в устройстве от установленной мощности для 12-пульсных РВУ на базе ОДН, работающих па частотах 400Гц, 1500Гц, 2500Гц.

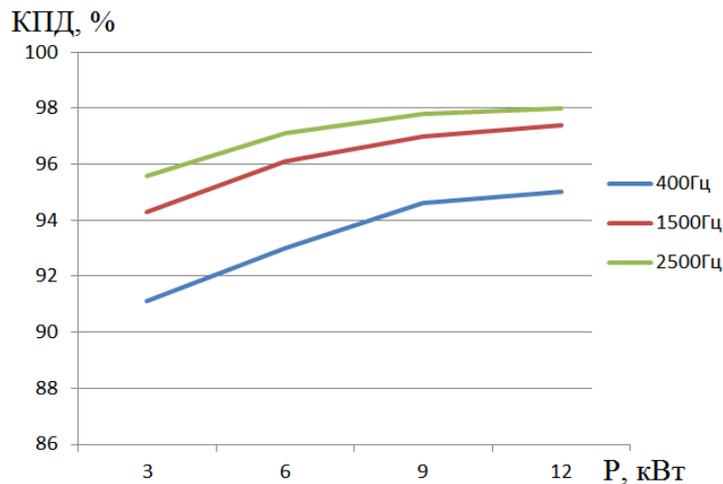


Рис.21. Зависимость КПД от номинальной мощности для 12-пульсных РВУ на ОДН

Проведен сравнительный анализ массогабаритных характеристик трансформаторных и безтрансформаторных РВУ на ОДН с аналогичными транзисторными и тиристорными устройствами (см. рис. 22).

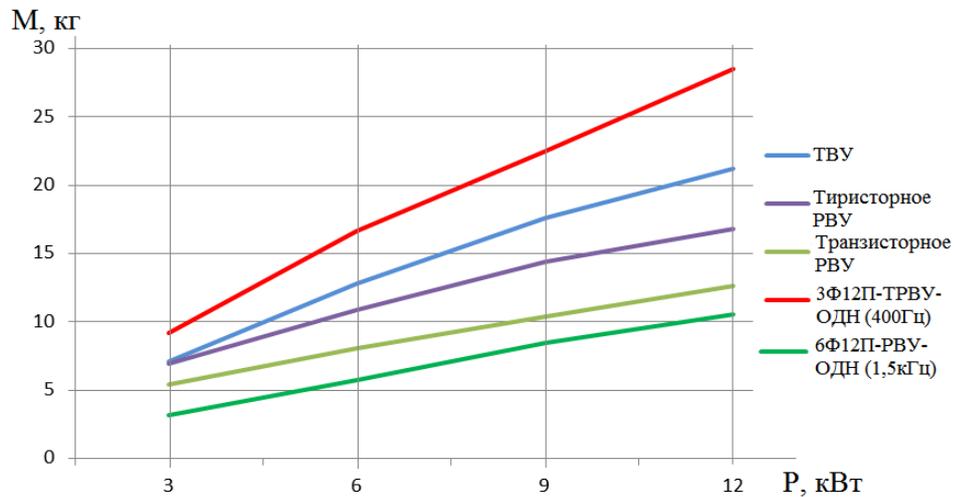


Рис. 22. Графики зависимости массы от установленной мощности выпрямительных устройств различных классов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы получены следующие научные и практические результаты:

1. Проведен анализ характеристик, свойств и параметров современных магнитомягких материалов на основе аморфных и нанокристаллических сплавов. Сделан вывод о целесообразности применения их в качестве магнитопроводов однообмоточных дросселей насыщения, входящих в состав РВУ.

2. Разработаны варианты структурных и схемотехнических решений силовых каскадов однофазных, трёхфазных и многопульсных РВУ на базе ОДН с использованием перспективных магнитомягких материалов.

3. Разработан принцип построения и предложен вариант аппаратной реализации устройства управления ОДН для РВУ, с использованием современной элементной базы.

4. Предложен вариант аппаратной реализации узла токовой защиты РВУ на ОДН от аварийных перегрузок по току и коротких замыканий цепи нагрузки.

5. Разработана методика проектирования корректирующего устройства и предложен вариант его схемотехнической реализации.

6. Разработана методика проектирования ОДН, справедливая для однофазных, трёхфазных и многопульсных РВУ;

7. С помощью имитационного компьютерного моделирования подтверждена работоспособность предложенных технических решений.

8. Показано, что при использовании современных магнитных материалов диапазон регулирования РВУ на ОДН может достигать 1000.

9. Показано, что применение встроенного резистора холостого хода увеличивает дополнительно потери не более чем на 0,5%. При этом устройство способно работать устойчиво от тока холостого хода нагрузки до максимального тока нагрузки.

10. С помощью ИКМ получены регулировочные характеристики для однофазных, трехфазных и многопульсных РВУ на базе ОДН.

11. Исследованы процессы в установившихся, переходных и аварийных режимах для различных вариантов РВУ на ОДН с различными выходными сглаживающими фильтрами.

12. Рассчитаны массогабаритные и энергетические параметры РВУ на базе ОДН для ряда мощностей от 3кВт до 12кВт.

13. Проведен сравнительный анализ массогабаритных и энергетических характеристик РВУ на базе ОДН с аналогичными тиристорными и транзисторными устройствами.

14. Исследованы формы потребляемого тока многопульсными трансформаторными РВУ на ОДН и показано, что они могут выполнять функцию пассивного корректора коэффициента мощности.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

В рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК Мин. Обр. и Н. РФ:

1. Шевцов, Д.А. Бортовые регулируемые выпрямительные устройства на основе управляемого однообмоточного дросселя насыщения / Шевцов Д.А., Турченко И.С. // Практическая силовая электроника. – 2013. – № 1(49). – С. 37 – 41.

2. Шевцов, Д.А. Однообмоточные дроссели насыщения в авиационных источниках вторичного электропитания / Шевцов Д.А., Турченко И.С. // Вестник Московского авиационного института. – 2013. – № 3 т.20. – С. 145 – 153.

3. Шевцов, Д.А. Моделирование рабочих и аварийных режимов в регулируемом выпрямительном устройстве на основе управляемого однообмоточного дросселя насыщения / Шевцов Д.А., Турченко И.С. // Практическая силовая электроника. – 2013. – № 4(52). – С. 39 – 42.

4. Шевцов, Д.А. Моделирование режимов работы перспективного магнитно–регулируемого выпрямителя с выходным сглаживающим фильтром / Шевцов Д.А., Турченко И.С. // Практическая силовая электроника. – 2014. – №3 (55). – С. 38 – 45.

5. Шевцов, Д.А. Структуры магнитно–регулируемых выпрямителей для перспективных авиационных систем электроснабжения [Электронный ресурс] / Шевцов Д.А., Турченко И.С. // Труды МАИ. – 2014. – №76. – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=50092>.

6. Шевцов, Д.А. Методика проектирования управляемых дросселей авиационных выпрямительных устройств нового поколения / Шевцов Д.А., Турченко И.С. // Вестник Московского авиационного института. – 2015. – № 1 т.22. – С. 122–131.

В других изданиях:

7. Турченко, И.С. Перспективные магнитно–регулируемые выпрямительные устройства для авиации / Турченко И.С., Шевцов Д.А. // 12–я международная конференция «Авиация и космонавтика–2013». Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати. – 2013. – С. 128–130.

8. Турченко, И.С. Разработка перспективного источника питания для авиационной системы электроснабжения / Турченко И.С., Хлебников А.С. // Конкурс научно–технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». Аннотации работ. – Москва: МАИ (НИУ). – 2014. – С. 175.

9. Turchenko, I.S. New prospective topologies of magnetic–regulated rectifiers for aircraft power supply systems / Turchenko I.S., Shevtsov D.A. // Micro/ Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) 2014, 15th International Conference of Young Specialists. IEEE Conference publications. – 2014. – Pp. 468 – 472.

10. Турченко, И.С. Способы управления однообмоточным дросселем насыщения в составе авиационного регулируемого выпрямительного устройства / Турченко И.С., Шевцов Д.А. // 13–я международная конференция «Авиация и космонавтика–2014». Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати. – 2014. – С. 343–345.

11. Турченко, И.С. Перспективное многофазное выпрямительное устройство для авиационной вторичной системы электроснабжения / Турченко И.С., Хлебников А.С., Христолюбов А.А. // Конкурс научно–технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». Аннотации работ. – Москва: МАИ (НИУ). – 2014. – С. 113–115.

12. Турченко, И.С. Анализ перспективных структур авиационных систем электроснабжения / Турченко И.С. // XII Всероссийская научно–техническая конференция «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского». Сборник докладов. – Москва: Издательский дом Академии имени Н. Е. Жуковского. – 2015. – С. 230–235.

13. **Turchenko, I.S.** Analysis of prospective aviation power supply system with multiphase generator and stabilized rectifier / Turchenko I.S., Shevtsov D.A. // Micro/ Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) 2015, 16th International Conference of Young Specialists. IEEE Conference publications. – 2015. – Pp. 490 – 494.

14. Патент на полезную модель RU 135204 U1, МПК H03F 9/06. Стабилизированный источник электропитания / Авторы: Шевцов Д.А., **Турченко И.С.**; правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ). Оpubл. 27.11.2013г. в Бюлл. № 33.

15. **Турченко, И.С.** Регулируемый выпрямитель в перспективной авиационной системе электроснабжения с многофазным генератором / Турченко И.С. // Электропитание. – 2015. – № 1. – С. 6–14.

16. Патент на полезную модель RU 154756 U1, МПК H02M 9/06, H02M 7/539 Стабилизированное выпрямительное устройство / Шевцов Д.А., **Турченко И.С.**; правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ). Оpubл. 10.09.2015 Бюлл. № 25.