

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»
(ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, тел.: +7 (495) 362 75 62,
<http://www.mpei.ru>, e-mail: universe@mpei.ac.ru



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

В.К. Драгунов

« 28 » 10 2016 г.

ОТЗЫВ
ведущей организации

на диссертационную работу Горбунова Романа Леонидовича
**«ИМПУЛЬСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ
С УЛУЧШЕННЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ»,**
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.09.12 – Силовая электроника

Актуальность темы исследования

В настоящее время все большее внимание уделяется повышению энергетической эффективности электротехнического оборудования. В асинхронном электроприводе эта задача решается за счёт управления режимами работы двигателя и привода в целом путём изменения параметров питающего напряжения. Устройство преобразования переменного напряжения позволяет не только поддерживать работу двигателя в оптимальном энергетическом режиме, но и формировать плавные пуско-тормозные режимы работы.

Широко применяемые в промышленности преобразователи переменного напряжения на основе тиристорных схем с фазовым регулированием справляются с возлагаемыми на них функциями, но характеризуются низким качеством электромагнитных процессов, что приводит к дополнительным потерям энергии в нагрузке и создаёт проблемы

в системе электроснабжения. Проблемы, связанные с электромагнитной совместимости таких преобразователей и других нелинейных потребителей энергии, решаются с помощью пассивных или активных фильтрокомпенсирующих устройств, однако более предпочтительным является разработка и применение преобразователей переменного напряжения, функционирование которых не сопровождается существенным ухудшением электромагнитной обстановки в энергосистеме. В этом плане диссертационная работа Горбунова Р.Л. направлена на решение актуальной и значимой для развития российской экономики научно-технической задачи по разработке преобразователя переменного напряжения с улучшенными энергетическими показателями.

Основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 207 источников и двух приложений. Основная часть работы изложена на 235 страницах машинописного текста и 10 страниц приложений, иллюстрируется 113 рисунками и содержит 30 таблиц.

Во введении обоснована актуальность и кратко изложена степень разработанности темы диссертации, обобщены основные научные результаты и выносимые на защиту положения, отмечена теоретическая и практическая значимость работы, приведены сведения о реализации выводов и рекомендаций, представлен краткий обзор структуры диссертации.

В первой главе определены общие и специальные требования, предъявляемые к устройствам преобразования переменного напряжения при функционировании в составе рассмотренных в данной работе электротехнических систем – асинхронного электропривода (ЭП) и системы генерирования электрической энергии (СГЭЭ) на базе синхронного генератора с постоянными магнитами. Описана разработанная классификация преобразователей переменного напряжения (ППН),

основообразующим признаком в которой принят способ регулирования (изменения) выходного напряжения.

Во второй главе приведены результаты математического моделирования и анализа энергетических показателей импульсного понижающего ППН.

В параграфе 2.1 представлена общая структура системы с импульсным понижающим ППН и её модификации в ЭП и в СГЭЭ. Указаны структурные особенности ППН в составе этих двух систем и отличие в его функциональном назначении.

В параграфе 2.2 обобщены результаты структурного анализа и систематизации силовых схем вентильного блока (ВБ) импульсного понижающего ППН. В схемах выделены два структурных уровня, для каждого из которых разработаны математические макромодели, описывающие связь между входными и выходными токами и напряжениями в зависимости от параметров функции управления. Определены и систематизированы показатели базовых схем ВБ и схем ключей переменного тока (КПТ). Предложена новая трёхфазная силовая схема ВБ с коммутацией тока в общей (нулевой) точке нагрузки, определены основные достоинства этой схемы и область применения. Сделаны выводы и даны рекомендации.

В параграфе 2.3 приведены математические модели импульсного понижающего ППН: исходная векторная модель ППН в виде системы дифференциальных уравнений с переменными (разрывными) коэффициентами, представленная во вращающейся системе координат; модель в осреднённых переменных, представленная в синхронной системе координат; и модель для анализа гармонических искажений, представленная в стационарной системе координат. Описаны разработанные компьютерные имитационные модели. Сделаны выводы и даны рекомендации.

В параграфе 2.4 изложены результаты анализа энергетических показателей импульсного понижающего ППН. Анализ выполнен с использованием математических моделей, описанных в параграфе 2.3.

Рассмотрены показатели, характеризующие ППН как потребитель электрической энергии, и показатели, характеризующие ППН как устройство преобразования параметров электрической энергии. Установлены и исследованы зависимости от параметров силовых фильтров полной мощности и энергетических коэффициентов ППН, включая коэффициенты гармонических искажений. Предложено использовать установленные зависимости при проектировании входного и выходного фильтра с обеспечением оптимальных энергетических показателей преобразователя. Оценено влияние несинусоидальности питающего напряжения на показатели гармонических искажений токов и напряжений преобразователя. Представлены результаты аналитического исследования потерь мощности в ВБ преобразователя и результаты теплового моделирования. Отмечена важность повышения КПД силовой схемы и определены основные мероприятия для работы в этом направлении. Сделаны выводы и даны рекомендации.

В параграфе 2.5 приведены результаты сравнительного анализа основных энергетических показателей импульсного понижающего ППН с тиристорным устройством-аналогом и с трёхфазным автономным инвертором напряжения (АИН). Сравнение с тиристорным ППН выполнено по показателям качества потребляемой и преобразуемой энергии, включая показатели гармонических искажений входного/выходного тока и выходного напряжения. В случае АИН предметом сравнения стали показатели качества выходного напряжения.

В параграфе 2.6 рассмотрены вопросы проектирования силовой схемы импульсного понижающего ППН. Приведена разработанная на основе установленных зависимостей программа и методика проектирования силовых фильтров с обеспечением высокого (до 0,99) коэффициента мощности ППН и заданных показателей гармонических искажений в рабочем диапазоне регулирования напряжения и изменения нагрузки. Приведена методика проектирования снабберной цепи, а также описание созданного

специализированного программного приложения C Sim для моделирования тепловых режимов элементов и расчёта энергетической эффективности силовых схем. Перечислены основные критерии выбора частоты коммутации. Сделаны выводы и даны рекомендации.

В параграфе 2.7 изложен разработанный алгоритм управления преобразователем в режиме циклоконвертирования для квазичастотного управления (КЧУ) асинхронным двигателем (АД). Приведены результаты исследования спектрального состава формируемого напряжения, оптимальное значение параметра управления, особенности реализации алгоритма, его достоинства и принципиальные ограничения.

Основные выводы второй главы обобщены в параграфе 2.8.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования импульсного понижающего ППН.

В параграфе 3.1 поставлена цель экспериментального исследования и перечислены задачи.

В параграфе 3.2 приведено описание экспериментальной установки, включающей исследуемый преобразователь напряжения с микропроцессорной системой управления, нагрузку в виде электрических машин и измерительную систему. Приведена силовая схема созданного ППН, его электрические параметры и энергетические показатели.

В параграфе 3.3 изложены результаты экспериментов в виде временных диаграмм токов и напряжений, а также графиков и таблиц со значениями энергетических показателей преобразователя. Выполнена оценка точности установленных аналитических зависимостей и разработанных математических моделей. Продемонстрированы функциональные возможности преобразователя при управлении АД в режиме плавного пуска и КЧУ.

Основные выводы третьей главы обобщены в параграфе 3.4.

В заключении изложены итоги исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

В приложении приведена программа расчёта параметров фильтров и акты внедрения результатов работы.

Диссертация написана чётко и ясно, с большим количеством графического материала, поясняющего и иллюстрирующего соответствующие результаты научных положений и технических решений. Содержание автореферата соответствует основному содержанию диссертации.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 18 печатных работах, включая 6 работ в рецензируемых научных изданиях (из перечня ВАК), получены 1 патент РФ на изобретение и 1 свидетельство РФ на программу для ЭВМ. Все публикации приведены в тексте диссертации. В опубликованных работах достаточно полно отражены материалы диссертационного исследования.

Научная новизна работы

Представленные в диссертационной работе научные результаты являются новыми. Основные научные результаты:

1) Создано и запатентовано **устройство** плавного пуска АД, в основе которого лежит новая силовая схема импульсного понижающего преобразователя с коммутацией тока в общей (нулевой) точке нагрузки и с отдельными параллельными ключами в каждой фазе, характеризующаяся малым количеством управляемых приборов (четыре транзистора) и в 1,7 раз меньшей амплитудой напряжения на ключах.

2) Разработана **математическая модель** ВБ импульсного понижающего преобразователя для анализа вносимых им гармонических искажений и расчёта стандартных показателей искажений, основанная на эквивалентном представлении ВБ в виде двух условно независимых управляемых источников несинусоидального тока и напряжения. Расхождения результатов расчёта коэффициентов искажений входного тока ВБ преобразователя с результатами проведённого эксперимента не превышают 4,4 % (группа гармоник $k=1$) и 9,1 % (группа гармоник $k=2$).

3) Установлены и исследованы **зависимости** полной мощности и энергетических коэффициентов ППН от параметров входного и выходного LC-фильтров, на основе которых разработаны **программа и методика** проектирования фильтров с обеспечением высокого (до 0,99) коэффициента мощности ППН и заданных показателей гармонических искажений в рабочем диапазоне регулирования напряжения и изменения нагрузки.

4) Разработан **алгоритм** управления преобразователем, в котором вектор выходного напряжения формируется посредством периодического импульсного подключения одновременно всех фаз выходной цепи преобразователя к источнику питающего напряжения, и позволяющий переводить преобразователь в режим циклоконвертирования для квазичастотного управления АД.

Теоретическая и практическая значимость работы

1) Создан импульсный ППН мощностью 4 кВА, характеризующийся близким к единице коэффициентом мощности в рабочем диапазоне регулирования напряжения, высоким коэффициентом полезного действия, практически синусоидальными входным и выходным токами, а также оснащённый функциями защиты от аварийных ситуаций и удобным пользовательским интерфейсом. ППН основан на новой силовой схеме, обеспечивающей лучшие технико-экономические показатели, и предназначен для решения практически важных задач в асинхронном электроприводе, включая формирование плавных пуско-тормозных режимов работы двигателя и повышение энергетической эффективности привода в длительных режимах работы двигателя.

2) В результате анализа энергетических показателей ППН определены условия, при которых достигается высокое качество электромагнитных процессов и высокое качество использования преобразовательного устройства. Разработаны программа и методика проектирования силовых фильтров и методика проектирования снабберной цепи.

3) Разработано программное приложение для моделирования тепловых режимов элементов и расчёта энергетической эффективности силовых схем импульсных понижающих преобразователей. Приложение ориентировано на задачи проектирования, оптимизации и сравнительного анализа различных схем ВБ. Результаты моделирования потерь мощности отличаются от экспериментально измеренных в созданном ППН менее чем на 12 %.

4) Разработан алгоритм управления ППН, обеспечивающий устойчивую работу АД на пониженных частотах с независимым регулированием частоты и амплитуды напряжения, бесконтактный реверс двигателя, а также позволяющий выполнять комбинированный пуск двигателя, необходимый в приводах с тяжёлыми условиями пуска.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы подтверждается соответствием полученных научных результатов и выводов общей теории электротехники и электроники, согласованностью с результатами испытаний экспериментального макета ППН, а также положительными решениями патентных экспертиз.

Результаты исследования обсуждались на научных семинарах кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета, кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, кафедры промышленной электроники Национального исследовательского университета МЭИ, кафедры промышленной электроники Томского университета систем управления и радиоэлектроники, кафедры промышленной и медицинской электроники Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) с участием научных сотрудников кафедры электропривода и электрооборудования НИ ТПУ, а также докладывались на Международных конференциях «Автоматизация и прогрессивные технологии в атомной отрасли» (АПТ 2012, г. Новоуральск), «Современные

техника и технологии» (СТТ 2014, г. Томск), конференции молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам (EDM 2014, 2015, 2016, г. Новосибирск).

Реализация результатов работы

Созданный макет импульсного ППН мощностью 4 кВА прошёл испытания ОА «УЭХК» (г. Новоуральск). Испытания проведены на электромашинной установке с асинхронным двигателем 4АС80В4УЗ ($P_{\text{ном}}=1,7$ кВт, $n_{r,\text{ном}}=1425$ об/мин) и генератором постоянного тока П-32 у 4 ($P_{\text{ном}}=1,5$ кВт, $n_{r,\text{ном}}=1450$ об/мин). Целью испытаний являлась проверка функциональных возможностей преобразователя, измерение его основных энергетических показателей, тестирование аварийных защит, оценка возможности и целесообразности промышленного использования. Заключение комиссии: преобразователь переменного напряжения имеет необходимые для применения в промышленных электроустановках энергетические показатели; преобразователь может быть применён в схемах электроснабжения вакуумных насосов установок В-15, В-17, В-18, установке барабанного вакуумного фильтра БОП5-1,8-1К; рекомендовано проработать вопрос о его производстве на предприятиях Новоуральской промышленной площадки.

Предложенные в диссертационной работе методики расчёта входного фильтра импульсного преобразователя переменного напряжения и расчёта энергетической эффективности силовых схем использованы ЗАО «ЭРАСИБ» (г. Новосибирск) при проведении работ по проектированию высоковольтных преобразователей напряжения.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Содержание диссертационной работы Горбунова Р.Л. соответствует научной специальности 05.09.12 – «Силовая электроника».

Замечания по работе

1) В работе числовые значения показателей преобразователя напряжения приведены только для реализации силовой схемы на IGBT-приборах и кремниевых диодах. Однако устройство может проектироваться для разных уровней напряжения и более высоких частот коммутаций, поэтому также представляют интерес достижимые показатели при реализации силовой схемы на MOSFET-приборах, включая приборы на основе материалов SiC и GaN.

2) Сравнительный анализ качества выходного напряжения с АИН выполнен при условии одинаковой частоты коммутации в сравниваемых преобразователях. В таком случае желательна оценка разницы в коммутационных потерях мощности ключей.

3) Активные мощности на входе и выходе экспериментального макета измерены косвенным образом с использованием датчиков тока и напряжения, сигнальных фильтров и с последующей численной обработкой результатов на ЭВМ. В связи с этим погрешность измерения коэффициента полезного действия может быть значительной, но результаты оценки этой погрешности в работе не приведены.

4) Моделирование электромагнитных процессов в устройстве выполнено только для установившихся режимов работы. Режимы включения и срабатывания аварийных защит не рассмотрены.

5) Отмечается, что разработанное устройство является технологичным и может реализовываться в компактном виде. Учитывая структуру силовой схемы сомнений это положение не вызывает, но хотелось бы видеть массагабаритные показатели в сравнении с устройствами-аналогами.

Отмеченные замечания не снижают научную и практическую значимость диссертационной работы.

Заключение

В результате анализа диссертационной работы сделаны следующие выводы:

- 1) Диссертационная работа Горбунова Р.Л. «Импульсный преобразователь переменного напряжения с улучшенными энергетическими показателями» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, обладает научной новизной и практической значимостью, содержит решение важной научно-технической задачи разработки импульсного преобразователя переменного напряжения с улучшенными энергетическими показателями.
- 2) Автореферат соответствует содержанию диссертации и в полной мере отражает её основные положения.
- 3) Основные результаты в достаточной степени отражены в научных трудах соискателя, получили одобрение на научных семинарах и неоднократно докладывались на Международных конференциях.

На основании изложенного считаем, что представленная диссертационная работа по своему уровню, содержанию, новизне и практической значимости полностью соответствует требованиям, предъявляемым к научно-квалификационным работам на соискание учёной степени кандидата технических наук согласно п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении учёных степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации о порядке присуждения ученых степеней от 24.09.2013 г. № 842), а её автор Горбунов Р.Л. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – «Силовая электроника».

Доклад Горбунова Р.Л. по результатам диссертационной работы заслушан, отзыв рассмотрен и принят на заседании кафедры промышленной электроники ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» 27 октября 2016 г., протокол №2.

Доктор техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой промышленной электроники
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«МЭИ», (PanfilovDI@mpei.ru,
тел./факс: +7 (495) 362 74 24)



Панфилов
Дмитрий Иванович

Кандидат техн. наук, ст. преп.,
ученый секретарь кафедры
промышленной электроники
(RashitovPA@mpei.ru,
тел./факс: +7 (495) 362 74 24)



Рашитов
Павел Ахматович