

В диссертационный совет Д.212.173.04,
на базе ФГБОУ ВО «Новосибирский
государственный технический университет»
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н., доцента Гутаева Геннадия Михайловича на диссертационную работу **Домахина Евгения Александровича «АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ФУНКЦИЕЙ БЕЗУДАРНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ НАГРУЗКИ НА ПИТАЮЩУЮ СЕТЬ»**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

1. Структура и объем диссертации

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». Состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 2 приложений. Общий объем работы – 171 страница, 99 рисунков, 17 таблиц и библиографический список из 88 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, отражено современное состояние проблемы, сформулированы цель диссертационной работы и задачи для ее достижения, определены объект и предмет исследования, сформулированы научная новизна и основные результаты, выносимые на защиту, указана практическая значимость результатов работы, приведена информация по апробации работы и публикациям.

Первая глава посвящена анализу современного состояния рынка высоковольтных электроприводов (ВЭП) с асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором (АД) и многоуровневыми преобразователями частоты (МПЧ).

Рассмотрены основные топологии силовых схем ВЭП, выделены их преимущества и недостатки как с эксплуатационной точки зрения, так и с позиции экономических затрат при проектировании ВЭП.

Рассмотрены основные алгоритмы широтно-импульсной модуляции (ШИМ), применяемые в МПЧ, проведен анализ алгоритмов на предмет качества гармонического состава выходного напряжения.

Выбрана и обоснована структура МПЧ для дальнейших исследований – топология с каскадным включением H-мостов.

Вторая глава посвящена разработке и исследованию имитационной модели ВЭП при питании АД от МПЧ по длинной кабельной линии (КЛ).

Подробно рассмотрены процессы регулирования ВЭП работающего на насосный агрегат. Показано влияние параметров КЛ на характеристики ВЭП с точки зрения показателей качества электроэнергии в соответствии с ГОСТ 32144-2013 и ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (МЭК 61000-2-4-94).

Рассмотрены топологии синусных-фильтров (СФ), имеющие практические перспективы для применения в составе ВЭП. Предложены методики выбора параметров СФ для удовлетворения показателей ГОСТ на качество электрической энергии.

Проведен анализ влияния топологий СФ на параметры гармонического состава токов и напряжения МПЧ. Предложена инженерная методика выбора параметров СФ и предельной частоты ШИМ МПЧ.

Глава третья посвящена разработке и исследованию алгоритмов автоматической синхронизации выходного напряжения МПЧ и общепромышленной высоковольтной сети переменного тока с позиции обеспечения безударного перевода АД между источниками питания.

Разработаны два класса алгоритмов: 1) без перекрытия между выходом МПЧ и питающей сетью; 2) с перекрытием между выходом МПЧ и питающей сетью. Предложены и обоснованы электрические схемы ВЭП для двух классов алгоритмов.

К первому классу алгоритмов отнесен алгоритм быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР). Предложены математические условия для перевода нагрузки между источниками питания, а также последовательность действия системы управления и коммутации силовых устройств при реализации разработанного алгоритма. Результат разработки алгоритма – перевод нагрузки между источниками питания за время, не превышающее 100 мс.

Ко второму классу алгоритмов отнесен алгоритм фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и его модификации, а также алгоритм основанный на подходе расширенного фильтра Калмана. Разработаны структурные схемы и сценарии по исследованию данной группы алгоритмов. Результаты исследований обобщены и проанализированы, сделаны выводы о практической ценности каждого из разработанных алгоритмов. Алгоритмы обеспечивают вычисление параметров напряжения за время не превышающее 60 мс.

Глава четвертая посвящена вопросам комплексного исследования электротехнического комплекса ВЭП, состоящего из МПЧ высоковольтного АД и алгоритмов безударного переключения нагрузки без перекрытия и с перекрытием между источниками питания.

Анализ переходных процессов в рассматриваемом электротехническом комплексе с алгоритмом типа БАВР показал следующие результаты: длительность интервала бестоковой паузы составляет 35 мс; кратность бросков сетевого тока и тока АД не превышает уровня $2,5I_n$; кратность бросков электромагнитного момента на валу не превышает $2,3M_n$; просадка частоты вращения АДКЗР – 1.65% от номинальной скорости.

Анализ переходных процессов в рассматриваемом электротехническом комплексе с расширенным алгоритмом фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ-Р) показал следующие результаты: кратность бросков тока МПЧ не превышает уровня $1,3I_n^{\text{МПЧ}}$; кратность бросков тока АД не превышает $1,1I_n^{\text{АД}}$; кратность бросков тока питающей сети не превышает $1,2I_n^{\text{Сети}}$.

В заключении представлены основные результаты диссертационного исследования.

В приложениях представлено свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ, а также содержатся акты внедрения результатов диссертационного исследования в учебный процесс ФГБОУ ВО «НГТУ» и на промышленном предприятии.

По теме диссертационной работы опубликованы 14 печатных работ, 3 из которых – в центральных журналах, рекомендованных списком ВАК, 1 – в трудах научных конференций, индексируемых в наукометрических базах *Web of Science*, *Scopus*, *IEEE*, 10 – в материалах и трудах Всероссийских и международных научных конференций.

2. Актуальность темы диссертации и ее связь с общественными (государственными) программами

Применение преобразователей частоты во многих производственных процессах позволяет существенно сократить затраты на электроэнергию, благодаря чему снижается себестоимость производимой единицы продукции. Более того, применение частотно-регулируемого электропривода для управления технологическими параметрами насосных агрегатов позволяет существенно экономить электрическую энергию, в сравнении с механическими способами изменения их производительности. Все это отвечает задачам государственных программ по энергосбережению и энергоэффективности.

Вместе с тем на сегодняшний день разработка регулируемого электропривода с высоковольтными АД является задачей наиболее актуальной в теории и практике электрического привода вследствие имеющегося разнообразия топологий и алгоритмов управления силовыми полупроводниковыми приборами, а также неразрешенными вопросами электромагнитной совместимости МПЧ с нагрузкой и питающей сетью. К тому же применение МПЧ в составе группового электропривода, в том числе и для насосных агрегатов, имеет большую перспективу. Появляется возможность использования одного МПЧ для регулирования производительности группы электроприводов. Однако для обеспечения безударного переключения АД между МПЧ и питающей сетью необходима разработка отдельных алгоритмов синхронизации напряжений. Эти алгоритмы должны обладать не только статической точностью выравнивания напряжений по амплитуде, частоте и фазе, но и высоким быстродействием, которое позволит поддерживать технологические параметры объекта управления в заданных границах на этапе переключений.

Исходя из выше сказанного, можно сделать вывод, что проблематика частотно-регулируемых высоковольтных электроприводов с функцией безударного переключения АД с МПЧ на питающую сеть и обратно, является актуальной темой для исследования. Разработка алгоритмов синхронизации напряжений является важной и практически значимой задачей.

3. Соответствие диссертации и автореферата паспорту специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Материалы диссертации и автореферата по своему содержанию соответствуют пунктам 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления» и 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях» паспорта специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

4. Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Содержание автореферата соответствует основным положениям и содержанию диссертационной работы и отражает цель, идеи и научные результаты исследования. Автореферат написан литературным языком с использованием терминологии, принятой в данной отрасли науки и техники, стиль изложения – доказательный.

5. Методология и методы исследования

Проведенные исследования основывались на общих положениях теории электропривода, силовой электроники, электрических машин, современной теории автоматического управления, аналитических расчетах на основании аппарата дифференциальных уравнений и методов их численного решения, методов современной теории цифровых систем управления, численном моделировании. Цифровое имитационное моделирование осуществлялось с использованием комплекса программ *MATLAB-Simulink*.

6. Степень обоснованности и достоверности полученных научных положений

Обоснованность и достоверность научных результатов, выводов и решений, полученных в диссертации, обусловлена корректным использованием фундаментальных положений теории электропривода, силовой электроники, теории автоматического управления, планированием и проведением экспериментов, корректностью принятых допущений при постановке задач исследования. Подтверждена обсуждением результатов исследования на двух всероссийских и трех международных научно-технических конференциях.

Достоверность, представленных в диссертационной работе научных положений выводов, подтверждается путем цифрового моделирования разработанных алгоритмов безударного переключения АД с выхода МПЧ на питающую сеть и обратно.

Степень обоснованности и достоверности высокая.

7. Уровень новизны научных положений, выводов и рекомендаций

На основе анализа, систематизации и обобщения научных достижений в таких областях как теория электропривода, теория автоматического управления, силовая и промышленная электроника предложен новый класс алгоритмов в составе высоковольтного частотно-регулируемого электропривода. Диссертационная работа характеризуется следующими основными научными результатами.

1. Разработан и исследован алгоритмический подход быстродействующий автоматический ввод резерва (БАВР) в структуре алгоритмов управления высоковольтным частотно-регулируемым асинхронным электроприводом. Предложенное решение исключает возможность полной остановки электродвигателя при его переводах между источниками питания.

2. Разработаны и исследованы алгоритмы синхронизации выходного напряжения МПЧ на базе подсистем идентификации параметров напряжения с применением подходов фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), его модификаций и расширенного фильтра Калмана, реализованные структуре алгоритмов управления высоковольтным частотно-регулируемым асинхронным электроприводом. Отличительной особенностью алгоритмов, является их способность выполнять полную синхронизацию выходного напряжения высоковольтного частотно-регулируемого электропривода и высоковольтной питающей сети по амплитуде, частоте и фазе за время не более 3-х периодов питающей сети.

3. Впервые в алгоритмах безударного переключения нагрузки между источниками питания учтено наличие возможных несинусоидальных искажений питающей сети. Величина искажений строго согласована с ГОСТ 32144-2013 и ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (МЭК 61000-2-4-94).

Полученные результаты являются новыми.

8. Ценность результатов исследования для науки и практики

1. Разработанные математические модели ВЭП с функцией безударного переключения нагрузки между МПЧ и питающей сетью могут быть использованы при исследовании динамических процессов, протекающих в силовых преобразователях и электродвигателях при реализации электромеханических систем по принципу группового частотного управления, а также в учебном процессе для обучения студентов по направлению 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника», по дисциплине «Автоматическое управление системами мехатроники».

2. Разработанные алгоритмы безударного переключения и методики проектирования топологий и выбора параметров выходных силовых фильтров, могут быть применены при проектировании общепромышленного электропривода с вентиляторным характером нагрузки на валу. Это подтверждается величиной тока при переводе нагрузки с выхода МПЧ на питающую сеть, который не превышает 130% относительно номинального значения.

Научный и практический уровень диссертации характеризуется как высокий.

9. Дискуссионные положения и замечания по диссертации и автореферату

1. На стр. 53 диссертации указано: «Математическая модель АДКЗР, представленная на рисунке 2.3 и составленная в программном пакете *MATLAB*-

Simulink представлена в приложении 1 на рисунке П1.1. Параметры модели приведены в таблице П1.1». Однако этого приложения в работе нет. На это же приложение соискатель ссылается и на стр. 60 диссертации, когда речь заходит об имитационной модели многоуровневого ПЧ с алгоритмом ШИМ со смещением по уровню, утверждая, что она приведена на рисунке П1.2.

2. Из текста диссертации не понятно, каким образом были получены графики переходных процессов в Главе 3 (например, рис. 3.9 – 3.18, 3.20 – 3.23 и т.д.), используемые затем для анализа эффективности алгоритмов идентификации параметров входного напряжения при трех возможных сценариях возмущений.

3. Требуют пояснения численные оценки величины размаха ошибки в определении параметров входного напряжения, определяемые по графикам переходных процессов и представленные в таблицах 3.1, 3.2, 3.3 и т.д. Так размах ошибки в амплитуде проекций напряжения ΔU_d и ΔU_q алгоритма ФАПЧ-СК при наличии искажений входного напряжения по первому сценарию (Таб. 3.1) составляет 0,03 о.е. Величина этих же параметров в алгоритме ФАПЧ-СК с повышением помехоустойчивости (Таб. 3.2) составляет 0,026 о.е.

4. В работе нет функциональных схем систем управления высоковольтным электроприводом, реализующих функцию безударного переключения. На рис. 4.8 предпринята такая попытка, но только в части определения параметров выходного напряжения МПЧ и сети. В тексте на стр. 153 СУ упоминается – «Сполучением команды на выполнение перевода АДКЗР с МПЧ на сеть, либо в обратном направлении, СУ ВЭП активирует алгоритм выполнения предварительной синхронизации». Кроме этого, в Приложении «А» имеется Свидетельство о государственной регистрации программы расчета управляющего воздействия для выполнения безударного переключения ... В каком же блоке СУ работает эта программа?

5. Как известно, применение широтно-импульсной модуляции накладывает ограничения на модуль значения выходного напряжения преобразователя частоты, что может привести к возникновению некомпенсируемой разности между выходным напряжением преобразователя частоты и напряжением сети. Как в данном случае предполагается выполнение безударного перевода?

10. Соответствие диссертации требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013г. №842

Диссертация Домахина Евгения Александровича является законченной научно-квалификационной работой, написанной единолично, в которой содержится решение научно-технической задачи по разработке алгоритмов безударного переключения нагрузки с выхода МПЧ на питающую сеть. В работе изложены авторские оригинальные алгоритмические решения по автоматической синхронизации параметров источников питания. Диссертационная работа содержит совокупность выносимых автором на защиту новых научных результатов и положений, имеющих существенное значение для развития страны. Основные научные результаты диссертации опубликованы в соответствии с требованиями ВАК РФ, доложены и обсуждались на конференциях всероссийского и международного уровня. Заимствованного материала без ссылок на автора и первоисточники не обнаружено.

Диссертация имеет внутреннее единство и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Диссертационная работа «Алгоритмы управления высоковольтным асинхронным электроприводом с функцией безударного переключения нагрузки на питающую сеть» соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а именно п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденное Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (ред. от 01.10.2018).

11. Общее заключение

Представленная диссертационная работа Е.А. Домахина является самостоятельной, законченной научно-квалифицированной работой, обладающей признаками актуальности, новизны и практической значимости. В ней решена важная задача – разработаны и исследованы структуры алгоритмов управления высоковольтным асинхронным электроприводом с функцией безударного переключения нагрузки на питающую сеть, позволяющие реализовывать функцию группового частотного управления в электроприводах общепромышленного назначения.

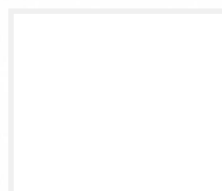
Содержание диссертации соответствует ее названию и поставленным задачам. Результаты исследований представлены в общепринятой для таких работ форме: структурных схем, графиков переходных процессов и таблиц. Основные выводы и заключения сформулированы достаточно полно и отражают суть полученных результатов исследования.

Основные научные результаты диссертации достаточно широко опубликованы. По диссертации имеется 14 печатных работ, 3 из которых – в центральных журналах, рекомендованных списком ВАК. Результаты доложены и обсуждены на конференциях всероссийского и международного уровня и с этих позиций соответствуют требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Диссертация полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата наук.

Выполненные исследования оцениваются как высокие. **Домахин Евгений Александрович** является сформировавшимся ученым и заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Официальный оппонент:
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
«Электроника и электротехника»
Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва»
(ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва»),
тел. +7 (8342) 290-608
Адрес: 430005 Республика Мордовия,
г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68
E-mail: tutaevgm@mail.ru



Тутаев
Геннадий Михайлович

30.08.2022

Отзыв получен 31.08.2022
МЗ / Рыбко МА /

С отзывом ознакомлен
05.09.2022 Д. / Дашкин Е.А. /

Подпись Тутаева Геннадия Михайловича
заверяю:

