

«УТВЕРЖДАЮ»

\_\_\_\_\_ (ой и инновационной  
\_\_\_\_\_ ального  
\_\_\_\_\_ автономного  
\_\_\_\_\_ учреждения высшего  
\_\_\_\_\_ ий государственный  
\_\_\_\_\_ ситет)», кандидат  
\_\_\_\_\_ цент  
Фефелов  
\_\_\_\_\_ 2022 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет» на диссертационную работу Домахина Евгения Александровича «Алгоритмы управления высоковольтным асинхронным электроприводом с функцией безударного переключения нагрузки на питающую сеть», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

На отзыв представлена диссертация «Алгоритмы управления высоковольтным асинхронным электроприводом с функцией безударного переключения нагрузки на питающую сеть», которая состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 174 страницах машинописного текста, содержит 99 рисунков и 17 таблиц, списка литературы из 88 наименований.

#### **Актуальность темы исследования**

Диссертация Домахина Евгения Александровича посвящена вопросу управления высоковольтным асинхронным электроприводом (ВЭП) при переключении электромеханического преобразователя при работе в номинальном режиме от преобразователя частоты на промышленную сеть. В работе задача управления электрическим приводом сформулирована как задача повышения энергоэффективности, связанной с уменьшением потерь при исключении частотного преобразователя и повышением показателей надежности электротехнического комплекса в целом.

Актуальность темы определяется недостаточной изученностью вопросов разработки алгоритмов и устройств автоматического переключения источника питания электропривода при работающем на нагрузку двигателе. Многообразие режимных условий, особенности перегрузки, броски тока, снижение напряжения в момент переключения делают поставленную в диссертации задачу во многом исследовательской, жестко подчиненной требованиям технического задания на разработку электропривода.

В диссертации Домахина Е.А. подробно проанализированы пути и решены задачи, направленные на разработку алгоритмов управления высоковольтным электроприводом, а именно:

- определены практические рекомендации о необходимости наличия и топологии выходных силовых фильтров в структуре высоковольтного частотно-регулируемого электропривода;

- разработан алгоритм переключения высоковольтного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКЗР) с выхода высоковольтного преобразователя частоты на питающую сеть за время не более 100 мс;

- разработан алгоритм идентификации параметров напряжения сети и выходного напряжения преобразователя частоты за время не более 60 мс;
- разработан алгоритм безударного перевода нагрузки с перекрытием с выполнением предварительной синхронизации напряжений источников с применением алгоритмов идентификации.

**Объект исследования:** высоковольтный частотно-регулируемый асинхронный электропривод с вентиляторным характером нагрузки.

### **Оценка структуры и содержания работы**

**Краткая характеристика работы.** Содержание и структура диссертационной работы находятся в логическом единстве и соответствуют поставленной цели исследования. Диссертация написана ясно, использованная терминология и стиль соответствуют общепринятым нормам.

Во введении дана общая характеристика работы: актуальность, цель и основные задачи исследования, научная новизна и практическая значимость, методы исследований, достоверность, реализация и внедрение полученных результатов, апробация и публикации, основные защищаемые положения. Приведены структура и краткое содержание диссертации.

В первой главе диссертации рассматриваются способы повышения энергоэффективности высоковольтного электропривода, приводятся топологические схемы многоуровневых инверторов напряжения. Приведен обзор и анализ применяемых векторных и скалярных алгоритмов широтно-импульсной модуляции, показана актуальность модификации скалярного алгоритма широтно-импульсной модуляции на основе H-ячеек для исключения неравномерной загрузки ячеек и, как следствие, снижение потерь и повышение срока эксплуатации высоковольтного инвертора напряжения.

Вторая глава диссертации посвящена математическому моделированию высоковольтного электропривода. Разработаны имитационные модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и многоуровневого преобразователя частоты. Отмечается, что наличие кабельной линии в составе высоковольтного электропривода при питании от многоуровневого преобразователя частоты приводит к гармоническим искажениям напряжений и токов. Для уменьшения составляющих высших гармоник проведено исследование, выполнен анализ для различных топологических схем синус фильтров и даны рекомендации к их применению.

В третьей главе рассматриваются алгоритмы идентификации параметров выходного напряжения многоуровневого преобразователя частоты и питающей сети при переключениях нагрузки. Представлена актуальность применения быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР) для исключения бросков напряжения, тока и электромагнитного момента двигателя. Приведены критерии безударного переключения БАВР и на их основе даны рекомендации для реализации алгоритма работы. Кроме применения БАВР указывается на возможность переключения питания асинхронного двигателя от частотного преобразователя к сети с перекрытием, т.е. режим, при котором частотный преобразователь работает на нагрузку параллельно с сетью. Возникающий в этом случае уравнивающий ток может быть снижен при соблюдении ряда условий, одним из которых является синхронизация напряжения преобразователя частоты с напряжением сети. Диссертантом рассмотрен алгоритм идентификации параметров напряжения с применением метода фазовой автоподстройки частоты. В рамках проведенных исследований показано, что наличие высших гармонических составляющих в спектре напряжения, а также составляющих обратной и нулевой последовательности может приводить к ошибкам в работе алгоритма для идентификации параметров напряжения, что приведет к неустойчивой работе устройства переключения питания в целом. Предложен новый подход для идентификации параметров напряжения на основе применения метода симметричных составляющих и на его основе построены алгоритмы с предварительной

синхронизацией в структуре фазовой автоподстройки частоты в неподвижной и вращающейся системах координат.

В четвертой главе диссертации рассмотрены варианты высоковольтных электроприводов с рассмотренными в третьей главе алгоритмами переключения питания асинхронного двигателя от многоуровневого преобразователя частоты к промышленной сети.

В заключении обобщены результаты проведенных в рамках диссертационной работы исследований.

### **Новизна полученных результатов**

1. Предложен и реализован подход быстродействующий автоматический ввод резерва (БАВР) в структуре алгоритмов управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом. Алгоритм БАВР исключает возможность полной остановки электродвигателя при его переводах между источниками питания.

2. Разработан алгоритм синхронизации выходного напряжения многоуровневого ПЧ на базе подсистем идентификации параметров напряжения с применением подходов фазовой автоподстройки частоты 9 (ФАПЧ), его модификаций и расширенного фильтра Калмана, реализованный в структуре алгоритмов управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом. Алгоритм отличается от известных тем, что способен осуществлять полную синхронизацию выходного напряжения высоковольтного ЧРП и высоковольтной питающей сети по амплитуде, частоте и фазе с применением алгоритмов идентификации, производящих вычисление оценки параметров напряжений 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).

### **Степень достоверности результатов исследования**

Достоверность полученных Домахиным Е.А. результатов базируется на методах математического моделирования, обусловлена корректностью постановки задач, адекватностью используемых при исследованиях математических моделей, методов и алгоритмов, апробацией как предварительных, так и окончательных результатов диссертационной работы.

Значимость для науки и практики результатов диссертационного исследования заключается в том, что они на стадии разработки высоковольтного электропривода на основе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором внедрить алгоритмы и выполнить техническую реализацию устройств безударного переключения асинхронного двигателя от преобразователя частоты на промышленную сеть.

Результаты работы приняты к внедрению на ООО «Сибирь-мехатроника», Новосибирская область. В рамках разработки и производства станций частотного управления СЧ400 и СЧ500, а также проектирования автоматизированных систем с частотно регулируемым электроприводом приняты к внедрению: алгоритмы идентификации параметров выходного напряжения преобразователя частоты и питающей сети, алгоритм автоматической синхронизации выходного напряжения преобразователя частоты и питающей сети с функцией безударного переключения нагрузки между источниками питания; методика выбора топологии и расчета параметров синусного фильтра при работе преобразователя частоты на длинную кабельную линию.

Кроме этого, результаты исследования могут быть применены в учебном процессе при изучении дисциплины «Автоматическое управление системами мехатроники» в рамках

подготовки студентов по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также в научно исследовательской работе бакалавров и магистров.

Общее количество публикаций 14 печатных работ, 3 из которых – в центральных журналах, рекомендованных списком ВАК, 1 – в трудах научных конференций, индексируемых в наукометрических базах Scopus, Web of Science, IEEE, 10 – в материалах и трудах всероссийских и международных научных конференций.

### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертация соответствует специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы», поскольку результаты представляют собой законченные научные и технические исследования и разработки в области устройств безударного переключения питания электропривода.

В работе присутствуют результаты, соответствующие областям исследования паспорта специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» по техническим наукам: 3 – разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления, 4 – исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

В рамках работы изложены новые научно обоснованные технические положения и технологические решения по разработке алгоритмов управления высоковольтным асинхронным электроприводом с функцией безударного переключения нагрузки на питающую сеть:

- предложен подход к разработке устройства быстродействующего автоматического ввода резерва в структуре управления высоковольтным асинхронным электроприводом;
- предложены алгоритмы идентификации параметров напряжения с синхронизацией;
- предложены подходы к реализации высоковольтного электропривода на основе быстродействующего автоматического ввода резерва и с переключением с перекрытием и алгоритмом фазовой подстройки частоты.

### **Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных автором диссертации**

Предложены и обоснованы критерии необходимости установки силовых фильтров на выход высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного электропривода. Даны практические рекомендации по выбору топологии силового фильтра, а также предельных значениях частоты коммутации силовых полупроводниковых транзисторов многоуровневого инвертора. Предлагаемые к внедрению алгоритмы безударного переключения нагрузки между источниками питания обеспечивают уравнивающий ток не превышающий величины 130% от номинального значения.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты исследований диссертанта могут быть использованы на предприятиях, связанных с разработкой асинхронного электропривода, в составе которых используются частотные преобразователи для пуска и выхода на установившийся асинхронного двигателя. Материалы диссертации могут найти применение, например, в НТК «Криогенная техника» (г. Омск), НПФ «Мехатроника-ПРО» (г. Томск), ООО «Сибирь-мехатроника» (Новосибирская область). Результаты исследований могут быть востребованы в научной работе и образовательном процессе в профильных высших учебных заведениях.

### Замечания по диссертационной работе и автореферату

1. В диссертации не представлены макетные образцы и технические характеристики разработанных устройств безударного переключения нагрузки, а также результаты экспериментальных исследований, полученных на их основе.
2. Не рассмотрен вопрос об экономическом эффекте от внедрения разработанных алгоритмов управления высоковольтным асинхронным электроприводом с функцией безударного переключения нагрузки на питающую сеть.
3. Во второй главе диссертации на стр. 53 приводится математическая модель АДКЗР формулы (2.3) в неподвижной системе координат  $\alpha$ - $\beta$ . Однако, указанная математическая модель и структурная схема не содержат составляющие  $\alpha$  и  $\beta$ .
4. В диссертации не приводится оценка влияния различных топологий высоковольтных преобразователей частоты на надежность и КПД электропривода в целом.
5. В диссертации не приводятся значения мощности предлагаемых фильтров высших гармонических составляющих напряжения, что позволило бы оценить экономический эффект.
6. В тексте диссертации на стр. 155 приводится значение индуктивности токоограничивающего реактора, указывается что при данном значении амплитуда уравнивающего тока не превышает 20% от номинального тока преобразователя частоты, однако, не приводится методика для расчета уравнивающего тока, не указаны нормативные требования к нему, что не позволяет оценить 20% превышение амплитудного значения. Также не представлена осциллограмма уравнивающего тока, что не позволяет провести сравнительный анализ с током АДКЗР.
7. В диссертации разработано несколько алгоритмов управления высоковольтным асинхронным приводом с функцией безударного переключения нагрузки на питающую сеть, однако государственную регистрацию имеет только один алгоритм.
8. В тексте диссертации и автореферате имеют место отступления от общепринятых электротехнических терминов, например, понятия о двойной синхронной системе координат.

### Заключение

Задачи, рассмотренные в диссертационной работе являются актуальными. Предложены алгоритмы безударного переключения высоковольтного электропривода на промышленную сеть, основанные на идентификации параметров напряжения. Алгоритмы переключения могут быть реализованы в устройствах быстродействующего автоматического ввода резерва.

Практическая реализация разработанных алгоритмов возможна в следующих областях: производство высоковольтного электропривода на основе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Указанные замечания не снижают научной ценности представленной диссертации в целом. Диссертация Домахина Евгения Александровича на соискание ученой степени кандидата технических наук является законченной научно-исследовательской работой, выполненной самостоятельно на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Работа выполнена на актуальную тему, имеет научную новизну, теоретическую и практическую значимость.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы», а также требованиям пункта 9 «Положения о

присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

Уровень и количество публикаций автора, отражающих основные полученные результаты соответствуют пунктам 11 и 13 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842.

Работа аккуратно оформлена. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертация Домахина Евгения Александровича «Алгоритмы управления высоковольтным асинхронным электроприводом с функцией безударного переключения нагрузки на питающую сеть», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» является завершённой научно-квалификационной работой. Новые научные результаты, полученные соискателем, имеют существенное значение в развитие страны.

Работа соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», принятого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а Домахин Евгений Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Отзыв составлен по результатам обсуждения диссертационной работы Домахина Евгения Александровича на заседании кафедры «Электрическая техника» ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет» 30 августа 2022 года (протокол заседания №1).

Отзыв составлен:

Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Электрическая

А.В. Бубнов

Кандидат технических наук, доцент к  
«Электрическая техника»

А.А. Татевосян

Подпись доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Электрическая техника» Бубнова А.В. и кандидата технических наук, доцента кафедры «Электрическая техника» Татевосяна А.А. удостоверяю:

Ученый секретарь ученого совета

А.Ф. Немцова

Сведения о лице, утвердившем отзыв ведущей организации на диссертацию:

Фефелов Василий Федорович, проректор по научной и инновационной деятельности, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», кандидат химических наук, доцент

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет: 644050, Россия, г. Омск, проспект Мира, 11, телефон +7 3812 65-34-07, E-mail: [info@omgtu.ru](mailto:info@omgtu.ru), сайт: <http://www.omgtu.ru>.

Отзыв получен 01.09.2022 г. М / Дубинко М.А.  
С Отзывом Ознакомлен 02.09.2022 Д / Домахин Е.А.