

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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 представлены диссертация общим объемом 174 страницы машинописного текста и автореферат объемом 20 страниц. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 88 источников, содержит 99 рисунков и 17 таблиц. Имеются свидетельства о государственной регистрации программы и Акты внедрения результатов работы. Диссертация работа выполнена в ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

Актуальность темы диссертационной работы

Одним из направлений повышения эффективности работы электротехнических систем предприятий, содержащих высоковольтные приводы (ВЭП), является оснащение их современными устройствами частотного регулирования. При этом перевод асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АДКЗР), находящихся в номинальном режиме работы между источниками энергии требует разработки специальных алгоритмов, поскольку при его выполнении неизбежны переходные процессы, сопровождающиеся ударными токами, бросками электромагнитного момента, резкими изменениями технологических параметров, выходящими за аварийные пределы.

В системах электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий эксплуатируется значительная доля полупроводниковой преобразовательной техники, в том числе частотно-регулируемый привод (ЧРП) переменного тока, который существенно оказывает влияние на работу электрооборудования и приводит к ухудшению условий его эксплуатации.

Автором поставлена и решена задача при выполнении переключения питания высоковольтного АДКЗР между выходом ПЧ и питающей сетью дополнительно учитывать перегрузочную способность ПЧ по току, расчетные значения токов короткого замыкания и уставки релейной защиты, а также уставки технологических защит. При переключении АДКЗР ни один из указанных параметров не должен выходить за уровни ограничения.

Существующие алгоритмы и методики выполнения безударного переключения АДКЗР между ПЧ и сетью на настоящий момент рассмотрены и представлены не в полном объеме. Поэтому актуальность диссертационной работы налицо.

Анализ содержания диссертации и автореферата и их соответствия установленным требованиям.

В первой главе автором в достаточном объеме дана классификация высоковольтных электроприводов с выделением долей регулируемого привода, принципов и функциональных схем их построения. Приведены обобщенные характеристики зарубежных и российских многоуровневых преобразователей частоты (МПЧ), выполненных по топологии инвертора с каскадным включением Н-мостов, как получившая достаточное распространение на современном рынке высоковольтных электроприводов производственных и технологических установок и агрегатов.

Автором особое внимание уделено алгоритмам широтно-импульсной модуляции (ШИМ), направленным на формирование выходного напряжения, обеспечивающим наименьшие показатели гармонических искажений, а также наименьшие коммутационные потери, проведен сравнительный анализ скалярных алгоритмов ШИМ. Показано, что разработка новых векторных алгоритмов ШИМ в настоящее время является крайне актуальной задачей, позволяющей наиболее полно использовать преимущества от применения МПЧ в составе высоковольтного электропривода.

Во второй главе диссертантом разработана математическая модель высоковольтного электропривода на базе МПЧ с каскадным включением Н-мостов. Автором выполнена разработка имитационной модели привода на базе АДКЗР с вентиляторным моментом нагрузки на валу, с питанием от МПЧ с каскадным включением Н-мостов, для изучения рабочих процессов в системе, на основании которой разработаны практические рекомендации о необходимости наличия и топологии выходных синусных фильтров (СФ) в структуре привода, влияния кабельных линий на коэффициент гармонических искажений напряжения в соответствии с ГОСТ 32144-2013 и ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (МЭК 61000-2-4-94).

Предложены и обоснованы критерии необходимости установки силовых фильтров на выход высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного привода, даны практические рекомендации по выбору топологии силового фильтра, а также предельных значениях частоты коммутации силовых полупроводниковых транзисторов многоуровневого инвертора напряжения. Рассмотрены топологии СФ и методики выбора их параметров.

В третьей главе приведены алгоритмы и сделан их анализ для выполнения безударного переключения ВЭП с заданными ограничениями на броски переменных, лежащими в диапазонах, обеспечивающем такое переключение. Алгоритмы отличаются от известных тем, что способны осуществлять полную синхронизацию выходного напряжения высоковольтного ЧРП и питающей сети по амплитуде, частоте и фазе за время не более 3 периодов питающей сети. Показано, что алгоритм фазовой автоподстройки частоты с двойным интегрированием обладает наилучшими показателями в части определения частоты входного напряжения. Автором реализован подход быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР) в составе алгоритмов управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом, который исключает возможность полной остановки электродвигателя при его переводах между источниками питания.

Показано, что алгоритм фазовой автоподстройки частоты с фильтром Калмана способен осуществлять полную синхронизацию выходного напряжения высоковольтного ЧРП и высоковольтной питающей сети по амплитуде, частоте и фазе за время не более 1 периода питающей сети, что способствует сохранению приводов в работе при кратковременных нарушениях в питающих сетях.

В четвертой главе выполнено исследование разработанных алгоритмов БАВР и расширенного алгоритма фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ-Р) в составе высоковольтного асинхронного частотно-регулируемого электропривода при его работе на «вентиляторную» нагрузку; алгоритмов безударного переключения в составе электропривода с асинхронным двигателем и с питанием от МПЧ.

В ходе исследования переходных процессов определено, что алгоритм БАВР выполняет перевод привода между выходом МПЧ и питающей сетью со длительностью интервала бестоковой паузы 35 мс. Показано, что при применении алгоритма БАВР кратность бросков сетевого тока и тока АДКЗР не превышает уровня $2,51I_{\text{номАДКЗР}}$, а кратность бросков электромагнитного момента на валу не превышает $2,3M_{\text{номАДКЗР}}$. Предложенная структура ВЭП с функцией безударного переключения асинхронного двигателя между выходом МПЧ и питающей сетью ограничивает кратность бросков тока на уровне меньше $1,3I_{\text{ном}}$.

На основании анализа диссертационной работы можно сделать вывод, что тема диссертации соответствует п. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления» и п.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. Автореферат в целом достаточно полно отражает выполненные исследования и полученные результаты. В диссертации подробно раскрыты положения, вынесенные на защиту, предложенные решения новы и хорошо аргументированы. Структура диссертации обладает внутренним единством, текст написан грамотным языком и качественно оформлен.

Научная новизна диссертационной работы

В представленной диссертационной работе получен ряд результатов, обладающих научной новизной. Наиболее значимыми из них являются следующие:

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

2. Выполнен структурно-параметрический синтез, проведены исследования алгоритмов безударного переключения нагрузки между преобразователем частоты и питающей сетью с применением алгоритмов идентификации параметров на базе подходов фазовой автоподстройки частоты, его модификаций и расширенного фильтра Калмана. Полученные путем моделирования закономерности типовой силовой схемы ВЭП обобщены для использования промышленных предприятий с ЧРП.

3. В предложенных алгоритмах безударного переключения нагрузки между источниками питания учтено наличие возможных несинусоидальных искажений питающей сети, что позволило обеспечить выполнение требований ГОСТ 32144-2013 и ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (МЭК 61000-2-4-94).

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертации, определяется корректным использованием методов математического моделирования процессов, совпадением расчетных и экспериментальных результатов, подтвержденных в ходе моделирования научно-исследовательских и хозяйственно-договорных работ.

Практическая ценность работы:

1. Результаты работы внедрены в ООО «Сибирь-механотроника» при производстве серийной продукции «Станции частотного управления серий СЧ400 и СЧ500», что подтверждено Актом использования работы.

2. Даны практические рекомендации по выбору топологии силового фильтра, предельных значений частоты коммутации силовых полупроводниковых транзисторов многоуровневого инвертора в предложенных

алгоритме и структуре высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного привода.

Соответствие положений, вынесенных на защиту, материалам диссертации. На основании анализа содержания диссертационной работы, ее научной новизны и практической ценности можно заключить, что вынесенные на защиту положения полностью соответствуют содержанию диссертации, научно обоснованы и вносят существенный вклад в решение задач обеспечения непрерывной работы высоковольтных частотно-регулируемых электроприводов с вентиляторным характером нагрузки.

Публикации и апробация положений диссертационной работы

По теме диссертации автором опубликовано четырнадцать печатных работ, из которых три представлены статьями в рекомендованных ВАК изданиях, 1 работа по перечню Scopus, а все остальные – тезисами докладов к всероссийским и международным конференциям. Апробация основных положений диссертационной работы проходила на всероссийских и отраслевых конференциях. Автором получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Замечания по диссертации и автореферату

1. В используемой автором классической схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором допускается не учитывать эффект вытеснения тока в роторе. В то же время в работе исследуются режимы пуска АД на холостом ходу и с нагрузкой. Поясните как в общем случае должен учитываться эффект вытеснения тока в роторе.

2. Вами предложены рекомендации по применению выходных силовых фильтров в составе высоковольтного электропривода для исключения влияния гармонических искажений тока и напряжения. Каким образом на практике предлагается это реализовать?

3. В последнее время в узлах с двигательной нагрузкой используются статические вар генераторы SVG, которые по сравнению с конденсаторными установками компенсации реактивной мощности сохраняют работоспособность при уровне гармоник напряжения THDu до 25% и не подвержены перегрузкам, обладают существенно более высоким быстродействием. Если их применить совместно с Вашим алгоритмом и схемотехникой, то как изменились бы рекомендации результатов диссертации на практике.

4. Для реализации условий безударного переключения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором Вами предложен алгоритм БАВР, изложенный в главе 3 и определены требованиями к основным параметрам (напряжения и фазе, т.е. углу). На чем основан выбор $U_{\text{доп}} = 0,8$ о.е. и $\Delta\psi_{\text{доп}}$ равный значению, лежащему в диапазоне от -15; до +15 электрических градусов.

5. Чем обоснован выбор Вами сценариев влияния несимметрии и несинусоидальности питающего напряжения на работу алгоритма ФАПЧ-СК в системах промышленного электроснабжения с частотно-регулируемыми асинхронными приводами.

6. В диссертации имеется ряд описок и несоответствий: на стр. 49 дважды повторяется табл. 2.2, неверно указана ссылка на параметры КЛ; уравнения (2.1) и схема замещения АД используют разные обозначения параметров; момент сопротивления по-разному обозначен на стр. 53 и 54; вывод на стр. 64 следовало бы сделать для значений от 0,4 до 1,0.

Общая оценка работы

Изучение представленных соискателем материалов позволяет оппоненту сделать следующие выводы. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. Диссертационная работа вносит определенный вклад в область знаний, охватываемых данной научной специальностью. По объектам исследования выполненная работа соответствует формуле специальности: «В рамках научной специальности объектами изучения являются электротехнические комплексы и системы генерирования электрической энергии, электроснабжения, электрооборудования...». Область исследований соответствует пункту 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления» и пункту 4 паспорта специальности: «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Диссертационная работа обладает научной новизной и возможностью практического применения результатов. Основные положения диссертационной работы своевременно опубликованы автором, в том числе, в ведущих рецензируемых изданиях. Автореферат диссертации в достаточной мере раскрывает основное содержание работы. Диссертация и автореферат изложены понятным техническим языком и надлежащим образом оформлены.

Заключение

На основании анализа диссертации и автореферата оппонент делает заключение, что диссертационная работа в целом удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, действующим «Положением о присуждении ученых степеней». В соответствии с пунктом 9 «Положения о присуждении ученых степеней» от 24.09.2013 г. работа может быть квалифицирована как решение задачи, имеющей существенное значение для развития методической базы повышения надежности и эффективности промышленных электротехнических систем с высоковольтным частотно-регулируемым электроприводом. Автор диссертационной работы **Домахин Евгений Александрович** заслуживает присуждения ему ученой степени

кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, доцент,
управляющий проектами
ООО «НПК Промир»

Валерий Михайлович Пупин

10.08.2022

Подпись заверяю, директор
ООО «НПК Промир», к.т.н.

Анатольевич Жуков

Общество с ограниченной ответственностью
Почтовый адрес: 111020, г. Москва,
Официальный сайт: <http://www.npkp.com>
E-mail: vpupin@npkpromir.com
Тел.: +7(495) 979-89-44

офис 405
[com](http://www.npkp.com)

Отзыв получен 29.08.2022 МП / Давыдов МА
с отзывами ознакомились 20.08.2022 РП / Давыдов Е.А.