

*На правах рукописи*



Домахин Евгений Александрович

**АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ  
АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ФУНКЦИЕЙ БЕЗУДАРНОГО  
ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ НАГРУЗКИ НА ПИТАЮЩУЮ СЕТЬ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель:** **Котин Денис Алексеевич,**  
кандидат технических наук, доцент.

**Официальные оппоненты:** **Пупин Валерий Михайлович,**  
доктор технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «НПК Промир» (г. Москва), администрация, управляющий проектами;

**Тутаев Геннадий Михайлович,**  
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» (г. Саранск), кафедра «Электроники и электротехники», заведующий кафедрой.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет» (г. Омск).

Защита диссертации состоится «16» сентября 2022 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д.212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073 г. Новосибирск, пр-т. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического и на сайте организации [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» июля 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
канд. техн. наук, доцент



Максим Александрович Дыбко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Высоковольтные электроприводы (ВЭП) находят разнообразное число применений в промышленности. Среди которых возможно выделить такие направления, как электроприводы (ЭП) нефтеперекачивающих и компрессорных станций при транспортировке углеводородов и газа; электроприводы мощных вентиляционных агрегатов и дымососов в различных отраслях народного хозяйства; электроприводы насосных установок; тяговые электроприводы в железнодорожном транспорте; электроприводы шахтных подъемных машин; электроприводы прокатных станов и др. применения.

Среди ВЭП большой (более 100 кВт) и средней (менее 100 кВт) мощностей распространение получили асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором (АДКЗР), асинхронные электродвигатели с фазным ротором (АДФР) и синхронные электродвигатели (СД).

В настоящее время около 85% высоковольтных электроприводов являются электроприводами для насосных агрегатов (НА), конвейерных лент, вентиляционных установок и компрессоров, для которых характерна плавно изменяющаяся нагрузка, из которых 97% являются нерегулируемыми. Изменение технологических параметров работы нерегулируемых ВЭП осуществляется традиционными способами: дросселирование, применение поворотных направляющих лопаток, клапанов регулирования расхода. Указанные способы имеют достаточно низкий КПД. Применение регулируемых ВЭП для этих механизмов способно значительно сократить эксплуатационные затраты, при этом срок окупаемости от установки регулируемого ВЭП может составлять от одного года до двух с половиной лет.

Довольно часто механизмы такого типа выполняют работу в точке номинальной производительности с номинальными параметрами питающего напряжения электродвигателя. В таких режимах работы предпочтительно питание электродвигателя (АДКЗР, АДФР) напрямую от сети, что повышает энергоэффективность ВЭП. Среди низковольтных ЭП на базе АДКЗР распространение получил подход станций группового (частотного) управления (СГУ), когда один ПЧ управляет группой агрегатов, поочередно запуская их в работу и выполняя регулирование.

Следовательно, с целью повышения энергоэффективности ЭП необходимо выполнять перевод приводного электродвигателя с питания от ПЧ на питание от сети. Однако, перевод АДКЗР, находящегося в номинальном режиме работы между источниками энергии требует разработки специальных алгоритмов, поскольку при его выполнении неизбежны переходные процессы, сопровождающиеся ударными токами, бросками электромагнитного момента АДКЗР, резкими изменениями технологических параметров, выходящими за аварийные пределы. Существующие среди производителей алгоритмы перевода приводных АДКЗР между выходом ПЧ и сетью раскрываются неполностью, не предоставляются ограничения на применение данных подходов.

При выполнении переключения питания высоковольтного АДКЗР между выходом ПЧ и питающей сетью необходимо 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.

### **Степень разработанности темы исследования**

Изучению вопросов повышения энергоэффективности, разработки и построения систем ВЭП большое внимание уделено в работах: Анучина А.С., Виноградова А.Б., Харитоновна С.А., Берестова В.М., Носа О.В., Bin Wu, Rodriguez J., Gorakumar K., Kougo S., Liserre M. Вопросы повышения энергоэффективности ЭП НА и вентиляционных установок на базе АДКЗР подробно рассматриваются в работах Лезнова Б.С., Борцова Ю.А., Глазырина А.С. Однако, проблемы выполнения безударного переключения АДКЗР в составе ВЭП между ПЧ и сетью на настоящий момент рассмотрены и представлены не в полном объеме.

В соответствии с указанной проблематикой были сформулированы следующие цели и задачи диссертационной работы.

**Целью диссертационной работы** является разработка и исследование алгоритмов синхронизации выходного напряжения высоковольтного частотно-регулируемого электропривода с напряжением общепромышленной сети переменного тока, пригодных для осуществления безударного перевода нагрузки между источниками питания.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе должны быть решены следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ существующих на рынке систем высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного электропривода. Выбрать и обосновать структуру высоковольтного ПЧ для реализации разрабатываемых алгоритмов управления.

2. Сформулировать набор практических рекомендаций о необходимости наличия и топологии выходных силовых фильтров в структуре высоковольтного частотно-регулируемого электропривода с целью обеспечения коэффициента гармонических искажений напряжения не хуже, чем в ГОСТ 32144-2013 и ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (МЭК 61000-2-4-94).

3. Разработать и исследовать алгоритм переключения высоковольтного АДКЗР с выхода многоуровневого высоковольтного ПЧ на питающую сеть, обеспечивающий перевод нагрузки за время не более 100 мс. Разработанный алгоритм должен соответствовать подходу – переключение без перекрытия.

4. Разработать и исследовать алгоритмы идентификации параметров напряжения сети и выходного напряжения многоуровневого ПЧ, обеспечивающих вычисление параметров напряжения за время не более 60 мс.

5. Разработать и исследовать алгоритм безударного перевода нагрузки с выхода высоковольтного многоуровневого ПЧ на сеть и обратно, позволяющий обеспечить бесперебойную работу технологической установки. Разработанный алгоритм должен соответствовать подходу – переключение с перекрытием с выполнением предварительной синхронизации напряжений источников с

применением алгоритмов идентификации. Время перехода между источниками питания должно быть не более уставки на время разгона при выполнении плавного пуска АДКЗР от высоковольтного ПЧ, превышение величины тока электродвигателя относительно номинального значения – не более 30%.

**Объектом исследования** являются высоковольтные частотно-регулируемые асинхронные ЭП с вентиляторным характером нагрузки.

**Предметом исследования** являются алгоритмы безударного переключения нагрузки, обеспечивающие бесперебойную работу технологических установок.

**Научная новизна** основных результатов диссертационной работы заключается в следующем:

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 (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 частотно-регулируемого электропривода 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).

#### **Теоретическая и практическая значимость**

Предложены и инженерно обоснованы критерии необходимости установки силовых фильтров на выход высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного ЭП. 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 не превышение уравнивающего тока величины 130% от номинального значения, следовательно, могут находить свое применение в общепромышленном электроприводе переменного тока с вентиляторным характером нагрузки на валу.

#### **Методы исследования**

Для решения поставленных задач применяются методы современной теории ЭП, методы современной теории автоматического управления, аналитические расчеты на основании аппарата дифференциальных уравнений и методов их численного решения, методов современной теории цифровых систем управления. Работоспособность разработанных алгоритмов подтверждается методами

цифрового имитационного моделирования в программном комплексе MATLAB-Simulink.

**На защиту выносятся следующие основные результаты:**

1. Обоснование топологии высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного ЭП, пригодной для применения в установках и технологических процессах общепромышленного назначения, в особенности с вентиляторным характером нагрузки.

2. Последовательность действий и методика выбора силовых выходных фильтров при проектировании высоковольтных частотно регулируемых ЭП.

3. Структура, способ реализации и результаты исследований алгоритма перевода нагрузки между источниками питания типа БАПР.

4. Структурно-параметрический синтез и результаты исследований алгоритмов безударного переключения нагрузки между преобразователем частоты и питающей сетью с применением алгоритмов идентификации параметров на базе подходов ФАПЧ, его модификаций и расширенного фильтра Калмана.

**Реализация результатов работы.** Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, приняты к применению в следующих направлениях: преобразователях частоты ЭП насосных и вентиляционных агрегатов ООО «Сибирь-Мехатроника», а также используются в учебном процессе Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).

Результаты работы также были использованы при выполнении:

1. Хоздоговорной НИОКР «Разработка и экспериментальная отладка алгоритма контроля за частотой ЭДС асинхронного двигателя при исчезновении напряжения питания преобразователя частоты» с ООО «Сибирь-Мехатроника», 2021 г.;

2. Хоздоговорной НИР «Разработка и исследование цифровых моделей для анализа эффективности существующих и вновь проектируемых технических решений по компенсации провалов напряжения» с ООО «Системы накопления энергии», 2019 г.;

3. Гранта РФФИ «Аспиранты» №20-38-90185 «Разработка принципов проектирования и управления энергоэффективным высоковольтным асинхронным электроприводом с функцией безударного переключения нагрузки на питающую сеть» в 2020-2022 гг.

4. Гранта РФФИ «Научное наставничество» №20-38-51007 «Разработка принципов построения и алгоритмов управления автономной гибридной энергоустановкой с искусственным интеллектом для выравнивания нагрузок тяговых подстанций РЖД» в 2020-2022 гг.

**Степень достоверности работы**

Полученные в ходе выполнения исследования теоретические и научно-прикладные результаты подтверждаются корректной постановкой задач, применением широко известных допущений, результатами вычислительных экспериментов, выполненных методом имитационного моделирования в распространенном для исследований программном комплексе, а также результатами научно-исследовательских и хозяйственно-договорных работ.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях по итогам научной работы: XIV Всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (ДНДС-2021), г. Чебоксары, 2021 г; XVII Международной конференции «Электроприводы переменного тока» (ЭППТ-2018), г. Екатеринбург, 2018 г.; Международной научно-технической конференции студентов и молодых ученых «Молодежь. Наука. Технологии» (МНТК-2017), г. Новосибирск, 2017 г.

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликованы 14 печатных работ, 3 из которых – в 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.

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора в научные работы, опубликованные в соавторстве с научным руководителем, заключается в постановке частных задач на проведение диссертационного исследования; выполнении расчетов, поиске и разработке алгоритмов управления и методик их структурно-параметрического синтеза; исследовании разработанных алгоритмов методом имитационного моделирования; анализе полученных результатов. В остальных работах, опубликованных в соавторстве, автор выполняет постановку задач исследования, выбор методов их решения и анализ результатов.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы, состоящий из 88 наименований, и 2 приложения. Общий объем работы составляет 174 страниц, включая 99 рисунков и 17 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлены связанные с тематикой работы научные проблемы и актуальность. Сформулированы цели и задачи, применяемые методы исследований. Приведены основные положения, выносимые на защиту, реализация результатов работы, а также сведения о теоретической и практической значимости результатов диссертации.

**Первая глава** диссертационной работы посвящена рассмотрению и анализу рынка ВЭП. В главе рассмотрены основные подходы и требования к построению структур ВЭП, получивших широкое распространение в промышленности. Приведено описание принципов работы СГУ. Рассмотрены основные топологии многоуровневых преобразователей частоты (МПЧ). Выполнены анализ современного международного и отечественного рынка МПЧ, анализ распространенности топологий, выпускаемых отечественными и зарубежными производителями. В главе рассмотрены основные способы широтно-импульсной модуляции (ШИМ), применяемые для формирования выходного напряжения МПЧ.

Приведены особенности построения систем управления ШИМ МПЧ, влияние способов реализации скалярной ШИМ на гармонический состав выходного напряжения МПЧ.

Произведено обоснование выбора топологии МПЧ. В дальнейших главах при выполнении исследований рассматривается топология МПЧ с каскадным включением Н-мостов.

**Вторая глава** работы посвящена разработке имитационной модели ВЭП на базе АДКЗР вентиляторным моментом нагрузки на валу и питанием от МПЧ по каскадной схеме с Н-мостами по кабельной линии (КЛ). Выполнена разработка имитационной модели ВЭП с питанием АДКЗР от МПЧ с каскадным включением Н-мостов по КЛ. Разработаны имитационные модели МПЧ с алгоритмами ШИМ со смещением по уровню (ШИМ-СУ) и ШИМ со смещением по фазе (ШИМ-СФ).

Произведена оценка влияния КЛ на показатели качества электрической энергии в соответствии с ГОСТ 32144-2013 и ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (МЭК 61000-2-4-94). Имитационная модель КЛ представлена в виде каскадного соединения  $\pi$ -секций в количестве  $N$ .

Рассмотрены распространенные в промышленном ВЭП топологии синусных фильтров (СФ) и методики выбора их параметров для удовлетворения показателей качества электрической энергии ВЭП требованиям ГОСТ 32144-2013 и ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (МЭК 61000-2-4-94). Электрические схемы, рассматриваемых в работе СФ по топологиям: синус фильтр (СФ); СФ с активным сопротивлением ( $RLC$ -СФ); каскадный СФ приведены на рисунке 1.

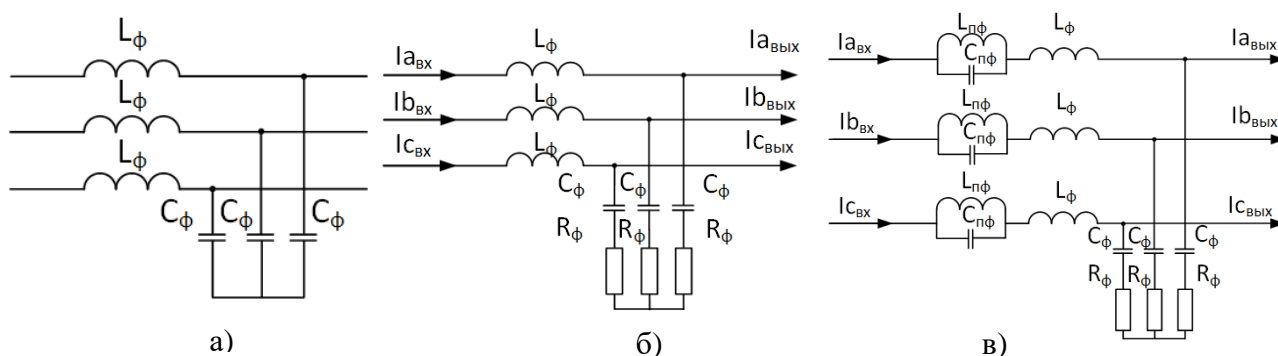


Рисунок 1 – Электрические схемы рассматриваемых в работе топологий СФ:  
а) СФ; б)  $RLC$ -СФ; в) каскадный СФ

Результаты имитационного моделирования для рассматриваемой системы без применения синусных фильтров и с применением СФ, представленных выше топологий, в части значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих для токов и напряжений приведены в таблице 1.

На основании проведенного анализа и результатов имитационного моделирования в работе были предложены практические рекомендации о необходимости наличия и топологии выходных силовых фильтров в структуре высоковольтного частотно-регулируемого электропривода с целью обеспечения коэффициента гармонических искажений напряжения не хуже, чем в ГОСТ 32144-2013 и ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (МЭК 61000-2-4-94). Предложены инженерные



рекомендации по расчету и выбору параметров силовых фильтров и предельной частоты коммутации МПЧ.

Таблица 1 – Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих исследуемой системы

Вариант	$U_{МПЧ}^m$ , В	$K_{U_{МПЧ}}^и$ , %	$I_{МПЧ}^m$ , А	$K_{I_{МПЧ}}^и$ , %	$U_{ад}^m$ , В	$K_{U_{ад}}^и$ , %	$I_{ад}^m$ , А	$K_{I_{ад}}^и$ , %	$U_{кл}^m$ , В	$K_{U_{кл}}^и$ , %
Без фильтров	7679	5,63	129,2	16,03	7489	9,11	134,1	3,19	См. $U_{МПЧ}^m$	См. $K_{U_{МПЧ}}^и$
СФ	7676	5,74	126,0	38,96	7173	6,65	134,2	3,00	7671	3,25
RLC- СФ	7679	5,63	127,3	12,52	7173	4,85	134,2	2,71	7667	3,22
Каскадный СФ	7679	5,63	123,5	5,84	7464	4,85	129,9	2,71	7654	2,77

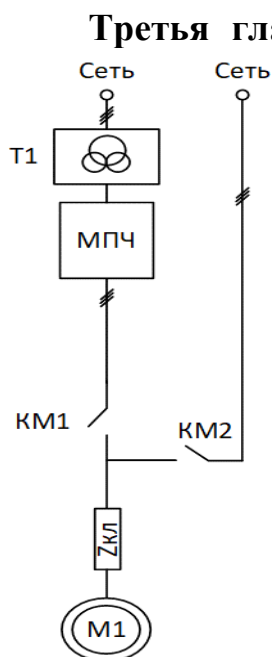


Рисунок 2 – Однолинейная электрическая схема ВЭП с функцией безударного переключения АДКЗР на базе алгоритма БАВР

останов АДКЗР.

Перевод АДКЗР с сети на МПЧ выполняется аналогично, с учетом обратной логики коммутации силовых выключателей в схеме.

Сказанное выше, записывается в виде выражений для условий безударного переключения АДКЗР с алгоритмом БАВР:

**Третья глава** посвящена вопросам разработки алгоритмов безударного переключения АДКЗР в составе ВЭП. Сформулированы требования к выполнению безударного переключения АДКЗР.

На рисунке 2 приведена электрическая схема, реализующая функцию безударного переключения АДКЗР в составе ВЭП с применением подхода БАВР. Задачей алгоритма БАВР является выполнение безударного перевода АДКЗР между МПЧ и сетью и в обратном направлении. Перевод АДКЗР с МПЧ на сеть производится в следующей последовательности:

1. По достижению ВЭП номинального режима работы и получении команды на выполнение перевода АДКЗР, запускается алгоритм БАВР.

2. Формируется команда на отключение выключателя (контактора) МПЧ КМ1. По факту отключения КМ1 запускается алгоритм оценки параметров напряжения выбегающего АДКЗР, для прогнозирования момента времени на формирование управляющей команды на выключатель (контактор) КМ2. АДКЗР, отключенный от МПЧ, оказывается в режиме выбега под действием момента сопротивления нагрузки.

3. Алгоритм оценки параметров напряжения с учетом собственного времени включения КМ2 формирует упреждающую команду на его включение с учетом критериев выполнения безударного переключения. В случае удовлетворения этих критериев выполняется подключение АДКЗР к сети. В противном случае осуществляется полный

$$\begin{cases} U_{\text{АДКЗР}} \geq U_{\text{доп}} \\ |\Delta\psi_{\text{АДКЗР-И}}| \leq |\Delta\psi_{\text{доп}}| \end{cases}$$

где значения  $U_{\text{АДКЗР}}$  и  $\Delta\psi_{\text{АДКЗР-И}}$  могут быть определены из соотношений:

$$\begin{cases} U_{\text{АДКЗР}}(nT) = \sqrt{U_{\text{АДКЗР}\alpha}(nT)^2 + U_{\text{АДКЗР}\beta}(nT)^2} \\ \Delta\hat{\psi}_{\text{АДКЗР-И}}(nT) = \Delta\hat{\psi}_0 + \Delta\hat{\omega}(nT) \cdot nT + \Delta\hat{\varepsilon}(nT) \cdot \frac{(nT)^2}{2} \end{cases} \quad (1)$$

где  $U_{\text{АДКЗР}\alpha}$ ,  $U_{\text{АДКЗР}\beta}$  – компоненты вектора напряжения АДКЗР в системе координат  $(\alpha, \beta)$ , В;  $\Delta\hat{\psi}_{\text{АДКЗР-И}}(nT) = \hat{\psi}_{\text{АДКЗР}}(nT) - \hat{\psi}_{\text{И}}(nT)$  – оценка разности фаз между векторами напряжений, рад;  $\Delta\hat{\psi}_0$  – оценка фазового рассогласования в начальный момент времени, рад;  $\Delta\hat{\omega}(nT)$  – оценка относительной угловой скорости векторов напряжений, рад/с;  $\Delta\hat{\varepsilon}(nT)$  – оценка относительного углового ускорения векторов напряжений, рад/с<sup>2</sup>;  $n$ ,  $T$  – порядковый номер отсчета и постоянная времени дискретизации. Второе уравнение системы (1) выполняет прогнозирование разности фаз.

На рисунке 3 представлена функциональная схема по выполнению безударного переключения АДКЗР с предварительной синхронизацией векторов напряжений МПЧ и сети и переключением электродвигателя с перекрытием. В отличие от схемы на рисунке 2, переключение осуществляется с наличием этапа, когда АДКЗР оказывается подключенным и к сети, и к выходу МПЧ. Такое переключение в дальнейшем именуется безударное переключение с перекрытием.

Безударный перевод АДКЗР с МПЧ на сеть в данном случае выполняется в соответствии со следующим алгоритмом:

1. По достижению ВЭП номинального режима работы и получении команды на выполнение перевода АДКЗР, запускается алгоритм синхронизации выходного напряжения МПЧ с напряжением сети;
2. После успешного выполнения процесса синхронизации напряжений, формируется команда на включение выключателя (контактора) сети КМ2;
3. После выдержки паузы на завершение кратковременных переходных процессов при подключении выключателя (контактора) сети КМ2, формируется команда на отключение выключателя (контактора) МПЧ КМ1;
4. Происходит шунтирование токоограничивающих реакторов  $L_p$ , за счет формирования команды на включение выключателя (контактора) КМ3.

В случае выполнения обратного перевода АДКЗР с сети на МПЧ последовательность действий аналогична алгоритму, представленному выше, с учетом логики переключения выключателей (контакторов) соответствующих начальному подключению АДКЗР к сети.

Токоограничивающие реакторы  $L_p$  в случае применения СФ на выходе МПЧ могут быть исключены из схемы, если алгоритмы синхронизации обеспечивают величину рассогласования, достаточную для ограничения уравнивающего тока между МПЧ и сетью на требуемом для МПЧ уровне за счет последовательно включенных индуктивностей СФ.

Для реализации предварительной синхронизации напряжений в главе произведена разработка алгоритмов идентификации параметров изображающих векторов напряжений с применением алгоритма фазовой автоподстройки частоты в синхронной системе координат (ФАПЧ-СК), его модификаций, а также алгоритма на основе расширенного фильтра Калмана (С-РФК).

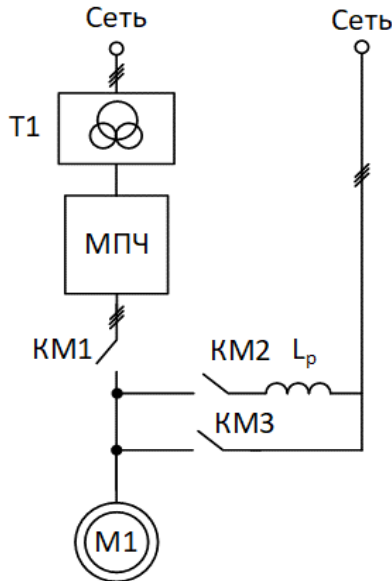


Рисунок 3 – Однолинейная электрическая схема ЭП с функцией безударного переключения АДКЗР между МПЧ и сетью на базе подхода безударного переключения с перекрытием

Структурная схема алгоритма ФАПЧ, выполняющего идентификацию параметров изображающего вектора трехфазной системы напряжений, приведена на рисунке 4.

На рисунке 4: ПК1 – преобразователь координат из трехфазной системы координат ABC в неподвижную систему координат  $(\alpha, \beta)$ ; ПК2 – преобразователь координат, выполняющий преобразование поворота (преобразование Парка-Горева) из системы координат  $(\alpha, \beta)$  во вращающуюся синхронно с входным изображающим вектором систему координат  $(d, q)$ ; ПИ – пропорционально-интегральный регулятор. Ориентация вращающейся системы координат выполняется за счет работы алгоритма ФАПЧ, вычисляющего фазу входного напряжения. Переходные процессы в контуре ФАПЧ-СК при входном фазном напряжении в трехфазной системе координат  $(A, B, C)$ , изображенном на рисунке 5, приведены на рисунке 6. На рисунке 6 представлены переходные процессы по входному напряжению в системе координат  $(d, q)$ , вычисленной частоте входного напряжения, вычисленной развертке фазы вектора входного напряжения, с учетом периодичности ее изменения в диапазоне от 0 до  $2\pi$ .

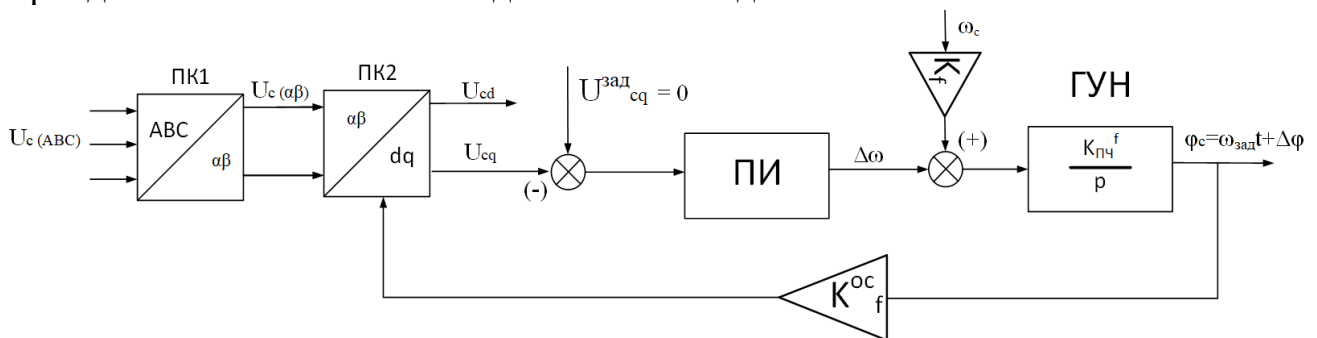


Рисунок 4 – Структурная схема контура вычисления фазы входного трехфазного напряжения с применением алгоритма ФАПЧ-СК

Для наглядности работы алгоритма в момент времени  $t = 0,15$  с выполнено ступенчатое изменение частоты сигнала с 50 Гц до 60 Гц, в момент времени  $t = 0,25$  с частота напряжения восстановлена до исходного уровня в 50 Гц. Максимальное перерегулирование процесса по определению частоты – 32,8 %, время

регулирования составляет 34 мс, что менее двух периодов питающей сети, статическая ошибка отсутствует.

В работе произведена оценка устойчивости алгоритма ФАПЧ-СК в условиях наличия несинусоидальных и несимметричных искажений в составе сетевого напряжения в соответствии с ГОСТ 32144-2013. Исследование устойчивости алгоритма выполнялось для трех сценариев: Сценарий 1 – наличие несимметрии входного напряжения; Сценарий 2 – наличие несинусоидальности входного напряжения; Сценарий 3 – одновременное наличие несимметрии и несинусоидальности входного напряжения.

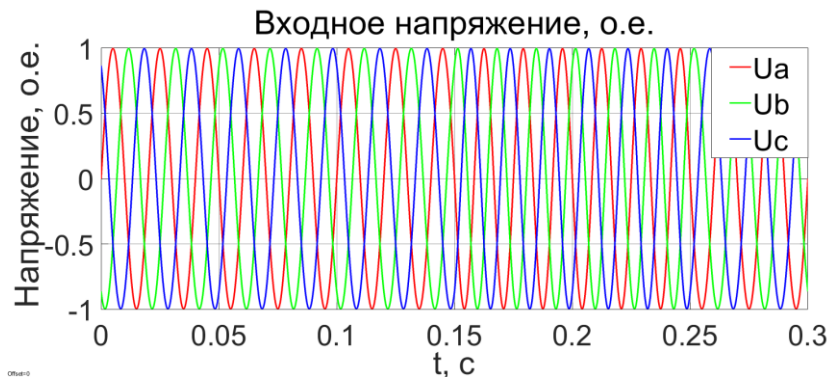


Рисунок 5 – Оциллограмма входного фазного напряжения в системе координат  $(A, B, C)$  со ступенчатым изменением частоты (в момент времени  $t = 0,15$  с выполнено ступенчатое изменение частоты сигнала с 50 Гц до 60 Гц, в момент времени  $t = 0,25$  с частота напряжения восстановлена до исходного уровня в 50 Гц.)

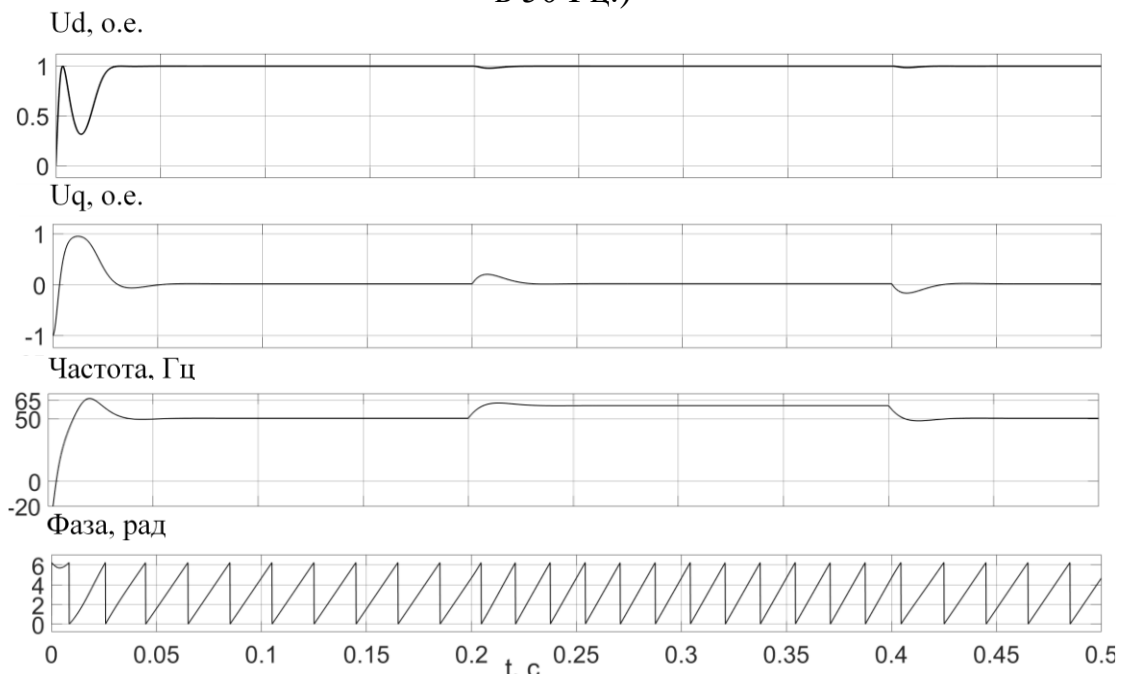


Рисунок 6 – Переходные процессы по входному напряжению в системе координат  $(d, q)$ , вычисленной частоте входного напряжения, вычисленной развертке фазы вектора входного напряжения, с учетом периодичности ее изменения в диапазоне от 0 до  $2\pi$

Проведенное исследование показало, что как отдельное, так и совместное наличие несимметрии и несинусоидальности оказывает негативное влияние на работу алгоритма ФАПЧ-СК, приводя к ошибке в идентификации параметров изображающего вектора входного напряжения. При этом, наибольшая величина ошибки наблюдается для случая одновременного наличия несимметрии и несинусоидальности (Сценарий 3).

Повышение помехоустойчивости алгоритма ФАПЧ-СК достигается переносом оценки частоты с выхода ПИ-регулятора на выход интегрального канала ПИ-регулятора. При этом, время регулирования алгоритма при определении частоты входного напряжения, изображенного на рисунке 5, возрастает на 11,8% (38 мс), а максимальное перерегулирование снижается до величины – 8,8% по сравнению с исходным случаем ФАПЧ-СК.

Модернизацией рассмотренного алгоритма ФАПЧ-СК является алгоритм ФАПЧ-СК2. В его основе представление входного напряжения методом симметричных составляющих в виде изображающих векторов прямой, обратной и нулевой последовательностей. В ФАПЧ-СК2 выполняется ориентация двух систем координат: одна вращается синхронно с изображающим вектором прямой последовательности (система  $(d, q)^+$ ), а другая – с вектором обратной последовательности (система  $(d, q)^-$ ):

$$\mathbf{U}_{dq+} = \begin{pmatrix} U_{d+} \\ U_{q+} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{d+}^* \\ U_{q+}^* \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos(2\theta) & \sin(2\theta) \\ -\sin(2\theta) & \cos(2\theta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \overline{U_{d-}} \\ \overline{U_{q-}} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{U}_{dq-} = \begin{pmatrix} U_{d-} \\ U_{q-} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{d-}^* \\ U_{q-}^* \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos(-2\theta) & \sin(-2\theta) \\ -\sin(-2\theta) & \cos(-2\theta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \overline{U_{d+}} \\ \overline{U_{q+}} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{U}_{dq+}$  ( $\mathbf{U}_{dq-}$ ) – изображающий вектор напряжения прямой (обратной) последовательности в системе координат  $(d, q)^+$  ( $(d, q)^-$ );  $\begin{pmatrix} U_{d+}^* \\ U_{q+}^* \end{pmatrix}$  – вектор напряжений компенсированный от перекрестной связи с вектором обратной последовательности;  $\begin{pmatrix} U_{d-}^* \\ U_{q-}^* \end{pmatrix}$  – вектор напряжений компенсированный от перекрестной связи с вектором прямой последовательности;  $T_\Phi$  – постоянная времени фильтра нижних частот (ФНЧ), с.

Время регулирования алгоритма при определении частоты входного напряжения, изображенного на рисунке 5, снижается на 2,94%, и составляет 33 мс, а максимальное перерегулирование снижается до величины – 6,2% по сравнению с исходным случаем ФАПЧ-СК.

Алгоритм ФАПЧ с двойным интегрированием (ФАПЧ-ДИ), аналогичен ФАПЧ-СК2, с тем отличием, что ориентация изображающих векторов выполняется в неподвижной системе координат  $(\alpha, \beta)$ . Изображающие вектора напряжения прямой  $\mathbf{U}_{\alpha\beta+}$  и обратной последовательностей  $\mathbf{U}_{\alpha\beta-}$ :

$$\mathbf{U}_{\alpha\beta+} = T_{\alpha\beta+} \cdot \mathbf{U}_{\alpha\beta}, \quad (4)$$

$$\mathbf{U}_{\alpha\beta-} = T_{\alpha\beta-} \cdot \mathbf{U}_{\alpha\beta}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{U}_{\alpha\beta}$  – вектор входного напряжения в системе координат  $(\alpha, \beta)$ ;  $T_{\alpha\beta+} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{pmatrix}$ ,  $T_{\alpha\beta-} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{pmatrix}$  – матрицы перехода прямой и обратной последовательностей;  $q = e^{-j\frac{\pi}{2}}$  – оператор поворота.

Следовательно, для выделения прямой и обратной последовательности в изображающем векторе входного напряжения, необходимо получить смещенные на 90 электрических градусов проекции входного напряжения. Смещение фазы вектора синусоидальной функции оператором  $q$  эквивалентно операции интегрирования.

Время регулирования алгоритма ФАПЧ-ДИ при определении частоты входного напряжения, изображенного на рисунке 5, составляет 51 мс, а максимальное перерегулирование – 11,9%.

Расширенный алгоритм ФАПЧ (ФАПЧ-Р) является модернизацией стандартного алгоритма ФАПЧ-СК. Алгоритм позволяет вычисление оценок амплитуды и фазы изображающих векторов прямой и обратной последовательностей  $U1$  и  $U2$ , при этом для его работы не требуются преобразователи координат.

Вычисление оценки напряжения прямой последовательности в составе входного напряжения в осях  $(\alpha, \beta)$  выполняется по соотношениям:

$$\begin{aligned} \widehat{y_{p\alpha}} &= \frac{1}{3} (U_{0a} \sin \varphi_a + U_{0b} \sin(\varphi_b + \frac{2\pi}{3}) + U_{0c} (\sin(\varphi_c - \frac{2\pi}{3})) = & (6) \\ &= (y_a^\perp - \frac{1}{2} y_b^\perp - \frac{\sqrt{3}}{2} y_b - \frac{1}{2} y_c^\perp + \frac{\sqrt{3}}{2} y_c) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \widehat{y_{p\beta}} &= \frac{1}{3} (U_{0a} \cos \varphi_a + U_{0b} \cos(\varphi_b + \frac{2\pi}{3}) + U_{0c} (\cos \varphi_c - \frac{2\pi}{3})) = & (7) \\ &= (y_a^\perp - \frac{1}{2} y_b^\perp + \frac{\sqrt{3}}{2} y_b - \frac{1}{2} y_c^\perp - \frac{\sqrt{3}}{2} y_c), \end{aligned}$$

где  $\widehat{y_{p\alpha}}$ ,  $\widehat{y_{p\beta}}$ , – оценки проекций изображающего вектора входного напряжения в абсолютных единицах;  $y_a^\perp, y_b^\perp, y_c^\perp$  – оценки проекций изображающего вектора входного напряжения в абсолютных единицах, смещенные на 90° по фазе.

Время регулирования алгоритма ФАПЧ-Р при определении частоты входного напряжения, изображенного на рисунке 5, составляет 8 мс, а максимальное перерегулирование – 5%, что ниже в сравнении с ФАПЧ-СК.

Расширенный фильтр Калмана (РФК), подход, применяемый в системах автоматического управления для выполнения фильтрации и вычисления оценок величин, недоступных прямому измерению.

Модель объекта управления в переменных состояния имеет вид:

$$\begin{cases} x_1(n+1) = x_1(n) \cos(x_5(n)) - x_2(n) \sin(x_5(n)) \\ x_2(n+1) = x_1(n) \sin(x_5(n)) + x_2(n) \cos(x_5(n)) \\ x_3(n+1) = x_3(n) \cos(x_5(n)) - x_4(n) \sin(x_5(n)), \\ x_4(n+1) = x_3(n) \sin(x_5(n)) + x_4(n) \cos(x_5(n)) \\ x_5(n+1) = (1 - \varepsilon)\omega \end{cases} \quad (8)$$

где  $x_1(n) = \sqrt{2}U_\alpha \cos(\omega nT + \varphi_\alpha)$ ;  $x_2(n) = \sqrt{2}U_\alpha \sin(\omega nT + \varphi_\alpha)$ ;  $x_3(n) = \sqrt{2}U_\beta \cos(\omega nT + \varphi_\beta)$ ;  $x_4(n) = \sqrt{2}U_\beta \sin(\omega nT + \varphi_\beta)$ ;  $x_5(n) = \omega$ ;  $\varepsilon \ll 1$  – малый параметр, характеризующий темп изменения частоты входного сигнала.

Время регулирования алгоритма С-РФК при определении частоты входного напряжения, изображенного на рисунке 5, составляет 6,87 мс, а максимальное перерегулирование – 47,2%.

Проведенный анализ выявил, что наличие гармонических составляющих в спектре напряжения оказывает большее влияние, чем наличие напряжения обратной последовательности. Из предложенных Сценариев изменения напряжения, *Сценарий 3* вносит наибольший вклад в ошибки рассматриваемых алгоритмов. В таблице 2 приведены сравнительные показатели величины размаха ошибки определения частоты входного напряжения для всех алгоритмов при изменении входного сигнала по *Сценарию 3*.

Таблица 2 – Сравнительный анализ качества работы алгоритмов синхронизации (для Сценария 3)

Алгоритм	Размах $\Delta f$ , о.е.
ФАПЧ-СК	0,156
ФАПЧ-СК с повышением помехоустойчивости	0,116
ФАПЧ-СК2	0,0112
ФАПЧ-ДИ	0,005
ФАПЧ-Р	0,004
С-РФК	0,11

Анализ таблицы 2 доказывает, что наилучшими показателями в части определения частоты входного напряжения обладают алгоритмы ФАПЧ-ДИ и ФАПЧ-Р.

**Четвертая глава** работы посвящена исследованию разработанных алгоритмов безударного переключения в составе ВЭП на базе АДКЗР с питанием от МПЧ. Исследование произведено с применением имитационного моделирования в программном комплексе MATLAB-Simulink. Выполнен анализ процессов при выполнении безударного переключения для ВЭП с алгоритмом БАВР. На рисунке 7 приведены переходные процессы при выполнении переключения АДКЗР с выхода МПЧ на сеть. При этом процессы представлены для следующих переменных: линейное напряжение и ток МПЧ в системе координат  $(A, B, C)$ ; линейное напряжение и ток сети в системе координат  $(A, B, C)$ ; линейное напряжение и ток АДКЗР в системе координат  $(A, B, C)$ , измеренных на входе КЛ.

Переключение выполняется в следующей последовательности: АДКЗР находится в номинальном режиме работы с «вентиляторной» нагрузкой на валу, в момент времени  $t=3$  с формируется команда на переключение АДКЗР с выхода МПЧ на сеть и запускается алгоритм БАВР, по факту завершения работы алгоритма БАВР и переходных процессов ВЭП, связанных с переключением, АДКЗР переходит в номинальный режим работы с «вентиляторной» нагрузкой на валу при

питании от сети. Полное время отключения выключателей (контакторов) КМ1, КМ2, применяемых в схеме ВЭП составляет – 50 мс, полное время включения – 30 мс. Параметры зоны допустимого переключения:  $U_{\text{доп}} = 0,8U_{\text{ном}}$  и  $|\Delta\psi_{\text{доп}}| = 30^\circ$ .

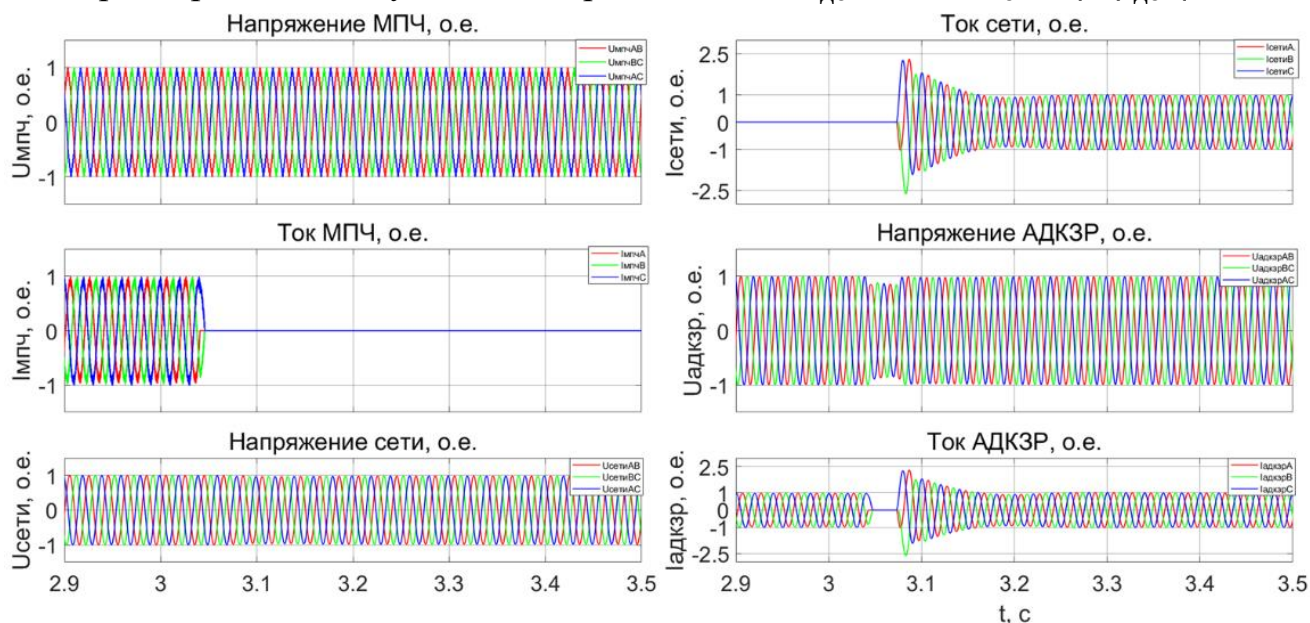


Рисунок 7 – Переходные процессы по напряжению и току МПЧ, напряжению и току Сети, напряжению и току АДКЗР в системе координат (А, В, С) при выполнении безударного переключения алгоритмом БАВР

Анализ переходных процессов показывает, что алгоритм БАВР выполняет перевод АДКЗР между выходом МПЧ и питающей сетью. Длительность интервала бестоковой паузы составляет 35 мс. При этом кратность бросков сетевого тока и тока АДКЗР не превышает уровня  $2,51I_{\text{ном}}^{\text{АДКЗР}}$ , кратность бросков электромагнитного момента на валу не превышает  $2,3M_{\text{ном}}^{\text{АДКЗР}}$ , частоты вращения АДКЗР – 1.65%.

Процессы при обратном переводе АДКЗР будут аналогичными рассмотренным. Важно отметить необходимость учета кратности бросков тока АДКЗР при выборе полной мощности МПЧ, силовой коммутационной аппаратуры.

Переключение с перекрытием выполняется на базе схемы, изображенной на рисунке 3, либо в схеме с СФ, если величина индуктивного сопротивления СФ и алгоритмы синхронизации обеспечивают точность синхронизации напряжений МПЧ и сети, обеспечивающую ограничение уравнивающего тока между МПЧ и сетью на уровне, не превышающем перегрузочной способности МПЧ.

Для выполнения безударного переключения АДКЗР в составе ВЭП и осуществления процесса предварительной синхронизации напряжений необходимо, чтобы изображающие вектора  $U_{\text{мпч}}$ ,  $U_{\text{сети}}$  совпадали по модулю, частоте и фазе. Следовательно, для выполнения синхронизации по каждому из указанных параметров изображающего вектора необходимы отдельные контура стабилизации. Оценка значений параметров изображающих векторов напряжений  $U_{\text{мпч}}$ ,  $U_{\text{сети}}$  выполняется алгоритмами идентификации, рассмотренными ранее. В диссертации предлагается функциональная схема частотно-регулируемого ВЭП с функцией безударного переключения.



С получением команды на выполнение перевода АДКЗР с МПЧ на сеть, либо в обратном направлении, СУ ВЭП активирует алгоритм выполнения предварительной синхронизации. Контуры регулирования модуля, частоты и фазы совместно с алгоритмами идентификации выполняют синхронизацию напряжения МПЧ и сети. По достижению условий синхронизации происходит перевод АДКЗР на питание от сети (МПЧ, в случае обратного перевода с сети на МПЧ).

На рисунке 8 приведены переходные процессы при выполнении перевода АДКЗР в составе ВЭП с выхода МПЧ на сеть, для величин, аналогичных представленным на рисунке 7. Осциллограммы на рисунке 8а отображены для момента времени от 3,8 с до 4,2 с. На рисунке 8б – для момента времени от 10,4 с до 11 с.

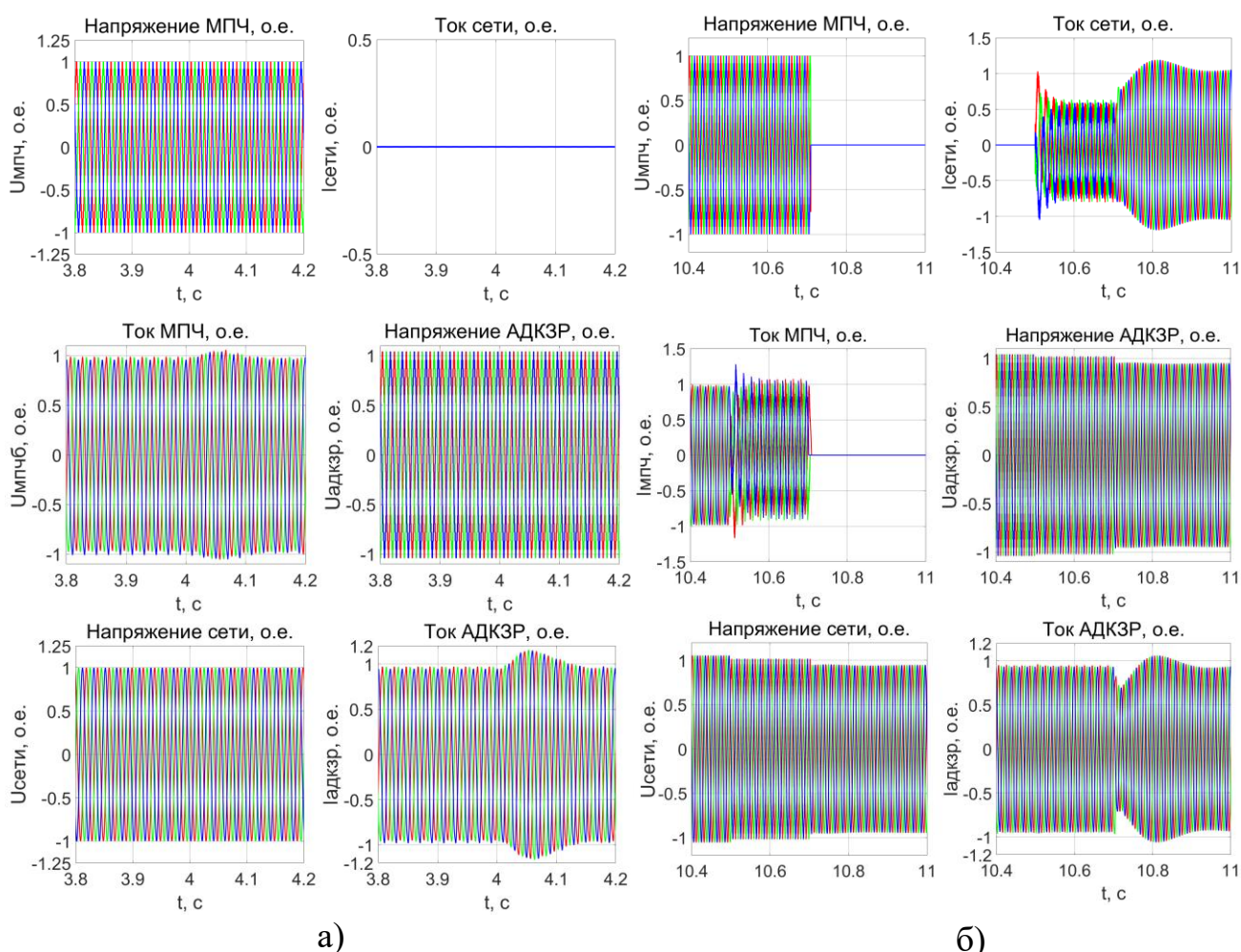


Рисунок 8 – Переходные процессы по напряжению и току МПЧ, напряжению и току Сети, напряжению и току АДКЗР в системе координат  $(A, B, C)$  при выполнении безударного переключения с предварительной синхронизацией: а) этап предварительной синхронизации; б) перевод нагрузки

Предложенная структура ВЭП с функцией безударного переключения АДКЗР между выходом МПЧ и питающей сетью обеспечивает переключение электродвигателя за время, эквивалентное уставке времени плавного пуска  $t_{пп}$  с ограничением бросков тока в схеме ВЭП, бросков электромагнитного момента, просадок и колебаний частоты вращения АДКЗР.

Переходные процессы при выполнении обратного перевода АДКЗР с питающей сети на питание от МПЧ повторяют процессы, рассмотренные выше.

Из анализа осциллограмм, приведенных на рисунке 8 следует, что кратность бросков тока МПЧ при выполнении переключения не превышает  $1,3I_{\text{ном}}^{\text{МПЧ}}$ , АДКЗР –  $1,1I_{\text{ном}}^{\text{АДКЗР}}$ , сети –  $1,2I_{\text{ном}}^{\text{Сети}}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе выполнена разработка и исследование алгоритмов синхронизации выходного напряжения высоковольтного частотно-регулируемого электропривода с напряжением общепромышленной сети переменного тока, пригодных для осуществления безударного перевода нагрузки между источниками питания. В ходе выполнения исследования были решены все поставленные задачи:

1. Выполнен анализ существующих на рынке систем высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного электропривода. Выбрана и обоснована структура высоковольтного многоуровневого ПЧ на базе схемы с каскадным включением H-мостов для реализации разрабатываемых алгоритмов управления.

2. Сформулирован набор практических рекомендаций о необходимости наличия и топологии выходных силовых фильтров в структуре высоковольтного частотно-регулируемого электропривода с целью обеспечения коэффициента гармонических искажений напряжения не хуже, чем в ГОСТ 32144-2013 и ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (МЭК 61000-2-4-94).

3. Разработан и исследован алгоритм переключения высоковольтного АДКЗР с выхода многоуровневого высоковольтного ПЧ на питающую сеть на базе алгоритма БАВР. Алгоритм обеспечивает перевод нагрузки за время не более 100 мс.

4. Разработаны и исследованы алгоритмы идентификации параметров напряжения сети и выходного напряжения многоуровневого ПЧ, обеспечивающие вычисление параметров напряжения за время не более 60 мс.

5. Разработан и исследован алгоритм безударного перевода нагрузки с выхода высоковольтного многоуровневого ПЧ на сеть и обратно, позволяющий обеспечить бесперебойную работу технологической установки. Разработанный алгоритм соответствует подходу – переключение с перекрытием с выполнением предварительной синхронизации напряжений источников с применением алгоритмов идентификации. Алгоритм безударного перевода обеспечивает время перехода между источниками питания не более уставки на время разгона при выполнении плавного пуска АДКЗР от высоковольтного ПЧ, а также непревышение величины тока электродвигателя относительно номинального значения – не более 30%.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Домахин Е.А. Безударный перевод нагрузки с основной сети на резервную с применением быстродействующего автоматического ввода резерва / Червоненко А.П., Котин Д.А., Домахин Е.А. // Электротехника. – 2022. – №5. – С. 18-23.

2. Домахин Е. А. Алгоритм синхронизации для безударного переключения асинхронного двигателя между преобразователем частоты и питающей сетью/ Котин Д.А., Домахин Е.А.// Электротехника – 2021. – №6. – С. 25-31. Переводная версия: Domakhin E.A. Synchronization algorithm for soft switching of an induction motor between a frequency converter and supply network / E. A. Domakhin, D. A. Kotin// Russian Electrical Engineering. - 2021. - Vol. 92, iss. 6. - p. 314–319. – DOI: 10.3103/S1068371221060067.

3. Домахин Е. А. Универсальное устройство компенсации провалов и прерываний напряжения для обеспечения надежной работы электроприемников ПАО «Мосэнерго»/ Г. Б. Нестеренко, Д. В. Армеев, Е. А. Домахин, В. М. Зырянов, Д. А. Котин и др. // Электрические станции. – 2020. – №11. – С. 14-24. Переводная версия: Domakhin E.A. A universal voltage dip and interruption compensator for reliable operation of critical electrical installations at PJSC Mosenergo / . В. Nesterenko, D. V. Armeev, E. A. Domakhin, V. M. Zyryanov, D. A. Kotin et. al // Power Technology and Engineering. – 2021. – Vol. 55, iss. 1. – p. 116–125. – DOI 10.1007/s10749-021-01329-9.

*Публикации в материалах международных конференций, входящих в базу данных Scopus, Web of Science:*

4. Domakhin E. A. Developing electric drive with adaptive algorithm for soft switching between frequency converter and three-phase mains / E. A. Domakhin, D. A. Kotin // 17 International Ural conference on AC electric drives (ACED), Ural Federal University named after the first president of Russia V.N. Yeltsin: [proc.], Ekaterinburg, 26–30 March 2018. – IEEE, 2018. – 5 p. – DOI: 10.1109/ACED.2018.8341694

**Труды конференций:**

5. Домахин Е. А. Алгоритм синхронизации напряжений многоуровневого преобразователя частоты и высоковольтной питающей сети / Е. А. Домахин, Д. А. Котин, Н. С. Попов. // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС–2021): материалы 14 Всерос. науч.-техн. конф., Чебоксары, 2021. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С. 232–234.

6. Домахин Е.А. Разработка алгоритмов безударного переключения для группового частотно-регулируемого электропривода насосной станции / Аниброев В. И., Сингизин И. И., Домахин Е. А., Попов Н. С.// Дни науки НГТУ-2020, посвященные 70-летию НГТУ: материалы науч. студен. конф. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. - С. 7-9.

7. Domakhin E. A. Electric drive with multilevel converter for ESP system / E. A. Domakhin, D. A. Kotin, E. T. Kitova // Aspire to Science: материалы междунар. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Новосибирск, 18 апр. 2019 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – С. 56–60.

8. Домахин Е. А. Разработка адаптивного алгоритма для обеспечения синхронизации напряжений преобразователя частоты и сети / Домахин Е. А., Котин Д. А. // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС-2019) : материалы 13 Всерос. науч.-тех. конф., Чебоксары, 7 июня 2019 г. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 221-222.

9. Domakhin E. A. Developing of soft switching algorithms for electric driven pumping unit / E. A. Domakhin, D. A. Kotin, M. V. Rozhkova // Aspire to science:

материалы гор. науч.-практ. конф. школьников, студентов, магистрантов и аспирантов, Новосибирск, 12 апр. 2017 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – С. 43-46.

10. Домахин Е. А. Адаптивный алгоритм переключения асинхронного двигателя с преобразователя частоты на сеть / Домахин Е. А., Котин Д. А. // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 10 ч., Новосибирск, 4–8 дек. 2017 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 5. – С. 126-128.

11. Домахин Е. А. Разработка алгоритмов безударного переключения асинхронного двигателя с преобразователя частоты на сеть / Домахин Е. А., Котин Д. А. // Молодежь. Наука. Технологии (МНТК–2017): сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых. В 4 ч., Новосибирск, 18–20 апр. 2017 г. – Ч. 3. Транспортные системы и технологии. Мехатроника и автоматизация. Здоровьесберегающие инновации в питании. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – С. 140.

12. Домахин Е. А. Разработка электропривода с функцией безударного переключения с преобразователя частоты на сеть / Домахин Е. А., Котин Д. А. // Интеллектуальный потенциал Сибири. МНСК–2017 сб. науч. тр. 25 межвуз. (регион.) науч. студ. конф., Новосибирск, 24–25 мая 2017 г.: в 23 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 20. Автоматизированный электропривод, электроника, мехатроника. – С. 15-17.

13. Домахин Е. А. Исследование режимов работы асинхронного двигателя при переключении с преобразователя частоты на сеть / Домахин Е. А., Котин Д. А. // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч., Новосибирск, 5–9 дек. 2016 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 5. – С. 116–117.

14. Домахин Е. А. Разработка математической модели электропривода станции частотного управления в тормозных режимах работы Домахин Е. А., Котин Д. А. // Фундаментальные и прикладные исследования: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – С. 13-15.

#### **Свидетельство на программу для ЭВМ:**

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022617251 Российская Федерация. Программа расчета управляющего воздействия для выполнения безударного переключения высоковольтных асинхронных двигателей между преобразователем частоты и питающей сетью. / Д.А. Котин, Е.А. Домахин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет». - № 2022617251; заявл. 19.04.2022; опубл. 19.04.2022. – 1 с.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Тел. 8(383) 346-08-57  
Формат 60x84 1/16. Объем 1,1 п.л. Тираж 100 экз.  
Заказ 1154. Подписано в печать 04.07.2022 г