

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КОМСОМОЛЬСКИЙ-НА-АМУРЕ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*



**ПЕТУХОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ГРУППОВОГО ЧАСТОТНО-  
РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА С ПОВЫШЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ  
К ПРОВАЛАМ НАПРЯЖЕНИЯ**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Табаров Бехруз Довудходжаевич

Комсомольск-на-Амуре

2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                                                                                          | 4  |
| Глава 1. АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩЕГО<br>ГРУППОВОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ<br>АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ.....                                           | 11 |
| 1.1 Обзор существующих групповых частотно-регулируемых<br>электроприводов.....                                                                                                         | 11 |
| 1.2 Особенности работы частотно-регулируемого привода при провалах<br>напряжения в питающей сети.....                                                                                  | 20 |
| 1.3 Влияние аварийных режимов питающей сети на работу<br>преобразователей частоты.....                                                                                                 | 22 |
| 1.4. Способы повышения устойчивости группового частотно-<br>регулируемого привода к аварийным режимам в питающей сети.....                                                             | 26 |
| 1.5 Исследование влияния провалов напряжения в питающей сети на<br>существующий групповой частотно-регулируемый привод.....                                                            | 28 |
| 1.6 Обоснование выбора методов и постановка задач исследования.....                                                                                                                    | 33 |
| Выводы по первой главе.....                                                                                                                                                            | 35 |
| Глава 2. АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ<br>НА РАБОТУ ГРУППОВОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА В<br>УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПИТАЮЩЕГО<br>НАПРЯЖЕНИЯ..... | 36 |
| 2.1 Вводная часть.....                                                                                                                                                                 | 36 |
| 2.2 Обоснование преимущества объединения автономных инверторов<br>напряжения общим звеном постоянного напряжения.....                                                                  | 37 |
| 2.3 Влияния аварийных режимов на напряжение питающей<br>сети .....                                                                                                                     | 41 |
| 2.4 Разработка имитационной модели частотно-регулируемого<br>привода.....                                                                                                              | 44 |
| 2.5 Исследование влияния провалов напряжения питающей сети на<br>звено постоянного напряжения .....                                                                                    | 49 |

|                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Выводы по второй главе.....                                                                                                                                       | 61  |
| Глава 3. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ<br>ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУППОВОГО ЧАСТОТНО-<br>РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА К ПРОВАЛАМ НАПРЯЖЕНИЯ В<br>ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ..... | 62  |
| 3.1 Вводная часть.....                                                                                                                                            | 62  |
| 3.2 Разработка способа управления АИН при провалах напряжения<br>в питающей сети.....                                                                             | 63  |
| 3.3 Разработка способа ограничения зарядного тока конденсаторов<br>С-фильтра ЗПН при динамических режимах работы питающей сети.....                               | 90  |
| 3.4 Разработка технического решения по реализации предложенных<br>способов.....                                                                                   | 103 |
| Выводы по третьей главе.....                                                                                                                                      | 117 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....                                                                                                                                                   | 119 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....                                                                                                                     | 121 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....                                                                                                                             | 123 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Акт о внедрении в учебный процесс.....                                                                                                                 | 137 |

## Введение

Диссертационная работа направлена на решение задач, связанных с повышением устойчивости группового частотно-регулируемого привода (ГЧРП) при возникновении аварийных режимов работы в питающей сети. Особенностью частотно-регулируемого привода (ЧРП) является его высокая чувствительность к провалам напряжения в системе электроснабжения, возникновение которых приводит к срабатыванию собственной защиты минимального напряжения (ЗМН) преобразователя частоты (ПЧ) и отключению привода от сети во избежание опасных бросков тока, как зарядных токов конденсатора С-фильтра, так и входных токов автономного инвертора напряжения (АИН). Для ЧРП общепромышленного применения на основе двухзвенного преобразователя частоты время срабатывания ЗМН составляет 0,02-0,04с, что на порядок меньше длительности кратковременных провалов напряжения в системе электроснабжения. В настоящее время в промышленности эксплуатируются установки с ГЧРП, в которых, по условию технологического процесса, не допускается полная остановка приводимых в движение механизмов, но допускается кратковременное снижение их скорости без полной остановки. К таким установкам относятся насосные станции, используемые в нефтегазовой и химической промышленности, системы охлаждения вторичного контура теплообменников и колосниковых рам на тепловых электростанциях, вентиляторные и насосные установки на нефтезаводах. При авариях в системе электроснабжения, переключениях автоматического включения резерва (АВР) возникают глубокие провалы напряжения, приводящие к остановке ГЧРП.

В диссертационной работе проведено исследование разработанных способов повышения устойчивости ГЧРП с разомкнутой системой скалярного управления асинхронным электроприводом и вентиляторной механической нагрузкой к провалам напряжения в системе электроснабжения, приводящим к снижению напряжения в звене постоянного напряжения (ЗПН) ниже порога

срабатывания ЗМН. Способы повышения устойчивости ГЧРП к провалам напряжения в системе электроснабжения направлены на преодоление глубоких провалов напряжения, возникающих в системе электроснабжения, за счёт использования специальных способов управления ГЧРП для увеличения времени ожидания восстановления напряжения в питающей сети. В процессе исследования выявлено, что за счёт предложенных способов обеспечивается управляемое снижение скорости асинхронного двигателя (АД) после регистрации провала напряжения в системе электроснабжения и снижения напряжения в ЗПН  $U_{DC}$  до значения  $0,1U_{DC}$  с последующим его разгоном до номинальной скорости после восстановления напряжения без отключения ГЧРП от сети. В работе проведены исследования предлагаемых способов управления АИН, в результате которых выявлены особенности работы ЧРП без нарушения синхронизации выходного тока АИН и тока статора АД при отсутствии аварийных бросков зарядного тока конденсатора С-фильтра, а также входного тока АИН.

Важность и актуальность работы связана с решением задачи устранения аварийной остановки технологического оборудования при возникновении глубоких провалов напряжения в питающей сети, обеспечения устойчивой работы электротехнических комплексов с ГЧРП и расширения функциональных возможностей систем управления АИН позволяющих повысить надёжность оборудования в целом.

### **Степень разработанности темы исследований.**

Значительный вклад в исследование, разработку технических решений, связанных с реализацией и расширением функциональных возможностей при управлении ПЧ внесли отечественные и зарубежные учёные: Андриенко П.Д., Климаш В.С., Невраев В.Ю., Осипов О.И., Онищенко Г.Б., Шонин О.Б., Щедрович В.А., Крах Й.О., Менх С., Holtz J., Rajagopalan L.N., Lorenz E., Matsumoto T., Wolf A., Yang T., Wang H. и др. Разработкой и исследованием токоограничивающих устройств занимались отечественные учёные: Мойжес

Л.И., Осовц С.М., Волков В.А. и др., а в частности Климаш В.С. занимался вопросами ограничения зарядного тока при подключении конденсаторов к трёхфазной сети с использованием устройства на основе диодного выпрямителя, реактора и шунтирующего ключа. Несмотря на обширные исследования, вопросы повышения устойчивости системы управления электротехническим комплексом (ЭТК) с ГЧРП к провалам напряжения остаются открытыми.

**Объектом исследования является** ЭТК на базе ГЧРП с объединёнными по входу АИН общим ЗПН.

**Предметом исследования являются** способы управления и построения ЭТК на базе ГЧРП.

**Целью диссертационной работы является** повышение устойчивости системы управления ЭТК с ГЧРП к провалам напряжения в питающей сети.

**Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:**

1. Исследование штатной схемы ЭТК с ГЧРП при аварийных режимах работы питающей сети;
2. Разработка способа управления ЭТК с ГЧРП для предотвращения остановок ЧРП при провалах напряжения в питающей сети;
3. Разработка способа ограничения зарядного тока конденсаторов С-фильтра ЗПН при подключении ГЧРП к питающей сети;
4. Разработка технического решения по реализации предложенных способов;
5. Разработка имитационной модели ЭТК с ГЧРП реализующей предложенные способы;
6. Исследование ЭТК с ГЧРП с предложенным техническим решением.

**Научная новизна** результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Разработана система управления ЭТК с ГЧРП позволяющая устранить остановку ГЧРП при возникновении провала напряжения в питающей сети;
2. Предложены способы управления ЭТК с ГЧРП позволяющие:
  - сохранить продолжительность работы ЭТК с ГЧРП при возникновении провала напряжения в питающей сети;
  - ограничить броски тока в транзисторных ключах АИН при восстановлении напряжения в питающей сети;
  - обеспечить плавный разгон АД с любой пониженной скорости до номинального значения после завершения провала напряжения в питающей сети;
3. Предложен способ ограничения зарядного тока конденсаторов С-фильтра ЗПН при подключении ГЧРП к питающей сети для снижения бросков зарядного тока конденсатора С-фильтра до номинального значения;
4. Результаты исследования режимов работы ЭТК с ГЧРП на разработанном специализированном программном комплексе подтвердили возможность практического применения предложенных способов управления ЭТК с ГЧРП в аварийных режимах работы питающей сети.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Предложены новые способы и устройства для построения модели системы управления ЭТК с ГЧРП позволяющие сохранить продолжительность работы ГЧРП при возникновении аварийных режимов работы питающей сети;
2. Разработан специализированный программный комплекс системы управления ЭТК с ГЧРП для исследования работы ГЧРП в нормальных и аварийных режимах питающей сети;
3. Разработана математическая модель специализированного программного комплекса системы управления ЭТК с ГЧРП;

4. Новизна технических решений подтверждается свидетельством на программу для ЭВМ, патентами на изобретение и полезную модель.

#### **Методология и методы исследований.**

Результаты научных исследований, проведенных в рамках диссертационной работы, основывались на применении методов теории электрических цепей, теории дифференциальных уравнений, теории автоматического управления и математического моделирования. Для решения поставленной задачи использовался пакет Simulink среды MatLab.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Способ управления ЭТК с ГЧРП позволяющий предотвратить остановку ГЧРП, устранить броски тока в транзисторных ключах АИН и обеспечить непрерывный процесс управления скоростью АД при возникновении провалов напряжения в питающей сети;

2. Система управления ЭТК с ГЧРП на основе способа управления выходной частотой АИН позволяющая увеличить продолжительность работы ГЧРП при возникновении аварийных режимов работы питающей сети;

3. Способ ограничения зарядного тока конденсаторов С-фильтра ЗПН при подключении ЭТК с ГЧРП к питающей сети позволяющий ограничить броски тока в трёхфазной сети до номинального значения в нормальном и аварийном режиме работы системы электроснабжения;

4. Результаты моделирования численных экспериментов ЭТК с ГЧРП в среде MatLab подтверждающие эффективность предложенных способов и устройств.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов диссертационного исследования и его основные научные положения и выводы, основываются на фундаментальных положениях общей теории электротехники, теории электропривода, математики, теории

автоматического управления, математического моделирования и подтверждаются соответствием результатов теоретических исследований и результатов, полученных численными экспериментами в среде MatLab, а также экспериментами на физическом макете.

Основные материалы исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

– Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов (г. Комсомольск на Амуре 10 апреля 2018г.);

– II Всероссийская научно–практическая конференция «Электропривод на транспорте и в промышленности» (г. Хабаровск, 21 сентября 2018 г.);

– II Всероссийская национальная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (г. Комсомольск на Амуре 12 апреля 2019г.);

– Производственные технологии будущего «От создания к внедрению» (г. Комсомольск на Амуре 14 июня 2019г.);

– III Всероссийская научная конференция молодых учёных (г. Комсомольск на Амуре 6 апреля 2020г.);

– IV Всероссийская национальная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Комсомольск на Амуре 16 апреля 2021г.);

– V Международная научно-практическая конференция (г. Комсомольск на Амуре 16 апреля 2022г.).

**Личный вклад соискателя** заключается в следующих работах:

– разработка способа управления ЭТК с ГЧРП для предотвращения остановки ГЧРП и ограничения входного тока АИН при возникновении провалов напряжения в питающей сети;

– разработка математической модели специализированного программного комплекса ЭТК с ГЧРП;

- разработка системы управления АИН для плавного разгона АД на интервале преодоления провалов напряжения в питающей сети;
- разработка способа ограничения тока заряда конденсаторов С-фильтра ЗПН ГЧРП.

**Реализация работы.** Работа выполнена в лаборатории «Силовая электроника» и используется на кафедрах «Электромеханика», «Промышленная электроника и инновационные технологии» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям подготовки: 13.05.02 «Специальные электромеханические системы», профиль «Электромеханические системы специальных устройств и изделий»; 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электрооборудование и электроснабжение предприятий»; 11.03.04 «Промышленная электроника», профиль «Электроника и наноэлектроника», что подтверждается актом внедрения.

**Публикации.** Основное содержание работы отражено в 18-ти публикациях, из них 5 – в изданиях из перечня ВАК РФ, в 3 патентах на изобретения, 1 патенте на полезную модель, 1 свидетельстве на программу для ЭВМ, в 1 издании, входящем в международную систему цитирования Scopus и в 7 сборниках трудов и материалах конференций регионального, Всероссийского и международного уровня.

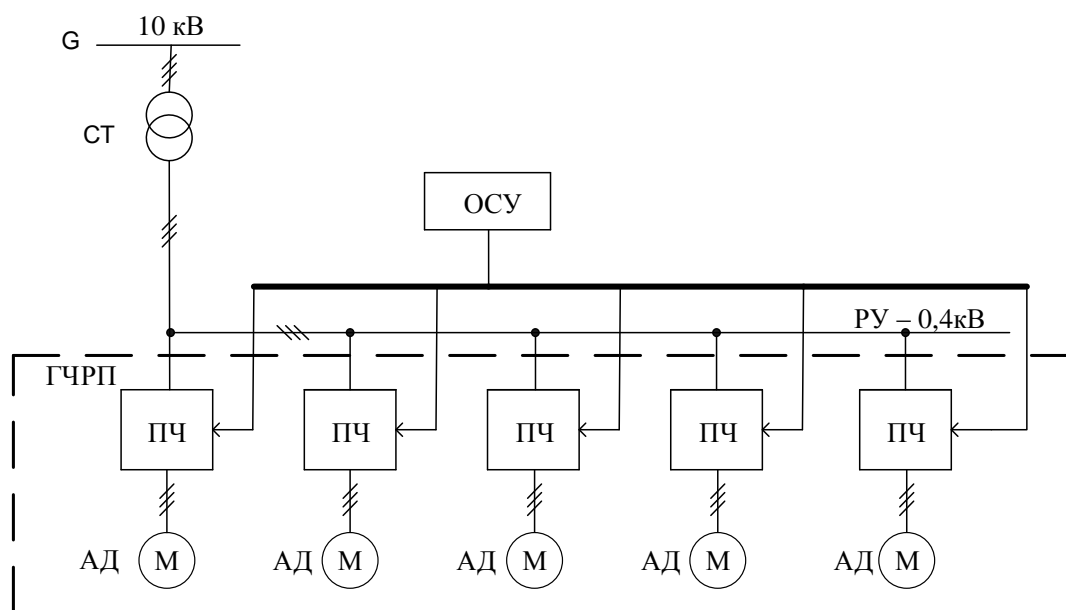
**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы из 103 наименований и 1 приложения. Диссертация изложена на 136 страницах, содержит 61 рисунок.

# Глава 1. Анализ и исследование существующего группового частотно-регулируемого электропривода при аварийных режимах питающей сети

## 1.1 Обзор существующих групповых частотно-регулируемых электроприводов

В различных отраслях промышленности эксплуатируется ЧРП и ГЧРП. ГЧРП представляет собой сложный электротехнический комплекс, состоящий из системы управления, группы ПЧ и АД которые требуют надёжного питания, получаемого из питающей сети через силовой трансформатор [32, 33].

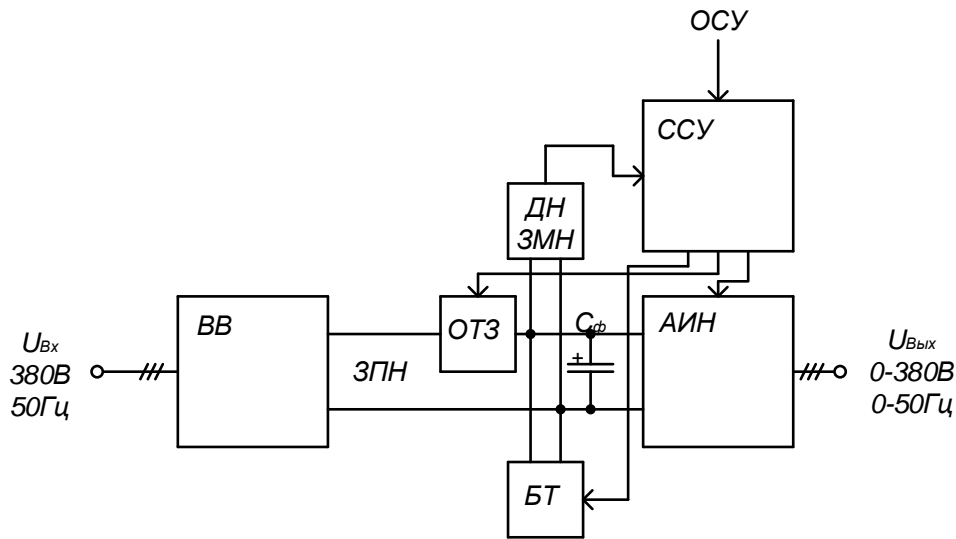
Ниже на рисунке 1.1 приводится функциональная схема системы электроснабжения с существующим ГЧРП.



G – источник питания силового трансформатора (СТ), АД – асинхронный двигатель, ГЧРП – групповой частотно регулируемый привод, ОСУ – общая система управления.

Рисунок 1.1 – Функциональная схема системы электроснабжения с существующим ГЧРП

В состав ГЧРП входят ПЧ, функциональная схема которого представлена на рисунке 1.2.



ВВ – входной выпрямитель, ЗПН – звено постоянного напряжения, ОТЗ – блок ограничения тока заряда, ДН ЗМН – датчик напряжения защиты минимального напряжения,  $C_{\phi}$  – конденсатор С - фильтра, БТ – встроенный блок торможения, ССУ – собственная система управления, АИН – автономный инвертор напряжения.

Рисунок 1.2 – Функциональная схема существующего ПЧ

Управление работой ГЧРП в динамических режимах осуществляется общей системой управления (ОСУ) и собственной системой управления (ССУ) соответственно. Питание ПЧ осуществляется от силового трансформатора (СТ), подключенного к распределительной сети верхнего уровня G.

В промышленности эксплуатируются установки с ГЧРП, в которых по условию технологического процесса, не допускается полная остановка приводимых в движение механизмов, но допускается кратковременное снижение их скорости без полной остановки [57]. К таким установкам относятся насосные станции, используемые в нефтегазовой и химической промышленности, системы охлаждения вторичного контура теплообменников и колосниковых рам на тепловых электростанциях, вентиляторные и насосные

установки на нефтезаводах [86], где в случае остановки технологического процесса может произойти серьёзная авария на промышленном предприятии [93].

Общепринятый принципиальный подход к построению ПЧ и ГЧРП влияет на способы реализации электропривода с позиции электромагнитной совместимости ПЧ с питающей сетью и обеспечение качества электроэнергии [18]. Для улучшения электромагнитной совместимости ПЧ с питающей сетью и повышения показателей качества электроэнергии используют трёхфазные фильтры, включенные на входе трехфазных выпрямителей ПЧ [44], активные фильтры, линейные реакторы, широкополосные высокочастотные и резонансные фильтры, настроенные на подавление гармоник и активные выпрямители [47, 48]. В составе ГЧРП применяются преобразователи частоты, выполненные по общепринятой АС – DC – АС схеме построения силовой части, состоящей из трёх основных блоков, таких как входной выпрямитель (ВВ), АИН реализованного на управляемых транзисторных ключах и включенного в ЗПН между ВВ и АИН конденсатора С-фильтра [2, 3, 11, 54].

Входной выпрямитель преобразователя частоты может быть реализован в виде управляемого, неуправляемого или активного выпрямителя [1, 24, 28]. Выбор типа выпрямителя для ПЧ зависит от особенностей электропривода и режимов его работы [25]. Наибольшее распространение получили неуправляемые выпрямители, выполняемые на диодах, характеризующиеся простотой, надежностью, высоким КПД при эксплуатации [24, 28]. Требуемые показатели качества выпрямленного напряжения и гармонического состава тока с коэффициентом искажения 0,95 достигаются за счёт установки между ВВ и конденсаторами С-фильтра дросселя с большим значением индуктивности [28].

Для улучшения электромагнитной совместимости ПЧ с питающей сетью на входе выпрямителя может устанавливаться реактор [44]. При выборе реактора учитываются параметры питающей сети и линий электропередачи [47, 71]. Установка реакторов на входе выпрямителя преобразователя частоты позволяет ограничить ток заряда конденсатора С-фильтра при

кратковременных провалах напряжения в питающей сети и снизить уровень гармонических составляющих в сети, возникающих при работе ПЧ. Параметры реактора выбираются из условия требования ГОСТ 32144-2013 к качеству электроэнергии [16] и стандарта электромагнитной совместимости с сетью [17]. Использование реакторов, с одной стороны снижает уровень гармонических составляющих в сети и повышает качество электроэнергии, а с другой стороны ухудшает массогабаритные показатели и повышает стоимость ЧРП. Снижение уровня гармонических составляющих потребляемого из сети тока до значения менее 30% за счёт увеличения индуктивности входного реактора не целесообразно в виду того, что на каждую единицу процента снижения уровня гармоник необходимо увеличивать на 10% его индуктивность [11]. Увеличение индуктивности приводит к снижению питающего напряжения на входе ВВ и ЗПН, что вызывает нарушение режима работы АИН [11, 81].

Для повышения качества электроэнергии и обеспечения электромагнитной совместимости при подключении к питающей сети диодных выпрямителей с мощной активно-индуктивной нагрузкой наряду с применением L-фильтров, входных реакторов и фильтрокомпенсирующих устройств [21] предложен подход к снижению гармонических составляющих заключающийся в применении широкополосных подавляющих фильтров и активных фильтров гармоник [48]. Применение широкополосных подавляющих фильтров позволяет ослабить 5-ю и 7-ю гармонику тока, потребляемого из сети [6, 22] и увеличить жёсткость нагрузочной характеристики выпрямителя.

Улучшить электромагнитную совместимость с сетью и снизить значение пульсаций тока на выходе выпрямителя в 3 раза позволяет применение совместно с ПЧ ВВ, пульсность которого, увеличена с 6 до 12 [4]. При использовании 18 - 24 пульсной схемы ВВ для преобразователей частоты мощностью более 1000 кВт в комплекте со специальным трансформатором достигаются относительные значения пульсаций тока на выходе выпрямителя до 1%, что позволяет в большей степени повысить электромагнитную совместимость с сетью [18, 19, 75]. Вопросу выбора типа выпрямителя для ПЧ

посвящена в частности работа [25]. От конструкции, типа и способа управления ВВ ПЧ, которые используются в ЧРП, зависят энергетические показатели и надёжность работы оборудования в целом.

В общепринятой схеме построения силовой части ПЧ параллельно конденсатору С-фильтра подключены элементы для ограничения напряжения, возрастающего в ЗПН при переходе АД в режим генераторного торможения. Снижение напряжения осуществляется за счёт рассеивания избытка энергии на тормозном резисторе, который подключается через силовой транзисторный ключ параллельно конденсатору С-фильтра и ЗПН, что снижает энергоэффективность электропривода из-за нерационального использования энергии генераторного торможения [63]. ЧРП входящий в состав ГЧРП в большинстве случаев, реализован по схеме с диодным ВВ, с подключенным блоком ограничения напряжения в ЗПН и АИН с индивидуальным АД [72, 73, 74]. Применение данной схемы увеличивает общее потребление электроэнергии, за счёт рассеивания энергии генераторного торможения на тормозных резисторах, которое зависит от периодичности режимов разгона и торможения АД электропривода.

В работе [39, 64, 66, 67] рассмотрена возможность применения общего ВВ для питания группы АИН электропривода. Объединение группы АИН общим ЗПН с ВВ позволяет передавать энергию через ЗПН, вырабатываемую в режиме генераторного торможения одним или группой АД к АД работающим в двигательном режиме с минимальными её потерями в ЗПН [50, 67]. При объединении группы АИН с общим выпрямителем увеличивается суммарная ёмкость С-фильтра ЗПН, образованная параллельно включенными конденсаторами, установленными на входе АИН. Конденсаторы С-фильтра должны обладать достаточной ёмкостью, чтобы обеспечивать требуемое значение коэффициента пульсаций напряжения постоянного тока в ЗПН [15].

Входной ток ВВ, работающего на активно-ёмкостную нагрузку, представляющую собой АИН, на входе которого подключен конденсатор С-фильтра, имеет непрерывную пульсирующую форму, которая создаёт

значительные гармонические составляющие. Группу АИН, объединённых по входу ЗПН с выходом общего ВВ, можно рассматривать как мощный ПЧ с конденсатором С-фильтра большой ёмкости. Увеличение ёмкости конденсатора С-фильтра приводит к появлению значительных бросков зарядного тока при подключении ПЧ к питающей сети, что требует применения схем токоограничения на основе токоограничивающего резистора [52], реакторов устанавливаемых на входе ВВ и L – фильтра включенного в ЗПН между выходом ВВ и конденсатором С-фильтра [57].

Повышение энергоэффективности ПЧ за счёт полезного использования энергии генераторного торможения возможно при применении в составе ПЧ управляемого выпрямителя с рекуперацией. В качестве управляемого выпрямителя с рекуперацией в настоящее время применяются реверсивные тиристорные преобразователи и диодно-транзисторные выпрямители [28, 49].

Применение реверсивного тиристорного преобразователя ухудшает показатели качества электроэнергии по причине снижения коэффициента мощности из за особенностей его работы. Недостатком реверсивного тиристорного преобразователя является увеличение угла регулирования  $\alpha$  для обеспечения устойчивого инвертирования тока при рекуперации и опасность опрокидывания инвертора при больших его значениях, повышенный уровень пульсаций напряжения на выходе выпрямителя, снижение напряжения на входе АИН [28].

Установка диодно-транзисторного выпрямителя на входе ЗПН позволяет устранить недостатки, характерные для реверсивных тиристорных преобразователей. Диодно-транзисторный выпрямитель представляет собой мостовой выпрямитель, диоды которого шунтированы IGBT-транзисторами. Принцип работы диодно-транзисторного выпрямителя в составе преобразователей частоты подробно описан в работе [49]. Способ управления ключевыми транзисторами определяет режим работы диодно-транзисторного выпрямителя. На практике для управления диодно-транзисторным выпрямителем наибольшее распространение получили:

- широтно импульсная модуляция с повышением коэффициента мощности [78];

- управление ключевыми транзисторами импульсами с длительностью  $T=120^\circ$  в режиме активного выпрямителя обеспечивающего двухстороннюю проводимость [41].

Отличительная особенность диодно-транзисторного выпрямителя заключается в том, что для обеспечения входного тока синусоидальной формы необходима установка входного реактора с большой индуктивностью, что приводит к увеличению напряжения в ЗПН до 880 В при напряжении в питающей сети 380 В [5]. Увеличение напряжения в ЗПН требует установки конденсаторов С-фильтра, силовых транзисторных ключей АИН с высоким рабочим напряжением, а также к необходимости применения электродвигателей и элементов ЗПН с повышенными требованиями к изоляции, что приводит к увеличению габаритов и общей стоимости ЧРП [5]. Перечисленные недостатки снижают эксплуатационные свойства ПЧ в целом.

Простота системы управления и жесткость внешней характеристики являются основным достоинством активного выпрямителя. В активном выпрямителе IGBT-транзисторы управляются импульсами прямоугольной формы, синхронизированными в интервале проводимости соответствующего диода в течении  $T=120^\circ$ . Алгоритм управления активным выпрямителем прост и надёжен, обеспечивает двухстороннюю проводимость, но не позволяет сформировать синусоидальную форму входного тока ПЧ. Значение напряжения в ЗПН при работе преобразователя частоты определяется характеристикой активного выпрямителя в режимах потребления и рекуперации.

Установка активного выпрямителя с двухсторонней проводимостью на входе преобразователя частоты позволяет [1]:

- экономить электроэнергию за счёт рекуперации энергии в сеть, где процент экономии определяется режимами работы электропривода;

– обеспечить устойчивую работу преобразователя частоты в процессе рекуперации при колебаниях напряжения питающей сети в допустимом диапазоне;

– отказаться от тиристоров и повысить надёжность выпрямителя.

Активный выпрямитель также имеет особенность, связанную с тем, что в режиме выпрямления и рекуперации форма входного тока в разных фазах различна и соответственно амплитуда гармонических составляющих по фазам имеет разный уровень. При использовании активного выпрямителя совместно с ПЧ большой мощности возникает необходимость установки на входе активного выпрямителя реактора с большой индуктивностью [1, 49]. Установка реактора на входе выпрямителя приводит к увеличению массогабаритных показателей оборудования. Совместное использование реактора, установленного на входе активного выпрямителя работающего в режиме рекуперации с двухсторонним обменом [1] и резонансным фильтром, подключенным в распределительном устройстве понижающего трансформатора [36], приводят к возникновению переходных процессов в трёхфазной сети, где протяжённость линий электропередач может достигать несколько сотен метров. Переходные процессы, имеющие слабозатухающий характер, вызывают дополнительные потери и снижают показатели качества электроэнергии по гармоническим составляющим [83], нормируемым [16].

Опыт эксплуатации существующих электротехнических устройств с ЧРП и ГЧРП показывает, что из-за возникновения внешнего и внутреннего изменения электрических параметров, не всегда выполняется их требования по обеспечению надёжности питания [76, 77]. Как известно, выход электрических параметров за предельно допустимые нормы создаёт аварийные режимы, которые приводят к остановке технологического процесса непрерывного производства, в результате чего увеличивается время повторного запуска оборудования, возникает брак продукции, сокращается срок службы механических узлов оборудования [30, 76]. В ряде случаев преждевременная остановка оборудования с ГЧРП возникает по причине внезапного

возникновения аварий в системе электроснабжения приводящих к срабатыванию электронных защит ЧРП [31, 89]. Одной из основных причин преждевременной остановки оборудования с ЧРП является возникновение провала напряжения в системе электроснабжения [51, 89].

Из опыта эксплуатации электротехнических систем известно, что существующие ЧРП и ГЧРП обладают низкой устойчивостью к провалам напряжения возникающих в системе электроснабжения [51, 58, 89].

При возникновении аварийного режима в питающей сети происходит снижение напряжения  $U_{вх}$  и напряжения  $U_{ЗПН}$  в ЗПН соответственно. Контроль напряжения в ЗПН осуществляется ДН ЗМН, с выхода которого, информация о значении  $U_{ЗПН}$  поступает в ССУ, где происходит снятие импульсов управления АИН при снижении  $U_{ЗПН}$  ниже уставки ЗМН, что приводит к остановке ГЧРП и нарушению технологического процесса [31]. В процессе неуправляемой остановки АД возможно повреждение режущего инструмента, разрыв цепных и ленточных конвейеров, возникновение динамических ударных нагрузок, которые снижают ресурс механических узлов технологического оборудования [30, 31]. Возникновение ударной нагрузки на узлы и механизмы технологического оборудования связано с воздействием кинетической энергии со стороны движущихся по инерции подвижных частей механизмов в момент неуправляемой аварийной остановки оборудования [30, 31]. Ударные воздействия на редукторы, винтовые пары и другие механические узлы технологического оборудования приводят к преждевременному их износу, что в конечном итоге влияет на точность перемещения прецизионных механизмов, снижение их срока службы и качества выпускаемой продукции [30, 31].

Таким образом, можно сделать вывод, что при построении ГЧРП требуется рассмотрение возможных технических решений позволяющих обеспечить управление ГЧРП при провалах напряжения в питающей сети для повышения надёжности оборудования и устранения влияния аварийных режимов питающей сети на функционирование ГЧРП.

## 1.2 Особенности работы частотно-регулируемого привода при провалах напряжения в питающей сети

Несмотря на множество преимуществ ГЧРП, реализованный на базе микропроцессорной техники и силовых полупроводниковых приборов, чувствителен к отклонению напряжения в питающей сети от нормы, что является его особенностью [51]. Это является одной из причин технических остановок оборудования оснащённого ПЧ.

Напряжение в питающей сети зависит от многих факторов. Большая протяжённость воздушных линий (ВЛ) системы электроснабжения ставит их функционирование в зависимость от погодных условий, которые приводят к повреждениям ВЛ под влиянием ветровых нагрузок, колебаний температуры, обледенения и сильных снегопадов. На качество электроэнергии у потребителей оказывают влияние отказы оборудования системы электроснабжения, короткие замыкания и переключения больших мощностей [87]. Кроме того, на режимы работы системы электроснабжения, могут влиять внутренние причины [87], включая переключение между мощными трансформаторами на понизительных подстанциях промышленных предприятий, большие пусковые токи, неисправности распределительной аппаратуры, срабатывание систем релейной защиты и АВР.

В соответствии со стандартом IEEE Standard 1100-1999 [17] отклонения параметров питающей сети от нормы классифицированы по следующим признакам:

- провалы напряжения;
- прерывание питания;
- переходные процессы;
- всплески напряжения;
- искажения формы напряжения;
- флуктуации напряжения и фликкер эффект;
- изменение частоты переменного тока в питающей сети.

Режим системы электроснабжения определяется процессами, характеризующими работу оборудования в любой момент времени. Нормальные переходные процессы характеризуются эксплуатацией системы электроснабжения в нормальном режиме [79]. Аварийные переходные процессы возникают в системе электроснабжения при таких возмущающих воздействиях, как короткие замыкания (КЗ) в линиях электропередач, повторные включения и отключения элементов электрической сети, срабатывание АВР [79].

Всплески напряжения представляют собой внезапное резкое изменение напряжения, которое может быть положительным или отрицательным по знаку. Причиной всплеска напряжений и возникновения импульсных переходных процессов могут являться удары молнии, неисправности контура заземления, коммутация индуктивных нагрузок, срабатывания защитной автоматики в системе электроснабжения.

В случае отклонения параметров питающей сети от номинальных значений, возникает угроза нарушения режимов работы технологического оборудования при срабатывании ЗМН ЧРП. Срабатывание ЗМН ЧРП может возникнуть при кратковременных нарушениях нормальных режимов в питающей сети [90]. Кратковременные нарушения нормальных режимов работы системы электроснабжения возникают при таких явлениях как прерывания напряжения, перенапряжения и провалы напряжения. Прерывание напряжения – ситуация, при которой напряжение меньше 5% опорного напряжения во всех фазах [17]. В случае если напряжение ниже 5 % опорного напряжения не во всех фазах, ситуацию рассматривают, как провал напряжения [17, 18].

Таким образом, можно сделать вывод, что аварийные режимы, возникающие в системе электроснабжения, приводят к изменению параметров напряжения в питающей сети, влиянию на работу ЧРП, срабатыванию ЗМН и остановке технологического процесса. Аварийная остановка ЧРП в свою очередь может привести к нарушению технологического процесса, браку

продукции и возникновению аварий на производстве [12, 51, 59, 60, 68, 76]. Всё это подтверждает необходимость разработки и исследования устройств и способов их управления направленных на устранение влияния аварийных режимов возникающих в системе электроснабжения на работу оборудования конечного потребителя электрической энергии.

### **1.3 Влияние аварийных режимов питающей сети на работу преобразователей частоты**

При возникновении аварийных режимов (коротких замыканий (КЗ), включения мощной установки и т.д.) в питающей сети возникают провалы напряжения характеризующиеся такими параметрами как: остаточное напряжение  $U_{ост}$ , глубина провала напряжения  $U_{пр} = U_{ном} - U_{ост}$ , длительность провала напряжения  $t_{пр}$ , минимальное среднеквадратическое значение напряжения, зафиксированное в интервале провала напряжения  $U_{мин}$ . Интервал времени, в течение которого в электрической сети допускается провал напряжения не ниже заданного значения, определяется в соответствии с [17, 71].

Рассмотрим влияние провалов напряжения на работу АД и приводных механизмов входящих в состав ЧРП, используя механические характеристики АД и приводного механизма. Снижение питающего напряжения без изменения частоты приводит к уменьшению критического момента  $M_{кр}$  развиваемого на валу АД в соответствии с известным выражением (1.1):

$$M_{кр} = \frac{3z_p \cdot U_s^2}{2\omega_s \cdot (\omega_s \cdot (L_s + L_r))^2} \quad (1.1)$$

Где:  $z_p$  - число пар полюсов электродвигателя;

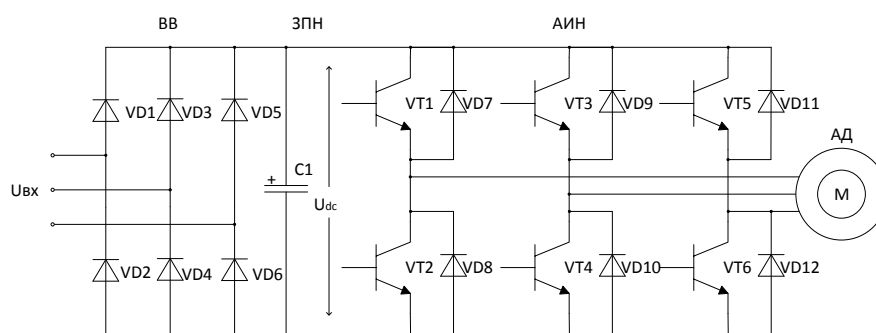
$U_s$  - напряжение питания статора двигателя;

$\omega_s$  - частота питающего напряжения двигателя;

$L_s, L_r$  - индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора.

ГЧРП представляет собой систему, состоящую из преобразователей частоты ПЧ, показанных на (см. рис. 1.1) и взаимодействующих преобразователей энергии, информационных и управляющих устройств, реализованных на основе промышленных программируемых логических контроллеров и электронных микропроцессорных систем управления, которые предназначены для управления ПЧ [72 - 74].

Необходимость введения преобразователей частоты в состав ГЧРП обусловлена управлением характеристиками АД в соответствии с заданным технологическим процессом. [72 - 74]. Функциональная схема существующей силовой части ПЧ представлена на рисунке 1.3.



ВВ – входной выпрямитель, VD1 - VD6 – диоды входного выпрямителя, ЗПН – звено постоянного напряжения, C1 – конденсатор С-фильтра ЗПН, АИН – автономный инвертор напряжения, VT1 - VT6 – транзисторные ключи АИН, VD7 - VD12 – шунтирующие диоды транзисторных ключей, АД – асинхронный двигатель.

Рисунок 1.3 – Функциональная схема существующей силовой части ПЧ на основе АИН

Ёмкость конденсатора С - фильтра играет важную роль в работе ПЧ [37, 38] и определяет коэффициент пульсаций в ЗПН, а также скорость снижения напряжения в ЗПН до минимально допустимого значения  $U_{dc. \text{мин.}}$  на котором возможна работа АИН после снятия напряжения со входа ВВ. В случае, когда напряжение в ЗПН  $U_{dc}$  находится в диапазоне  $U_{dc. \text{мин.}} < U_{dc} < U_{dc. \text{ном.}}$ , не

происходит срабатывание ЗМН, ПЧ и привод работают при пониженном напряжении  $U_{dc}$ , пока напряжение на конденсаторе С - фильтра не восстановится или не сработает ЗМН. При срабатывании ЗМН блокируется работа транзисторных ключей АИН для их защиты от перегрузки по току [51].

При снижении напряжения в ЗПН до уровня срабатывания ЗМН, прерывается работа АИН, снимается напряжение питания с АД и прекращается дальнейший разряд конденсатора С-фильтра. Автоматический повторный пуск АД ГЧРП находящихся в режиме выбега по завершению провала напряжения в сети возможен после полной остановки АД и заряда конденсатора С-фильтра до номинального напряжения ЗПН.

Значение уставки срабатывания ЗМН в ПЧ выбирается из условия ограничения броска зарядного тока конденсатора С-фильтра через диоды входного выпрямителя, прямо пропорционального разности номинального и остаточного напряжения в ЗПН [37, 38, 58]. Значение минимального напряжения  $U_{dc. \text{ мин.}}$ , при котором происходит срабатывание ЗМН ПЧ, устанавливается разработчиком оборудования и в большинстве случаев составляет -10 % от номинального значения  $U_{dc. \text{ ном.}}$  [72 - 74].

При работе ПЧ на пониженном напряжении происходит рост входного тока АИН, тока статора АД и его перегрев, а также возникает перегрузка транзисторных ключей АИН, которая приводит к срабатыванию внутренней электронной защиты и отключению АИН [89, 90]. Анализ технических характеристик преобразователей частоты, применяемых в составе ГЧРП, показывает, что кратковременная перегрузочная способность существующих ПЧ по току составляет 150-200% от номинального значения [72 - 74].

В ряде существующих ПЧ предусмотрена функция автоматического повторного запуска, которая после восстановления напряжения в питающей сети переводит ПЧ в режим самозапуска в случае отключения привода ЗМН от питающей сети [72 - 74]. Применение функции автоматического повторного запуска ПЧ, входящих в состав ГЧРП, имеет особенности связанные с

неодинаковой интенсивностью снижения скорости каждого из АД ГЧРП, а также отличием интервалов времени разряда и заряда конденсаторов С-фильтра ЗПН отдельных ПЧ в процессе преодоления провала напряжения в питающей сети. Неодинаковая интенсивность снижения скорости АД ГЧРП после срабатывания ЗМН ПЧ обусловлена отличием моментов инерции механизмов ГЧРП, приводимых в движение отдельными АД. Разный интервал времени разряда и заряда конденсаторов С-фильтра ЗПН связан с отличием ёмкости конденсаторов С-фильтра отдельных ПЧ из-за их разной мощности [57].

Существующие ПЧ, построенные на основе АИН, используемые в составе ГЧРП, реализованы по схеме «ВВ – ЗПН с С-фильтром – АИН» к выходу которого подключен АД.

Характеристика устойчивости ПЧ к провалам напряжения определяется функциональной зависимостью напряжения на конденсаторе С-фильтра в ЗПН  $U_{dc}(t)$  от минимального напряжения на входе выпрямителя  $U_{\text{мин.вх}}$  на интервале от начала провала напряжения  $t_{\text{н.п.}}$  до его завершения  $t_{\text{з.п.}}$  на входе выпрямителя:

$$U_{dc}(t) = f[U_{\text{мин.вх}} \cdot (t_{\text{з.п.}} - t_{\text{н.п.}})] \quad (1.2)$$

Интервал времени в течение которого возможна работа привода при провалах напряжения в питающей сети, определяется ёмкостью конденсатора С-фильтра, типом механической нагрузки двигателя привода и режимом разгона или торможения двигателя. Расчёт ёмкости конденсатора С-фильтра  $C_{\phi}$  для интервала времени работы  $T_p$  привода при провалах напряжения в статическом режиме производится, исходя из условий энергетического баланса [37, 38]:

$$C_{\phi} \geq \frac{2 \cdot P \cdot T_p}{U_{dc.\text{ном}}^2 - (0.8 \cdot U_{dc.\text{ном}})^2}, \quad (1.3)$$

Где:  $P$  – мощность АД;

$T_p$  – интервал времени работы привода при провалах напряжения в статическом режиме;

$U_{dc.\text{ном}}$  – номинальное напряжение в ЗПН.

Значение расчётной длительности устойчивой работы электропривода с ПЧ при отсутствии питания в течение  $T_p$  составляет 20 – 40мс [37, 38], что меньше интервала времени аварийного режима  $0,04с < \Delta t_{пр} < 1с$ , возникающего в питающей сети [70, 76, 79, 85].

Повышение устойчивости ПЧ к аварийным режимам возможно за счёт увеличения ёмкости конденсаторов С-фильтра в ЗПН, что приведёт к увеличению броска зарядного тока, протекающего через ВВ после восстановления напряжения в питающей сети, и потребует применения токоограничивающих устройств, рассчитанных на большие токи.

Таким образом, возникновение провала напряжения в питающей сети, длительность которых не превышает время полного разряда конденсатора С-фильтра, приводит к отключению ГЧРП и остановке технологического оборудования, что подтверждает необходимость разработки устройств и способов их управления направленных на устранение влияния аварийных режимов, возникающих в питающей сети, на работу ПЧ входящих в состав ЧРП и ГЧРП.

#### **1.4. Способы повышения устойчивости группового частотно-регулируемого привода к аварийным режимам в питающей сети**

Установленные ранее проблемы влияния аварийных режимов на ПЧ требуют применения различных технических устройств, предотвращающих остановку ГЧРП при провалах напряжения в питающей сети. Для устранения влияния аварийных режимов на ПЧ возможно применение накопителей энергии на основе аккумуляторных батарей (АКБ) и суперконденсаторов [7, 8, 9]. В настоящее время, основным способом повышения устойчивости ЧРП и ГЧРП к провалам напряжения в системе электроснабжения является установка дополнительного накопителя энергии, который подключается к ЗПН и

обеспечивает поддержание напряжения в ЗПН при провалах напряжения в сети, что приводит к удорожанию оборудования.

Применение АКБ приводит к увеличению стоимости оборудования, определяемой стоимостью аккумуляторов и преобразователя АС/DC/АС, включенного между питающей сетью и АКБ. Принцип работы накопителей энергии на основе суперконденсаторов основан на медленном их заряде от сети, через преобразователь АС/DC, и быстрой отдачей накопленной энергии во время провалов напряжения в ЗПН [7, 8, 9].

А также возможно применение быстродействующих устройств АВР [71]. Оборудование данной категории предназначено для обеспечения нормального режима работы системы электроснабжения при изменении электрических параметров основного источника питания. Основная задача оборудования данной группы состоит в том, чтобы после устранения нарушений в работе системы электроснабжения, средствами систем релейной защиты восстановить нормальный режим питающей сети. Задача восстановления нормального режима решается за счёт использования АВР с высоким быстродействием [71].

Устройства АВР, в зависимости от требований к надёжности электроснабжения применяются как совместно с накопителями энергии на основе АКБ, так и отдельно. Работа АВР основана на контроле напряжения в питающей сети и переключении на резервный источник питания при достижении минимально допустимого напряжения на контролируемом участке. Время, в течение которого происходит срабатывание устройства АВР зависит от его конструктивной особенности и определяется [71].

В последнее время большое внимание уделяется применению совместно с ПЧ активного выпрямителя, установленного на входе ПЧ, обеспечивающего двухсторонний обмен энергии между двигателем электропривода и питающей сетью [1, 2, 80]. Применение активного выпрямителя позволяет обеспечить напряжение в ЗПН на требуемом уровне при изменении напряжения в питающей сети на  $\pm 10\%$  относительно номинального значения [1]. Управление углом сдвига фаз первой гармоники в активном выпрямителе позволяет

потреблять из сети ток синусоидальной формы и рассматривать электропривод как резистивную нагрузку [1, 2, 80]. Несмотря на явные достоинства, установка активного выпрямителя на входе ПЧ не решает задачи обеспечения работоспособности ПЧ при возникновении глубоких провалов напряжения и ограничения тока заряда конденсатора С-фильтра ЗПН после восстановления напряжения в питающей сети.

Применение алгоритмических способов управления АИН основанных на поддержании напряжения  $U_{dc}$  в ЗПН на уровне  $U_{dc.мин} < U_{dc} < U_{dc.ном}$  за счёт использования внутренних энергетических ресурсов привода направленных на увеличение времени ожидания восстановления нормального режима в сети не позволяет продлевать работу привода при напряжении  $U_{dc} < U_{dc.мин}$ , где  $U_{dc.мин}$  - напряжение при котором срабатывает ЗМН [12, 90].

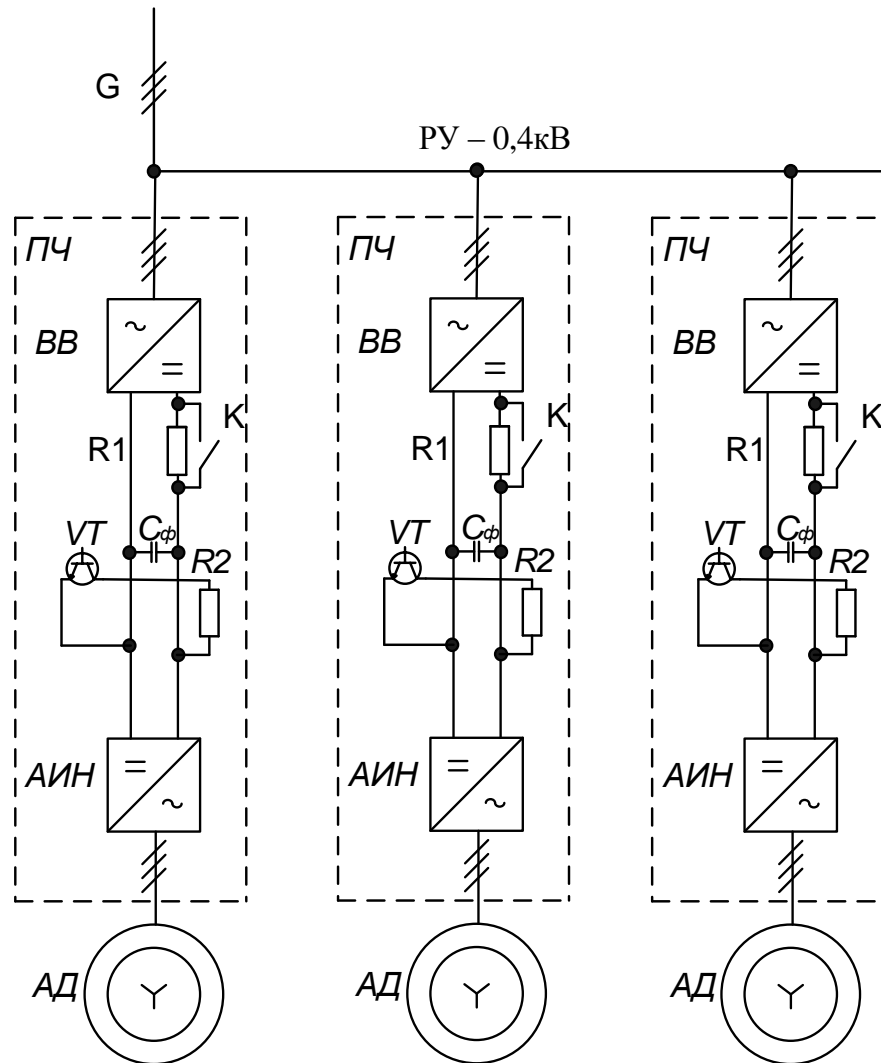
В процессе анализа существующих устройств установлено, что одной из актуальных задач, связанных с повышением устойчивости ЧРП и ГЧРП к провалам напряжения в питающей сети является разработка и исследование различных новых устройств и способов их управления, обеспечивающих работу ЧРП и ГЧРП при кратковременном снижении напряжения в ЗПН до уровня  $U_{dc} < U_{dc.мин}$  без отключения привода от питающей сети, а также устройств и способов их управления позволяющих ограничить ток заряда конденсаторов С-фильтра, устранить броски входных и выходных токов АИН при резком восстановлении напряжения в питающей сети с минимизацией времени повторного включения ГЧРП в работу после завершения аварийных режимов в питающей сети.

### **1.5 Исследование влияния провалов напряжения в питающей сети на существующий групповой частотно-регулируемый привод**

ГЧРП, реализованный на основе промышленных ПЧ, имеет особенности связанные с влиянием аварийных режимов, возникающих в системе

электроснабжения на его работу.

На рисунке 1.4 приведена функциональная схема существующей схемы ГЧРП, применяемой в промышленности [31, 72-74].



G – питающая сеть напряжением 0,4 кВ, ПЧ – преобразователи частоты, ВВ – индивидуальные входные выпрямители,  $C_{\phi}$  – конденсаторы С-фильтров, R1 – резисторы ограничения тока заряда конденсаторов  $C_{\phi}$ , K – шунтирующие ключи токоограничивающих резисторов, VT – транзисторные ключи тормозных резисторов, R2 – тормозные резисторы, АИН – автономные инверторы напряжения, АД – асинхронные двигатели.

Рисунок 1.4 – Функциональная схема существующего ГЧРП

АИН к выходам, которых подключены АД получают питание через ЗПН от индивидуальных ВВ. Индивидуальные ВВ подключены к трёхфазной питающей сети G напряжением 0,4 кВ. Транзисторные ключи VT подключают тормозные резисторы R2 к ЗПН для ограничения напряжения на конденсаторе  $C_{\phi}$  в процессе генераторного торможения АД. Токоограничивающие резисторы R1 совместно с шунтирующими ключами К образуют блоки ограничения тока заряда (ОТЗ) конденсаторов С-фильтра при подключении ГЧРП к питающей сети.

На имитационной модели ГЧРП показанной на рисунке 1.5 построенной в соответствии с функциональной схемой (рис. 1.4), проведён численный эксперимент для оценки скорости разряда конденсатора С-фильтра ЗПН, влияния на входной ток АИН и ток статора АД аварийного режима системы электроснабжения, приводящего к провалу напряжения на входе ВВ, а также для их оценки по завершению аварийного режима.

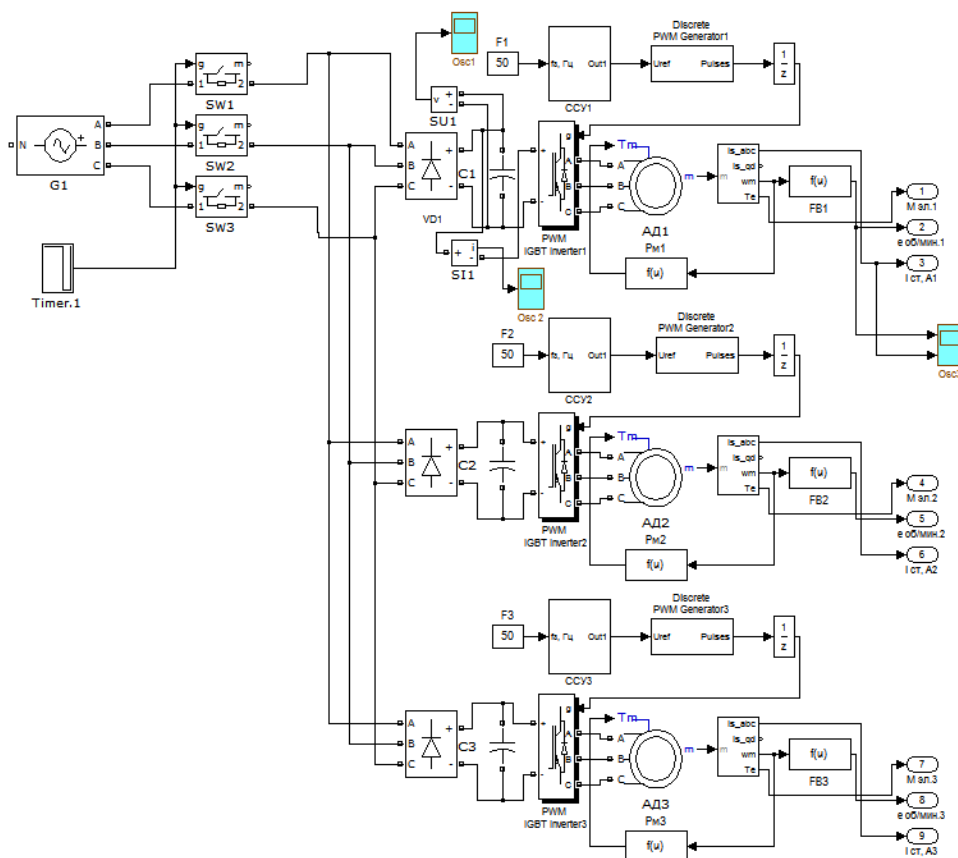


Рисунок 1.5 – Имитационная модель существующего ГЧРП

В состав имитационной модели ГЧРП с питающей сетью входят следующие элементы: источник трёхфазного напряжения (G1); таймер активации аварийного режима (Timer 1); ключи прерывания питающего напряжения (SW1-SW3); входные выпрямители (VD1-VD3); конденсаторы С-фильтра ЗПН (C1-C3); датчики скорости АД (F1-F3); собственные системы управления АИН (CCU1-CCU3); генераторы ШИМ (PWM1-PWM3); автономные инверторы напряжения (PWM IGBT Invertor1 - PWM IGBT Invertor 3); асинхронные двигатели (АД1-АД3); блоки механической нагрузки (Pm1-Pm3); измерительные блоки (FB1-FB3).

Рассматриваемая существующая схема ГЧРП представленная на (рис.1.4) имеет следующие особенности:

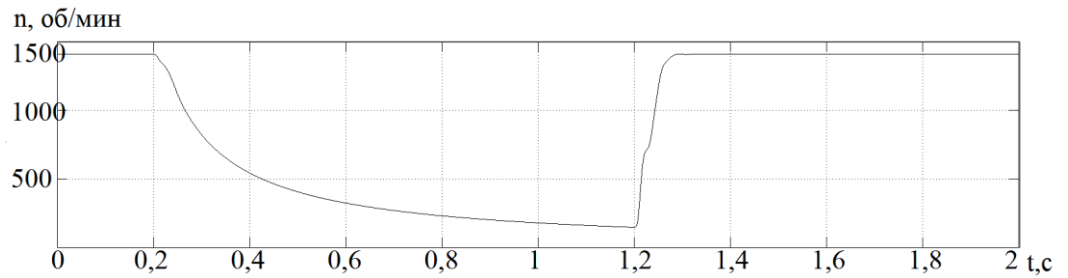
- возникновение случайных аварийных режимов в питающей сети приводит к снижению напряжения в ЗПН и срабатыванию встроенной в ПЧ ЗМН [51, 89, 90], с последующей аварийной остановкой ГЧРП [31];

- срабатывание ЗМН в одном из ПЧ приводит к остановке АД и нарушению синхронизации его скорости с остальными АД входящими в состав ГЧРП [31];

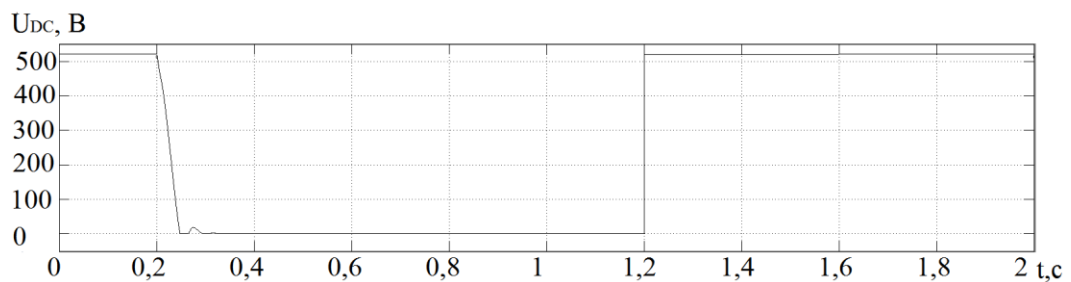
- наличие схемы ОТЗ, приводит к увеличению времени повторного включения ГЧРП после завершения аварийного режима в системе электроснабжения [52].

Полученные на имитационной модели ГЧРП результаты исследования представлены на рисунке 1.6. Из осциллограмм (рис. 1.6) видно, что после провала напряжения на входе ВВ происходит разряд конденсатора С-фильтра ЗПН (рис. 1.6, б), где время разряда конденсатора соответствует уравнению энергетического баланса (1.3). На интервале времени 0,2-1,2с происходит снижение скорости АД до значения  $0,1n_{ном}$  (см. рис. 1.7, а). В момент восстановления напряжения на входе АИН (см. рис. 1. 6, б при  $t=1,2$  с.) происходит увеличение тока статора АД в 5 раз по отношению к номинальному току статора АД (см. рис. 1.6, в). На рисунке 1.7 представлена осциллограмма

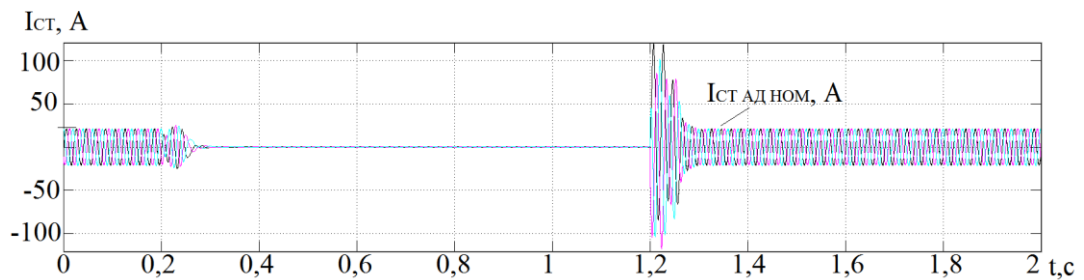
входного тока АИН ( $I_{ВХ\ АИН}$ ) в момент резкого восстановления напряжения на его входе, который также превышает номинальный ток ( $I_{НОМ}$ ).



а)



б)



в)

Рисунок 1.6 – Результаты исследования при глубоком провале напряжения в питающей сети:  $n$  – изменение скорости АД (а);  $U_{DC}$  – изменение напряжения в ЗПН (б);  $I_{СТ}$  – изменение тока статора АД (в)

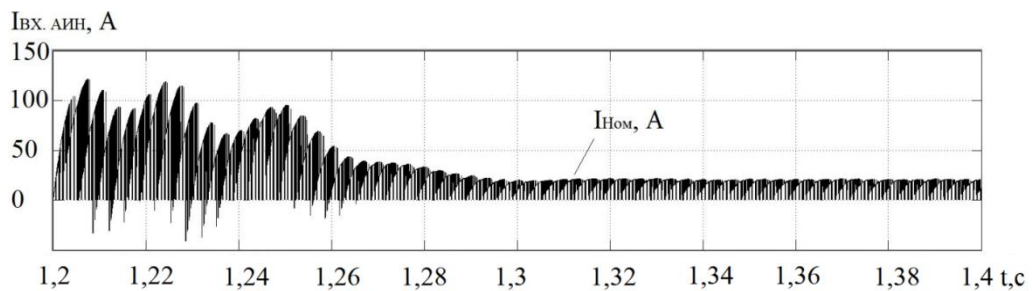


Рисунок 1.7 – Осциллограмма входного тока АИН в момент резкого восстановления напряжения на входе ВВ

Полученные результаты исследования по существующей схеме подтверждают, что при возникновении провала напряжения в системе электроснабжения происходит разряд конденсатора С-фильтра с переходом АД в режим свободного выбега со снижением скорости АД без его полной остановки, а при восстановлении напряжения на входе АИН возникает бросок тока статора и входного тока АИН, в результате чего в лучшем случае приостанавливается технологический процесс, а в целом сокращается срок службы электротехнических устройств соответственно.

Для непрерывного технологического процесса, допускающего кратковременное снижение скорости АД привода без его полной остановки, требуется применение устройств, позволяющих обеспечить включение ПЧ в работу с любого пониженного напряжения в ЗПН, а также разгона АД с пониженной скорости до номинальной, после восстановления напряжения в питающей сети при отсутствии бросков входного тока АИН и тока статора АД.

Таким образом, возникает необходимость разработки и исследования различных устройств и способов их управления для возможности устранения влияния аварийного режима в системе электроснабжения на работу электротехнических устройств, входящих в состав ГЧРП позволяющих сохранить продолжительность работы, минимизировать время повторного запуска, а также броски входного и выходного тока АИН.

## **1.6 Обоснование выбора методов и постановка задач исследования**

В результате рассмотрения и анализа существующих технических решений применяемых в ПЧ для минимизации потерь электроэнергии, уменьшения влияния аварийных режимов возникающих в системе электроснабжения на работу ГЧРП, устранения влияния ГЧРП на питающую сеть, возникает задача выбора рациональной структуры построения ЭТК с ГЧРП, отвечающей требованиям повышения устойчивости к аварийным режимам питающей сети при одновременной минимизации затрат на его реализацию и эксплуатацию.

В процессе анализа существующих способов и устройств, для повышения энергоэффективности и устойчивости ГЧРП к аварийным режимам в системе электроснабжения установлено, что требуется:

- выбрать рациональную схему построения системы электропитания АИН для повышения энергоэффективности ГЧРП;
- провести оценку энергоэффективности выбранной схемы системы электропитания ГЧРП;
- выполнить анализ влияния аварийных режимов на работу ЧРП и ГЧРП;
- разработать и исследовать способ управления АИН, позволяющий обеспечить работу ГЧРП без его аварийной остановки, а также перегрузки АИН при возникновении аварийных режимов в питающей сети и снижении напряжения в ЗПН до значения  $U_{dc} \leq U_{dc.мин}$  с целью увеличения продолжительности его работы;
- разработать способ направленный на ограничение зарядного тока конденсаторов С- фильтра большой ёмкости ЗПН позволяющий снизить токи в цепи питания ГЧРП до номинального значения при восстановлении нормального режима в питающей сети, а также устранение влияния ГЧРП на электрооборудование питающей сети и минимизацию времени подготовки ГЧРП к повторному включению;
- провести оценку эффективности предложенных способов и устройств позволяющих увеличить время ожидания нормального режима питающей сети после возникновения аварийного режима направленных на повышение устойчивости ГЧРП к аварийным режимам системы электроснабжения.

Для возможности проведения исследований ГЧРП предлагается использовать метод имитационного моделирования, который заключается в разработке компьютерной модели, позволяющий проводить анализ электромагнитных процессов, протекающих в системе электроснабжения и ПЧ основанный на их математическом описании [84].

Применение имитационного моделирования [84] позволяет ускорить и удешевить процесс исследования за счёт варьирования вариантами построения

ССУ, АИН, ГЧРП, управления нормальными и аварийными режимами системы электроснабжения.

### **Выводы по первой главе**

1. В процессе проведённого обзора по надёжности функционирования существующего ГЧРП, выявлены особенности работы частотно-регулируемого привода при провалах напряжения в питающей сети.

2. Выявлено, что не смотря на существующие способы управления АИН при провалах напряжения не решена задача сохранения управления приводом при понижении напряжения в ЗПН ниже уставки ЗМН и сохранения продолжительности работы технологического процесса.

3. Результаты исследования подтвердили, что существующие технические решения по ограничению зарядного тока конденсаторов С-фильтров не обеспечивают безинерционный запуск привода после восстановления напряжения в питающей сети.

4. Обоснована необходимость разработки и исследования устройства и способов их управления для сохранения продолжительности работы, уменьшение времени повторного запуска, бросков входного и выходного тока АИН в процессе преодоления провалов напряжения в питающей сети.

## **Глава 2. Анализ и исследование влияния питающей сети на работу группового частотно-регулируемого привода в условиях эксплуатации при нестабильности питающего напряжения**

### **2.1 Водная часть**

Анализ и исследование существующих ГЧРП представленных в обзорной части диссертационной работы, показали необходимость разработки нового устройства и новых способов повышения устойчивости ГЧРП к аварийным режимам в системе электроснабжения.

Рассмотренная ранее схема ГЧРП, в которой группа АИН с индивидуальными АД объединена ЗПН с выходом общего ВВ, требует дополнительного исследования вопросов устойчивости ГЧРП к влиянию аварийных режимов в системе электроснабжения. Для разработки способов повышения устойчивости ГЧРП к провалам напряжения в питающей сети, возникающих на различных уровнях напряжения питающей сети, необходимо оценить их влияние на работу ГЧРП.

Анализ влияния провалов напряжения, возникающих в питающей сети на работу ЗПН и АИН необходим для выбора оптимального способа управления АИН на интервале времени на котором возникает провал напряжения в питающей сети. Для обеспечения работоспособности ГЧРП в аварийных режимах питающей сети необходимо рассмотреть возможность применения схемы электропитания с объединением входов АИН входящих в состав ГЧРП общим ЗПН с выходом ВВ совместно с использованием способов управления АИН для увеличения времени ожидания восстановления напряжения в питающей сети и минимизации остаточного напряжения в ЗПН при наличии провала напряжения в питающей сети, а также для ограничения тока заряда конденсаторов С-фильтра ЗПН после его восстановления.

При управлении ГЧРП с группой АИН, объединённых общим ЗПН возникает также необходимость дополнительного исследования способов

заряда конденсаторов С-фильтра ЗПН с целью минимизации влияния зарядного тока на электрооборудование системы электроснабжения после восстановления напряжения в питающей сети.

Таким образом, учитывая недостатки существующих электротехнических устройств при аварийном режиме работы питающей сети, в диссертационной работе предлагается новое устройство и способы его управления для возможности обеспечения нормального функционирования и повышения эффективности работы электротехнических систем с ГЧРП в динамических режимах работы.

## **2.2 Обоснование преимущества объединения автономных инверторов напряжения общим звеном постоянного напряжения**

ГЧРП реализованный с применением ПЧ имеет ряд особенностей, которые рассмотрены в главе 1. Для повышения энергоэффективности ГЧРП за счёт полезного использования энергии генераторного торможения и устранения влияния провала напряжения в питающей сети на работу ГЧРП, необходимо рассмотреть возможность применения схемы, в которой все АИН ГЧРП объединены общим ЗПН и получают питание от общего выпрямителя [34].

На рисунке 2.1 представлена функциональная схема ГЧРП, где АИН подключены через общее ЗПН к выходу ВВ. Преимущество предложенного технического устройства по сравнению с существующим устройством (см. рис.1.4), в котором каждый АИН получает питание от индивидуального ВВ, заключается в повышении энергоэффективности за счёт использования энергии генераторного торможения в процессе энергообмена между АД, работающими в двигательном и режиме генераторного торможения, через общее ЗПН [13, 29, 34, 95], а также обеспечения синхронизации скорости АД при возникновении провалов напряжения в питающей сети и снижении напряжения в ЗПН [33].

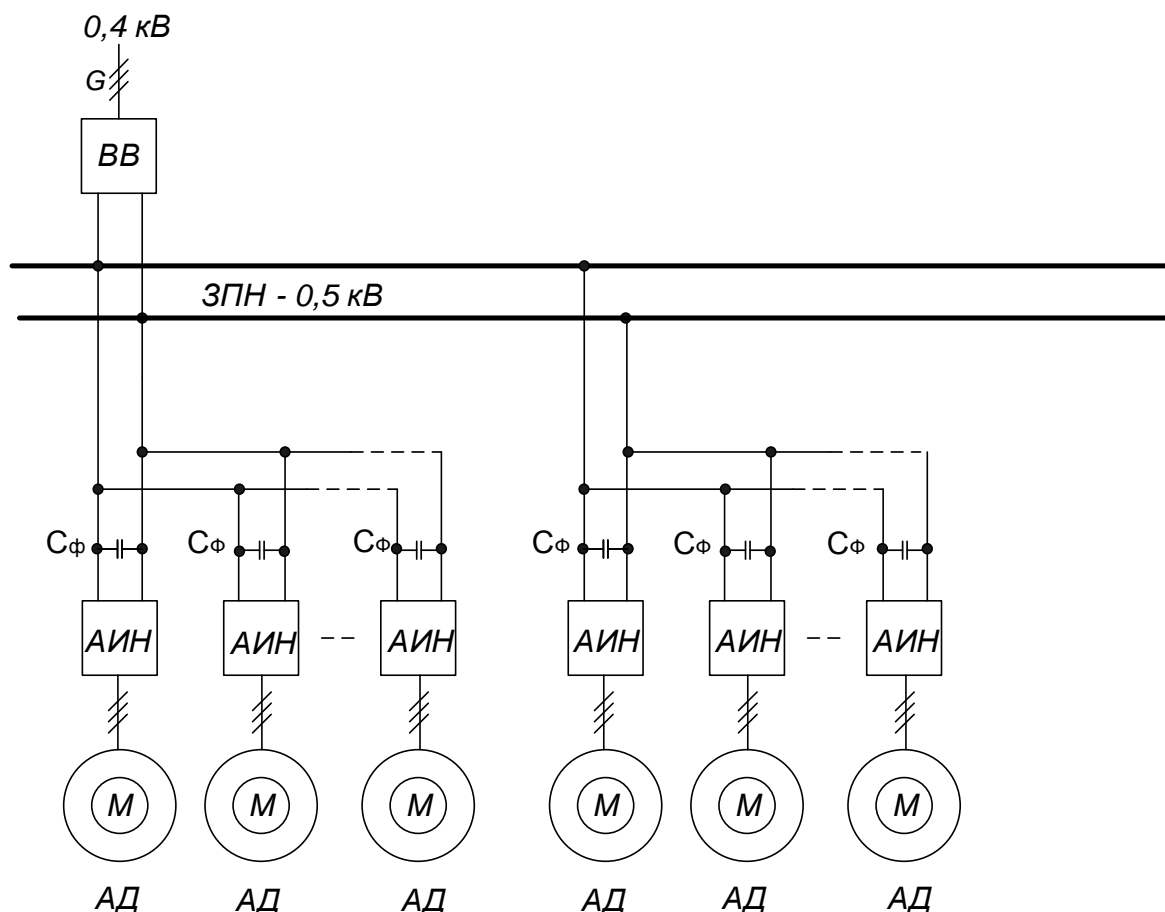


Рисунок 2.1– Функциональная схема ГЧРП с объединением АИН по входу общим ЗПН

В состав ГЧРП (рис. 2.1) входят: питающая сеть (G) напряжением 0,4 кВ; общий ВВ; общее ЗПН; конденсаторы С-фильтра ( $C_{\phi}$ ); автономный инвертор напряжения (АИН); асинхронный двигатель (АД). Повышение энергоэффективности в схеме с применением общего ВВ для группы АИН достигается за счёт устранения эффекта рассеивания энергии генераторного торможения на тормозных резисторах при их исключении [34], а также уменьшения количества преобразований энергии в 2 раза по сравнению со случаем, где в качестве ВВ (см. рис. 1.4) используются обратимые преобразователи напряжения.

Устранение влияния аварийных режимов, возникающих в питающей сети на работу ГЧРП в схеме (рис. 2.1), возможно за счёт поддержания

напряжения в ЗПН при принудительном переводе части АД в режим генераторного торможения на интервале ожидания нормального режима питающей сети [33].

Схема построения ГЧРП с объединением группы АИН по входу общим ЗПН (рис. 2.1) имеет особенность, связанную с возникновением большого тока заряда конденсаторов  $C_{\phi}$  при резком восстановлении напряжения в питающей сети  $G$  для ограничения которого требуется блок ОТЗ, что приводит к увеличению времени подготовки к повторному запуску АД.

Технические решения задач ограничения зарядного тока конденсаторов  $C_{\phi}$ , при подключении ЗПН к питающей сети, отражены в работе [52]. Существуют основные способы ограничения зарядного тока конденсаторов  $C_{\phi}$  ЗПН:

- резистивной схемой;
- транзисторной схемой;
- тиристорной схемой;
- индуктивностью реактора включенного на входе выпрямителя;
- дросселя, установленного между выходом общего ВВ и конденсатором С-фильтра в ЗПН.

Ограничение резистивной схемой при своей простоте и надёжности имеет недостатки: сопротивление и мощность рассеивания резистора подбираются один раз под конкретную активно-ёмкостную нагрузку, что не позволяет наращивать количество АИН подключенных к ЗПН без изменения параметров схемы. Для ограничения тока заряда конденсатора С-фильтра ЗПН большой ёмкости требуется резистор достаточно большого сопротивления и мощности рассеивания, а также коммутирующий ключ для шунтирования резистора применение которых, увеличивает время восстановления напряжения в ЗПН после его провала в питающей сети [52] и подготовку к автоматическому повторному включению ЧРП. Увеличение времени АПВ ЧРП ограничивает возможность применения резистивного ограничителя в ГЧРП, где по условиям технологического процесса требуется быстрый запуск в работу оборудования, после восстановления напряжения в питающей сети.

Ограничение зарядного тока с помощью транзистора работающего в ключевом режиме. В ключевом режиме управление током заряда конденсатора С-фильтра осуществляется с использованием ШИМ. Применение ШИМ для заряда конденсаторов С-фильтра большой ёмкости нецелесообразно, по причине большого эквивалентного сопротивления цепи заряда, определяемого соотношением скважности импульсов и максимально допустимой мощности рассеивания транзистора [52].

Использование управляемого тиристорного ВВ имеет ряд преимуществ перед рассмотренными выше способами [52]. Для тиристорного ВВ характерно управление углом отпирания от  $120^\circ$  до  $0^\circ$ , что позволяет регулировать зарядный ток  $C_\phi$  в широком диапазоне при достаточной устойчивости к изменению нагрузки и импульсным токам большой амплитуды, способностью работать на больших мощностях. Применение тиристорного ВВ в режиме ограничения зарядного тока конденсаторов С-фильтра ЗПН приводит к увеличению гармонических составляющих тока в питающей сети, что является его существенным недостатком [28].

Использование для ограничения тока заряда дросселя с большой индуктивностью, включенного в ЗПН между выходом ВВ и  $C_\phi$ , приводит к увеличению напряжения на конденсаторах  $C_\phi$ , из-за влияния ЭДС самоиндукции на напряжение в ЗПН после завершения процесса нарастания тока в дросселе [28]. Применение реактора с большой индуктивностью, включенного на входе ВВ, приводит к снижению напряжения в ЗПН при номинальной нагрузке ГЧРП. Для устранения недостатков характерных для существующих схем ограничения зарядного тока конденсаторов  $C_\phi$  требуется разработка и исследование новых способов ограничения зарядного тока конденсаторов  $C_\phi$  для схемы ГЧРП в которой входы АИН объединены общим ЗПН с выходом ВВ [57].

При построении ГЧРП по схеме, где АИН, объединённые по входу общим ЗПН с выходом общего ВВ, выпрямитель устанавливается в распределительном устройстве понижающего трансформатора 10/0,4 кВ. Электропитание АИН

технологического оборудования в этом случае осуществляется от общих шин ЗПН, (рис. 2.1). Использование АИН и АД с номинальным напряжением  $U_{\text{ном}}=380\text{В}$  требует напряжения  $U_{\text{ЗПН}}=537,4\text{В}$  в ЗПН в место напряжения  $U_{\sim} = 380\text{В}$ , что снижает нагрузку на кабельные линии в  $k_1 = \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{ЗПН}}} = 0,707$ , чем обеспечивается снижение потерь напряжения в 1,2 раза по сравнению с системой питания на переменном токе [56]. Дополнительный экономический эффект можно получить так же за счёт снижения сечения проводников кабельных линий и шинопроводов применяемых для построения ЗПН [56].

### 2.3 Влияния аварийных режимов на напряжение питающей сети

Возникновение аварий в питающей сети носит случайный характер и оказывает различное влияние на амплитуду и форму напряжения в фазах трёхфазной системы. В соответствии с ГОСТ 32144-2013 на нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения внезапное возникновение аварийного режима приводит к:

- прерыванию напряжения;
- провалам напряжения;
- перенапряжению;
- возникновению импульсного напряжения.

Прерывания напряжения могут быть как преднамеренными, так и случайными, вызванные в основном неисправностями электрооборудования системы электроснабжения. Возникновение провалов напряжения также связано с неисправностями в распределительной электрической сети и электроустановках потребителей при подключении мощной нагрузки к распределительной сети и т.д. [17]. Перенапряжение в системе электроснабжения между различными фазами может возникать при переключениях и отключениях мощной нагрузки [17]. Импульсы повышенного напряжения возникают при воздействии на протяжённые линии электропередач

атмосферного перенапряжения и процессов коммутации, возникающих в электрических сетях [17].

Неисправности в системе электроснабжения могут приводить как к одинаковому изменению значения и формы напряжения в разных фазах, так и различному в каждой из фаз. При одинаковой форме напряжения во всех фазах трёхфазной сети изменение напряжения называют симметричным, а при разной форме и амплитуде напряжения в фазах изменение напряжения считается асимметричным [17, 77]. На степень асимметрии напряжения в фазах трёхфазной системы влияют:

- способы соединения с землёй средних точек силовых трансформаторов, входящих в состав системы электроснабжения;
- типы коротких замыканий, возникающих в системе электроснабжения;
- схемы соединения обмоток трёхфазных силовых трансформаторов;
- способы соединения фаз мощных электроприёмников.

Влияние совокупности схем соединения средних точек и обмоток силовых трансформаторов, типов КЗ в системе электроснабжения, способов соединения фаз электроприёмников на амплитуду и форму напряжения удобно описывать моделью, характеризующей основные типы провалов напряжения в трёхфазной сети [87]. Для описания модели, характеризующей основные типы провалов напряжения, используют алгебраические выражения в комплексной форме.

При симметричном провале напряжения происходит снижение амплитуды напряжения во всех фазах не зависимо от способа соединения нагрузки и обмоток трансформатора, возникающее при трёхфазном КЗ:

$$u_A = u_{\text{ост.}} \quad (2.1)$$

$$u_B = -\frac{1}{2}u_{\text{ост.}} + j\frac{\sqrt{3}}{2}u_{\text{ост.}} \quad (2.2)$$

$$u_C = -\frac{1}{2}u_{\text{ост.}} - j\frac{\sqrt{3}}{2}u_{\text{ост.}} \quad (2.3)$$

Где:  $u_A, u_B, u_C$  – фазные напряжения;

$u_{\text{ост.}}$  – остаточное фазное напряжение при возникновении короткого замыкания.

Однофазный провал напряжения возникающий в распределительной сети с глухо заземлённой нейтралью при КЗ в одной из фаз:

$$u_A = u_{\text{ост.}} \quad (2.4)$$

$$u_B = -\frac{1}{2}u_m - j\frac{\sqrt{3}}{2}u_m \quad (2.5)$$

$$u_C = -\frac{1}{2}u_m + j\frac{\sqrt{3}}{2}u_m \quad (2.6)$$

Где:  $u_m$  – фазное напряжение при нормальном режиме работы сети.

Двухфазный провал напряжения и сдвиг фаз при однофазном коротком замыкании:

$$u_A = u_m \quad (2.7)$$

$$u_B = -\frac{1}{2}u_m - j\frac{\sqrt{3}}{2}u_{\text{ост.}} \quad (2.8)$$

$$u_C = -\frac{1}{2}u_m + j\frac{\sqrt{3}}{2}u_{\text{ост.}} \quad (2.9)$$

Однофазный провал напряжения и сдвиг фаз при межфазном коротком замыкании:

$$u_A = u_{\text{ост.}} \quad (2.10)$$

$$u_B = -\frac{1}{2}u_{\text{ост.}} - j\frac{\sqrt{3}}{2}u_m \quad (2.11)$$

$$u_C = -\frac{1}{2}u_{\text{ост.}} + j\frac{\sqrt{3}}{2}u_m \quad (2.12)$$

Двухфазный провал напряжения при двухфазном коротком замыкании на землю:

$$u_A = u_m \quad (2.13)$$

$$u_B = -\frac{1}{2}u_{\text{ост.}} - j\frac{\sqrt{3}}{2}u_{\text{ост.}} \quad (2.14)$$

$$u_C = -\frac{1}{2}u_{\text{ост.}} + j\frac{\sqrt{3}}{2}u_{\text{ост.}} \quad (2.15)$$

Несимметричный провал напряжения с изменением угла сдвига фаз при двухфазном коротком замыкании на землю первого вида:

$$u_A = u_{\text{ост.}} \quad (2.16)$$

$$u_B = -\frac{1}{2}u_{\text{ост.}} - j\left(\frac{\sqrt{3}}{6}u_{\text{ост.}} + \frac{\sqrt{3}}{3}u_m\right) \quad (2.17)$$

$$u_C = -\frac{1}{2}u_{\text{ост.}} + j\left(\frac{\sqrt{3}}{6}u_{\text{ост.}} + \frac{\sqrt{3}}{3}u_m\right) \quad (2.18)$$

Несимметричный провал напряжения с изменением угла сдвига фаз при двухфазном коротком замыкании на землю второго вида:

$$u_A = \frac{2}{3}u_m + \frac{1}{3}u_{\text{ост.}} \quad (2.19)$$

$$u_B = -\frac{1}{3}u_m - \frac{1}{6}u_{\text{ост.}} - j\frac{\sqrt{3}}{2}u_{\text{ост.}} \quad (2.20)$$

$$u_C = -\frac{1}{3}u_m - \frac{1}{6}u_{\text{ост.}} - j\frac{\sqrt{3}}{2}u_{\text{ост.}} \quad (2.21)$$

Для анализа влияния провала напряжения возникающего в питающей сети на работу ГЧРП, реализованного по схеме объединения общим ЗПН группы АИН с выходом ВВ, необходимо провести оценку его влияния на напряжение ЗПН с учётом ёмкости конденсаторов С-фильтра. Для проведения исследований влияния разных типов аварий в системе электроснабжения на работу ГЧРП необходимо разработать имитационную модель ГЧРП и выбрать оптимальную методику расчёта ёмкости конденсатора С-фильтра ЗПН.

#### **2.4. Разработка имитационной модели частотно-регулируемого привода**

Для проведения исследования влияния аварийных режимов питающей сети на работу ГЧРП разработана имитационная модель системы управления (СУ) АИН ЧРП с разомкнутой системой скалярного управления электроприводом, описание которой представлено в работах [29, 35, 65], представленная на рисунке 2.2. Имитационная модель СУ АИН ЧРП с разомкнутой системой скалярного управления электроприводом состоит из: задатчика выходной частоты АИН ( $f_{\text{вых.аин.з}}$ ); функционального блока задания выходной частоты АИН (Funct 1); функционального блока выполнения закона частотного регулирования (Funct 2); генераторов синусоидальных колебаний (Funct 3, Funct 4, Funct 5); элементов умножения (Mul 1 - Mul 3); генератора с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) (PWM G); конденсатора С-фильтра ( $C_{\text{ф}}$ );

автономного инвертора напряжения (АИН); асинхронного двигателя (АД); механической нагрузки (МН).

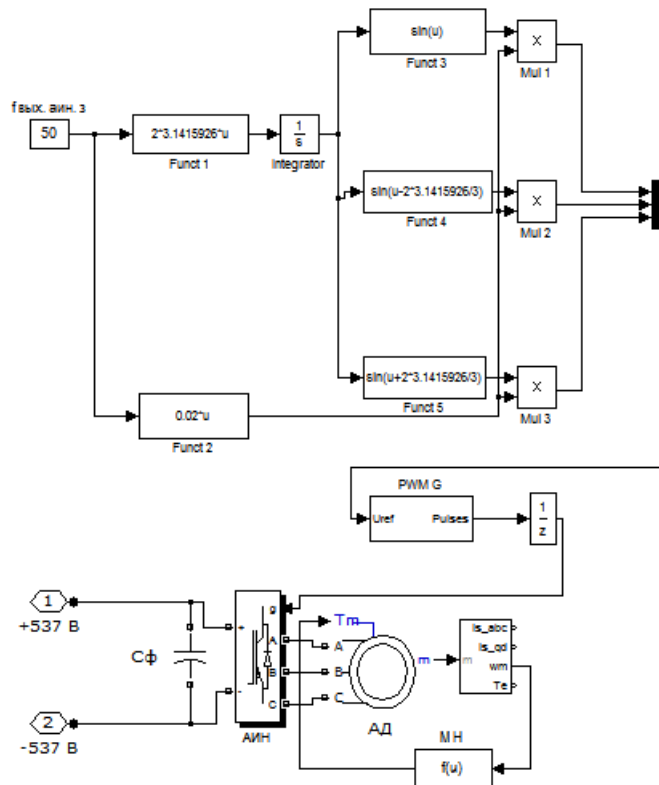


Рисунок 2.2 – Имитационная модель СУ АИН ЧРП

Работа системы управления АИН основывается на выражениях:

$$U_{\text{вых.АИН(А)}} = \frac{K \cdot \sin(2\pi f_{\text{вых.АИН.}}) \cdot U_{DC \text{ ном.}}}{\sqrt{2}} \quad (2.22)$$

$$U_{\text{вых.АИН(В)}} = \frac{K \cdot \sin(2\pi f_{\text{вых.АИН.}} + 120^\circ) \cdot U_{DC \text{ ном.}}}{\sqrt{2}} \quad (2.23)$$

$$U_{\text{вых.АИН(В)}} = \frac{K \cdot \sin(2\pi f_{\text{вых.АИН.}} + 240^\circ) \cdot U_{DC \text{ ном.}}}{\sqrt{2}} \quad (2.24)$$

Где:  $K$  – коэффициент заполнения ШИМ, изменяющийся в диапазоне  $K = 0 \div 1$  при управлении  $f_{\text{вых.аин.з.}} = 0 \div 50$  Гц;

$f_{\text{вых.АИН.}}$  – выходная частота АИН, определяемая заданием  $f_{\text{вых.аин.з.}}$

Регулировочная характеристика системы управления подчиняется пропорциональному закону частотного регулирования  $U/f = \text{const}$ . На выходе блоков Mul 1- Mul 3 формируется сигнал синусоидальной формы с амплитудой и частотой, изменяющейся в соответствии с законом частотного регулирования  $U/f = \text{const}$  используемый для управления коэффициентом заполнения ШИМ  $K$

в блоке PWM G. Изменение коэффициента заполнения ШИМ К в блоке PWM G, осуществляется в соответствии с изменением амплитуды и частоты синусоидальных сигналов, поступающих с выходов блоков Mul1- Mul3. С выхода блока PWM G, импульсы управления с изменяющейся скважностью поступают на АИН, где управляют его транзисторными ключами.

При исследовании влияния провалов напряжения в системе электроснабжения на работу ГЧРП возникает вопрос выбора оптимальной ёмкости конденсатора С-фильтра ЗПН. Классический метод расчета заключается в рассмотрении конденсатора как фильтрующего элемента, используемого для уменьшения низкочастотной составляющей пульсаций напряжения [37, 38].

Пульсации в ЗПН возникают при работе ВВ и зависят от его исполнения. Выходное напряжение  $U_{DC}$  ВВ не является постоянным и может быть представлено выражением:

$$U_{DC} = U_{DC0} + \Delta U_{DC}, \quad (2.25)$$

Где:  $U_{DC0}$  – постоянная составляющая напряжения;

$\Delta U_{DC}$  – переменная составляющая.

Переменная составляющая является функцией частоты [37, 38]:

$$\Delta U_{DC} = U_{DC0} \cdot (m \cdot \omega \cdot t). \quad (2.26)$$

Частота переменной составляющей зависит от типа применяемого выпрямителя. Различают 6-и, 12-и, 18-и, 24 – m импульсные схемы (m=6/12/18/24), где например для 6-и импульсной схемы частота первой гармоники пульсаций составляет 300Гц.

Коэффициент пульсаций  $q$  определяется по амплитуде первой (основной) гармоники как наибольшей из всех остальных и наиболее трудно поддающейся фильтрации[37, 38]:

$$q = \frac{U_{DC}}{U_{DC0}} = \frac{2}{m^2-1}. \quad (2.27)$$

Для 6-и импульсной схемы он составляет 5,7%.

Для расчёта требуемого коэффициента пульсаций (рекомендуемое значение 0,02), используется выражение позволяющее определить требуемую ёмкость конденсатора С-фильтра ЗПН:

$$C_{\phi} = \frac{I_d}{2 \cdot U_{DC0} \cdot m \cdot f \cdot q}, \quad (2.28)$$

Где:  $I_d$  – действующее значение тока в звене постоянного напряжения (А);  
 $f$  – частота питающей сети (Гц).

При выборе ёмкости конденсатора С-фильтра необходимо учитывать следующие особенности:

- пульсации напряжения питания инвертора  $U_{\max}/U_{\min}$  не должны влиять на управление системой и качество регулирования напряжения на выходе АИН;
- минимальная величина  $U_{\min}$  при снижении напряжения питания на заданное время (как правило, половина периода или период сетевой частоты) не должна быть ниже уровня значения уставки срабатывания ЗМН ПЧ, как правило это значение составляет 80% от номинального напряжения.

Значение ёмкости  $C_{\phi}$ , удовлетворяющее обоим требованиям, может быть найдено с помощью следующего выражения [15, 37, 38]:

$$C_{\phi} \geq \frac{2 \cdot P \cdot T}{U_{DC}^2 - (0,8 \cdot U_{DC})^2}, \quad (2.29)$$

Где:  $P$  – активная мощность нагрузки (электродвигателя), подключенной к выходу автономного инвертора напряжения (Вт);

$T$  – период напряжения сети (0,02с.).

В случае использования конденсатора С-фильтра как элемента аккумулирования энергии, отдаваемой АД в ЗПН при генераторном режиме торможения, допустимое увеличение напряжения в ЗПН составляет [15, 37, 38]:

$$\Delta U_{\text{доп}} = 1,2 \cdot U_{DC0}, \quad (2.30)$$

Напряжение на конденсаторе может неконтролируемо увеличиваться при избыточной энергии генераторного торможения лишь в течении времени запаздывания системы управления блоком гашения избыточного напряжения, которое принимается равным  $T_m = 0,002\text{с.}$

Отдаваемая кинетическая энергия при генераторном торможении определяется как [15, 37, 38]:

$$\Delta W_{\text{кин.}} = \frac{J \cdot (\omega_1^2 - \omega_2^2)}{2}, \quad (2.31)$$

Где:  $J$  – приведенный момент инерции привода (Н·м);

$\omega_1$  – скорость АД в начале торможения;

$\omega_2$  – скорость АД в конце торможения.

При  $T_m \ll T_\mu$ , где  $T_\mu$  – интервал времени в течение которого останавливается механизм и выразив  $\omega_2$  через  $\omega_1$ , получим выражение для определения кинетической энергии [15, 37, 38]:

$$\Delta W_{\text{кин.}} = T_\mu \cdot (\delta + 1) \cdot P_n, \quad (2.32)$$

Где:  $\delta$  – перегрузочная способность (составляет 3-4);

$P_n$  – активная мощность нагрузки (Вт).

Энергия, накапливаемая при этом конденсатором определяется выражением [15, 37, 38]:

$$\Delta W_{\text{эл.}} = \frac{C_\phi \cdot ((U_{DC0} + \Delta U_{\text{доп}})^2 - U_{DC0}^2)}{2}. \quad (2.33)$$

Приравнявая (2.32) и (2.33), выражение для расчёта емкости конденсатора примет вид [15, 37, 38]:

$$C_\phi = \frac{2 \cdot T_\mu \cdot (\delta + 1) \cdot P_n}{(U_{DC0} + \Delta U_{\text{доп}})^2 - U_{DC0}^2}. \quad (2.34)$$

В генераторном режиме торможения происходит блокировка силовых транзисторных ключей АИН и накопленная в АД электромагнитная энергия передается в ЗПН через обратный мостовой выпрямитель АИН. Запасённая электромагнитная энергия  $\Delta W_0$  перед снятием управляющих импульсов определяется выражением:

$$\Delta W_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot I_1^2 \cdot L_{1n}, \quad (2.35)$$

Где:  $I_1$  – действующее значение фазного тока АД, А;

$L_{1n}$  – переходная индуктивность обмотки статора АД, Гн.

Переходная индуктивность обмотки статора АД определяется по формуле [15, 37, 38]:

$$L_{1n} = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}, \quad (2.36)$$

Где:  $L_1$  – индуктивность обмотки статора АД;

$L_2$  – индуктивность обмотки ротора АД;

$L_m$  – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора АД.

Приравнивая выражения (2.33) и (2.35) для расчёта ёмкости конденсатора С-фильтра ЗПН имитационной модели ГЧРП примет вид:

$$C_\phi = \frac{3}{2} \cdot \frac{I_1^2 \cdot L_{1n}}{(U_{DC0} + \Delta U_{доп})^2 - U_{DC0}^2}. \quad (2.37)$$

## **2.5 Исследование влияния провалов напряжения питающей сети на звено постоянного напряжения**

На рисунке 2.3 представлена функциональная схема системы электроснабжения ГЧРП выполненная по радиальной схеме, на основе которой разработана имитационная модель для проведения исследования влияния аварийных режимов на работу ГЧРП

Основной целью данного исследования является оценка влияния аварийных режимов, возникающих в различных участках питающей сети на напряжение ЗПН. Имитационное моделирование аварийных режимов проводилось при соединении обмоток главного трансформатора Т1 по схеме Y/Δ и Y/Y, а трансформаторов Т2-Т9 по схеме Y/Y. Имитация аварийных режимов проводилась на следующих участках (см. рис 2.3):

- на стороне высокого напряжения (ВН) 110кВ главного трансформатора Т1;
- на стороне низкого напряжения (НН) 10кВ главного трансформатора Т1;
- на стороне НН трансформатора Т5.

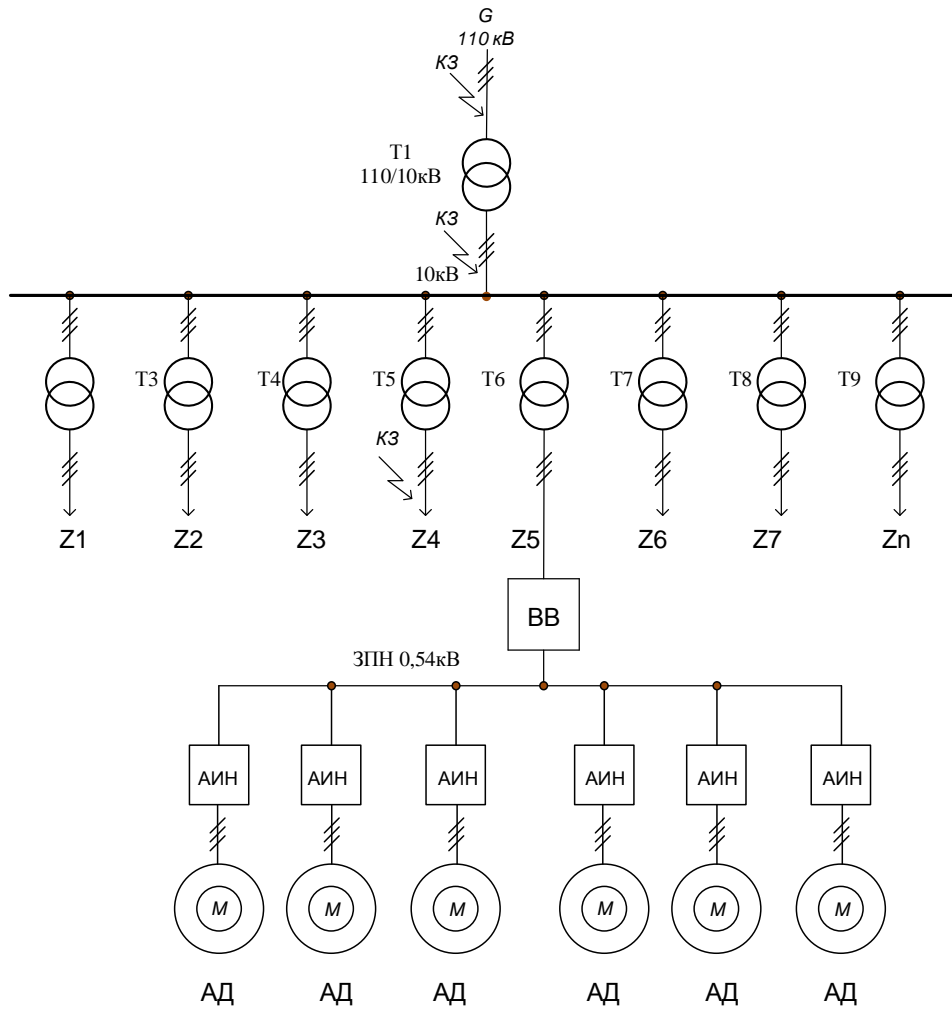


Рисунок 2.3 – Функциональная схема системы электроснабжения ГЧРП

Функциональная схема системы электроснабжения ГЧРП (рис. 2.3) состоит из: питающей сети (G) напряжением 110кВ; понижающего главного трансформатора (Т1) напряжением 110/10кВ; сети 10кВ; понижающих трансформаторов (Т2-Т9) с напряжением 10/0,4кВ; распределительного устройства напряжением 0,4кВ к которому подключен общий выпрямитель для группы АИН ГЧРП (ВВ); общего звена постоянного напряжения (ЗПН 0,54кВ); автономных инверторов напряжения (АИН); индивидуальных асинхронных двигателей (АД) подключенных к выходам АИН.

К вторичным обмоткам понижающих трансформаторов с напряжением 10/0,4кВ подключены потребители электрической энергии  $Z_1-Z_n$ . Потребителем

П5 является ГЧРП в котором группа АИН с индивидуальными АД объединена по входу общим ЗПН с выходом ВВ.

Для оценки изменения напряжения в ЗПН ГЧРП при аварийных режимах работы питающей сети, разработана имитационная модель ГЧРП, согласно с функциональными схемами ГЧРП (см. рис. 2.1), СУ (см. рис. 2.2) и системы электроснабжения ГЧРП (см. рис. 2.3), которая представлена на рисунке 2.4.

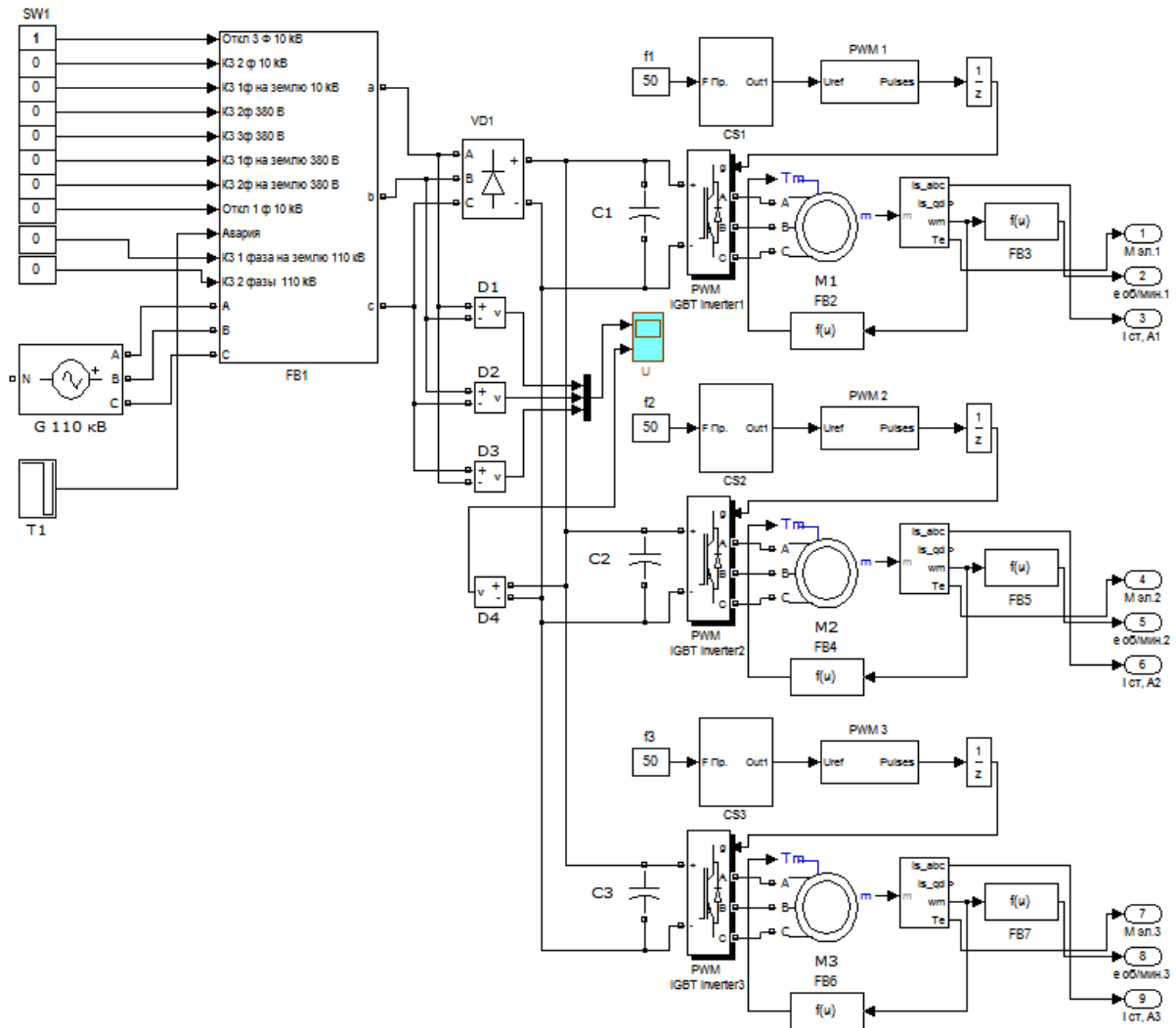


Рисунок 2.4 – Имитационная модель ГЧРП

В состав имитационной модели ГЧРП входят следующие элементы: коммутатор выбора вида аварийных режимов (SW1); источник трёхфазного напряжения (G1); таймер активации аварийного режима (T1); блок трансформаторной подстанции (FB1) (см. рис. 2.5); общий входной

выпрямитель (VD1); конденсаторы С-фильтра ЗПН (C1-C3); задатчики скорости АД (f1-f3); СУ АИН ЧПП с разомкнутой системой скалярного управления асинхронным электроприводом (CS1-CS3); автономные инверторы напряжения (PWM IGBT Invertor1 - PWM IGBT Invertor3); асинхронные двигатели (M1-M3); блоки механической нагрузки (FB2, FB4, FB6); генераторы ШИМ (PWM1-PWM3); измерительные блоки (FB3, FB5, FB7).

Рассмотрим функционирование элементов представленных на рисунке 2.4. По таймеру T1 в блоке FB1 происходит формирование аварийного режима питающей сети в зависимости от выбранного его типа коммутатором SW1. Трёхфазное напряжение поступает на вход VD1, с выхода которого напряжение постоянного тока через общее ЗПН с подключенными к нему конденсаторами C1- C3 поступает на входы автономных инверторов напряжения PWM IGBT Invertor1 - PWM IGBT Invertor3. Управление автономными инверторами напряжения PWM IGBT Invertor1- PWM IGBT Invertor3 с подключенными к их выходам АД осуществляется генераторами с ШИМ PWM1-PWM3, на входы которых, поступают сигналы управления с систем скалярного управления асинхронным электроприводом CS1-CS3. Управление скоростью АД осуществляется в соответствии с заданием, полученным от задатчиков скорости f1-f3. В качестве механической нагрузки АД используются блоки FB2, FB4, FB6.

На рисунке 2.5 представлен развёрнутый блок трансформаторной подстанции FB1. В состав блока FB1 входят следующие элементы: понижающий трансформатор 110/10кВ (T1); понижающие трансформаторы 10/0,4кВ (T2-T6); кабельные и воздушные линии (L1-L6); логические элементы, образующую схему выбора типа аварийного режима (DD1-DD13); однофазные короткозамыкатели на землю (QN1-QN3); межфазные короткозамыкатели (QK1-QK5); трёхфазный разъединитель (QS1); однофазный разъединитель (QS2); блоки трёхфазных нагрузок (Z1-Z3).

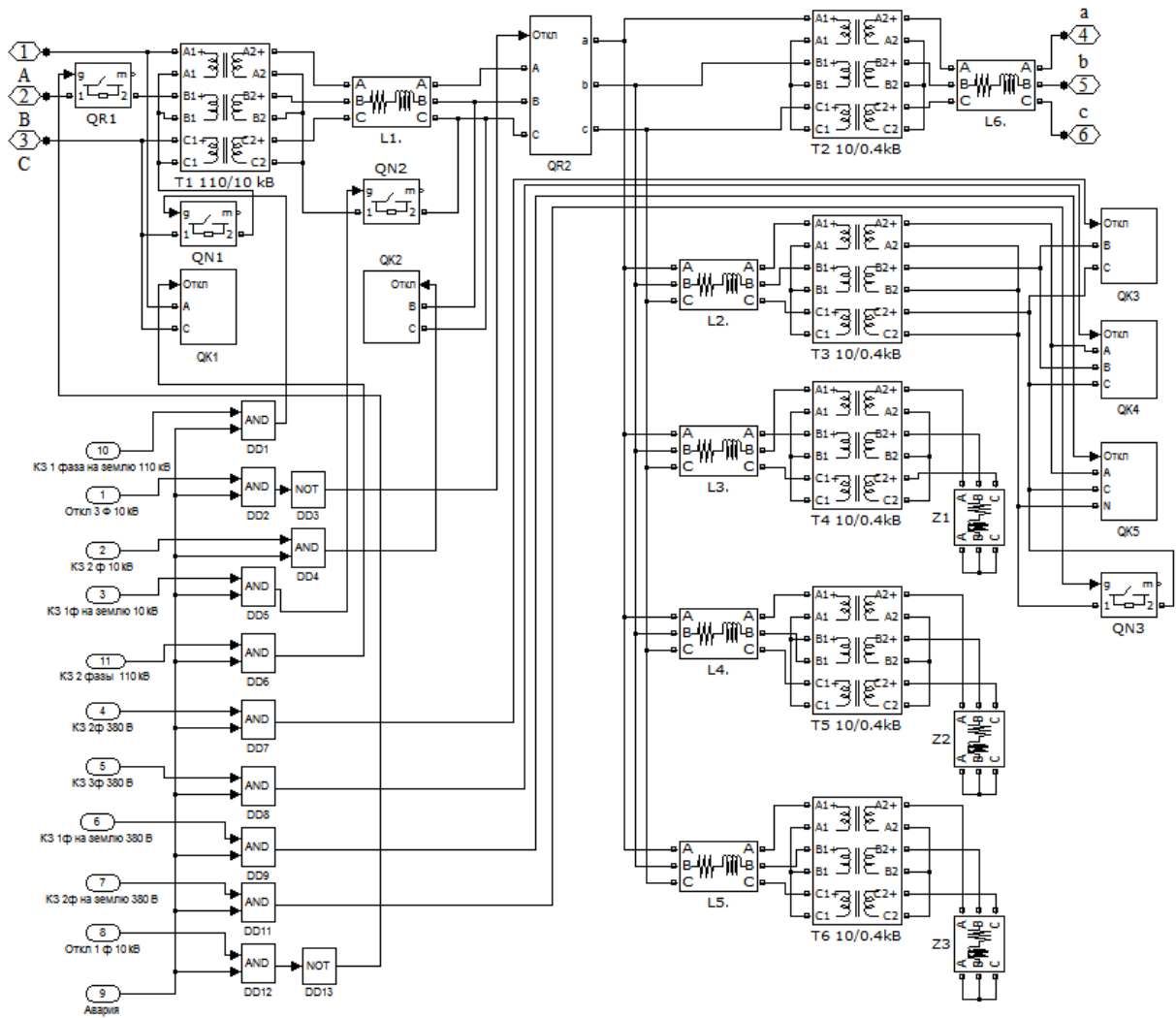


Рисунок 2.5 – Развёрнутый блок трансформаторной подстанции

Целью эксперимента являлось определение влияния аварийных режимов, возникающих в питающей сети, на форму и значение напряжения на входе ВВ и ЗПН, приводящих к срабатыванию ЗМН. Оценка изменения напряжения на конденсаторе С-фильтра ЗПН проводилось на имитационной модели ГЧРП со следующими параметрами:

- заданная мощность АД ( $P=37\text{кВт}$ ), подключенного к выходу АИН;
- ёмкость конденсаторов ЗПН рассчитана в соответствии с выражением (2.37);
- суммарная мощность ГЧРП  $P_{\text{ГЧРП}} = 111\text{кВт}$ .

На рисунке 2.6 представлены осциллограммы линейного напряжения на входе ВВ и в ЗПН при КЗ на землю фаз “А” и “С” на стороне 110 кВ, где

обмотки трансформатора Т1 соединены по схеме  $Y/\Delta$ , а для Т2-Т6 по схеме  $Y/Y$ , согласно функциональной схемы (см. рис. 2.3).

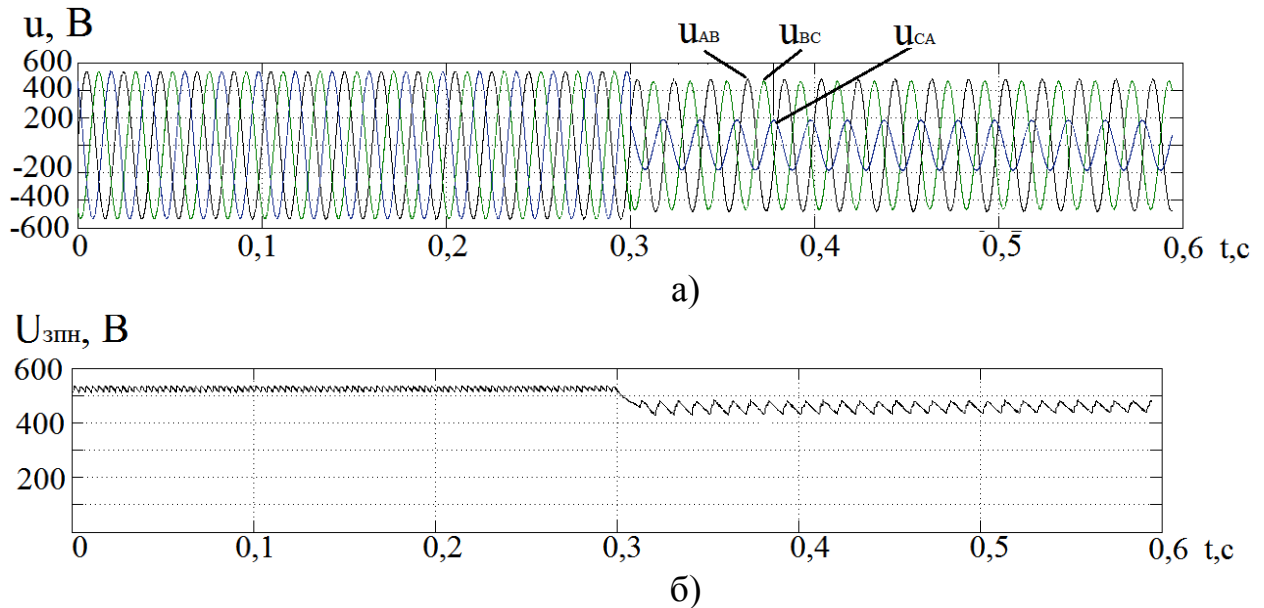


Рисунок 2.6 – Осциллограммы при двухфазном КЗ на землю фаз “А” и “С” на стороне 110 кВ: изменение напряжения на входе ВВ ГЧРП (а); изменение напряжения в ЗПН ГЧРП (б)

Как видно из осциллограмм при двухфазном КЗ фаз “А” и “С” на землю на стороне 110кВ, при использовании трансформатора Т1 со схемой соединения обмоток  $Y/\Delta$ , а трансформаторов Т2-Т6 со схемой соединения обмоток  $Y/Y$  не происходит скачка фазы и преобразования формы линейного напряжения на входе трёхфазного выпрямителя (рис. 2.6 а), а напряжение в ЗПН (рис. 2.6 б) снижается до уровня срабатывания ЗМН.

При межфазном коротком замыкании между фазами “В” и “С” на стороне 110 кВ трансформатора Т1 со схемой соединения обмоток  $Y/\Delta$  не происходит возникновение токов нулевой последовательности трансформирующихся с обмотки ВН в обмотку НН, с дальнейшим распространением в сторону ВВ ГЧРП, что приводит к изменению формы напряжения на входе ВВ, осциллограмма (рис. 2.7 а).

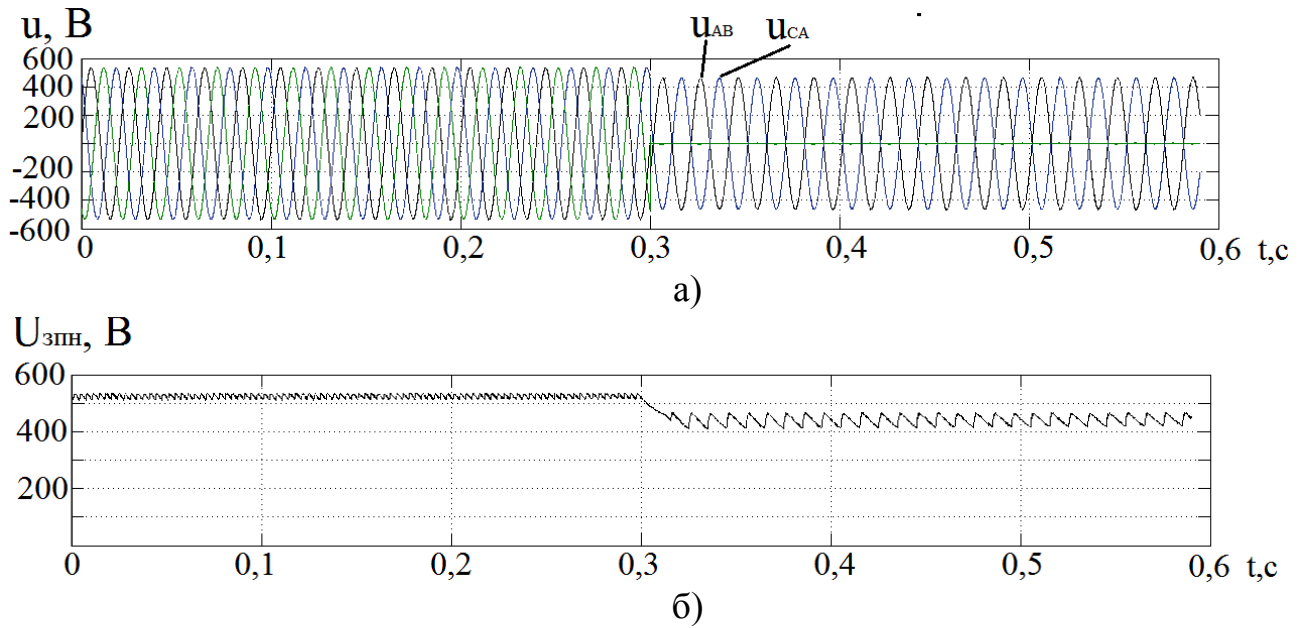


Рисунок 2.7 – Осциллограммы напряжения при коротком замыкании на стороне 110 кВ между фазами “В” и “С”: изменение напряжения на входе общего ВВ ГЧРП (а); изменение напряжения в ЗПН ГЧРП (б)

При двухфазном коротком замыкании между фазами “В” и “С” на стороне ВН трансформатора Т1 со схемой соединения обмоток  $Y/\Delta$  происходит снижение линейного напряжения на входе ВВ, что приводит к уменьшению напряжения в ЗПН до уровня срабатывания ЗМН, осциллограмма (рис. 2.7 б).

На рисунке 2.8 представлены осциллограммы линейного напряжения на входе ВВ и ЗПН при снижении напряжения в фазе “В” до нуля на стороне 110кВ и 10кВ, где обмотки трансформаторов Т1 и Т2-Т8 соединены по схеме  $Y/Y$  (см. рис. 2.8 а при  $t = 0,3$  с). Снижение напряжения в одной из фаз трёхфазной системы на стороне 110кВ трансформатора Т1, приводит к изменению напряжения как на стороне высокого напряжения трансформатора Т2, так и на стороне низкого напряжения (0,4кВ). При построении систем электроснабжения с использованием трансформатора Т1 и Т2-Т6 со схемами соединения обмоток  $Y/Y$  не происходит преобразование изменения формы линейного напряжения на входе входного выпрямителя ПЧ по отношению к изменению формы напряжения на стороне ВН трансформатора Т1 (рис. 2.8).

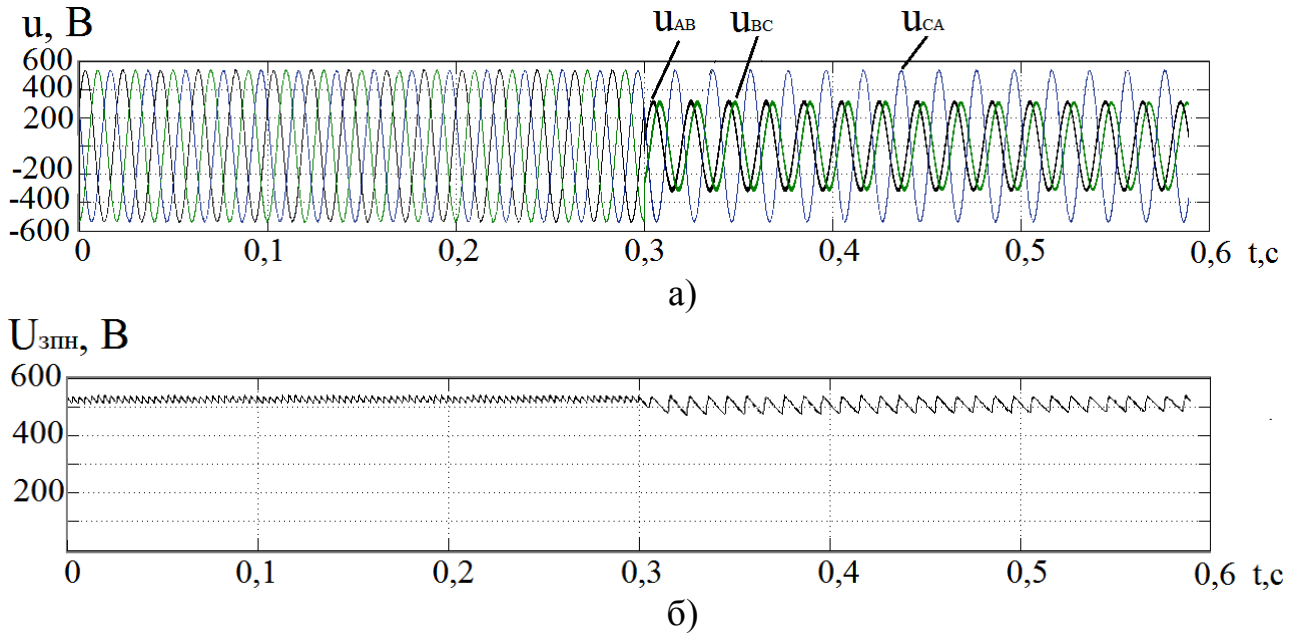


Рисунок 2.8 – Осциллограммы изменения напряжения на входе общего ВВ ГЧРП (а) и в ЗПН ГЧРП (б) при снижении напряжения в фазе “В”

На рисунке 2.9 представлены осциллограммы при двухфазном коротком замыкании на стороне 110 кВ и 10 кВ трансформатора Т1 между фазами “В” и “С”.

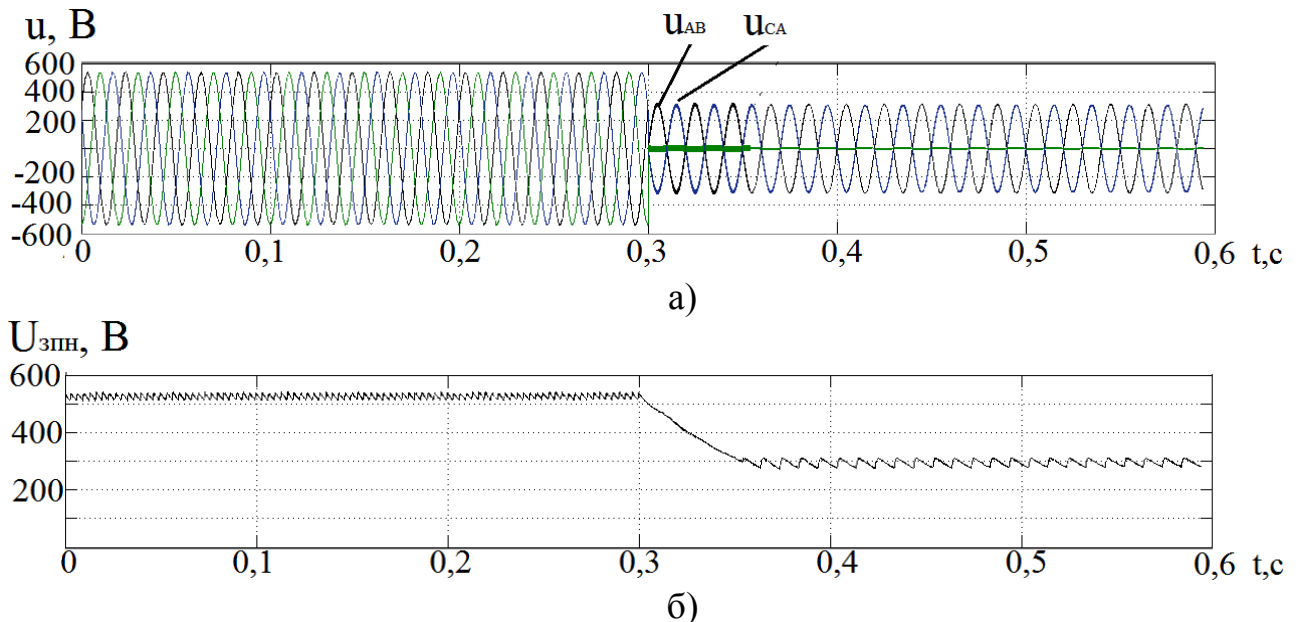


Рисунок 2.9 – Осциллограммы при двухфазном коротком замыкании на стороне 110 кВ и 10 кВ трансформатора Т1 между фазами “В” и “С”: изменение напряжения на входе общего ВВ ГЧРП (а); изменение напряжения в ЗПН ГЧРП (б)

При КЗ между фазами “В” и “С”, возникающих на стороне ВН и НН трансформатора 110кВ/10кВ со схемой соединения обмоток Y/Y, а также на стороне НН трансформатора 10кВ/0,4кВ с аналогичной схемой соединения обмоток происходит уменьшение напряжения на входе ВВ ПЧ между фазами “АВ” и “СА”, при полном отсутствии напряжения между фазами “В” и “С” (см. рис. 2.9 а), что приводит к снижению напряжения ниже уровня уставки ЗПН, (см. рис. 2.9 б).

При КЗ между фазами “В” и “С”, возникающих на стороне НН трансформаторов (см. рис. 2.3), трансформаторы Т2-Т6 с напряжением 10кВ/0,4кВ со схемами соединения обмоток Y/Y, происходит уменьшение напряжения на входе ВВ ПЧ (рис. 2.10 а).

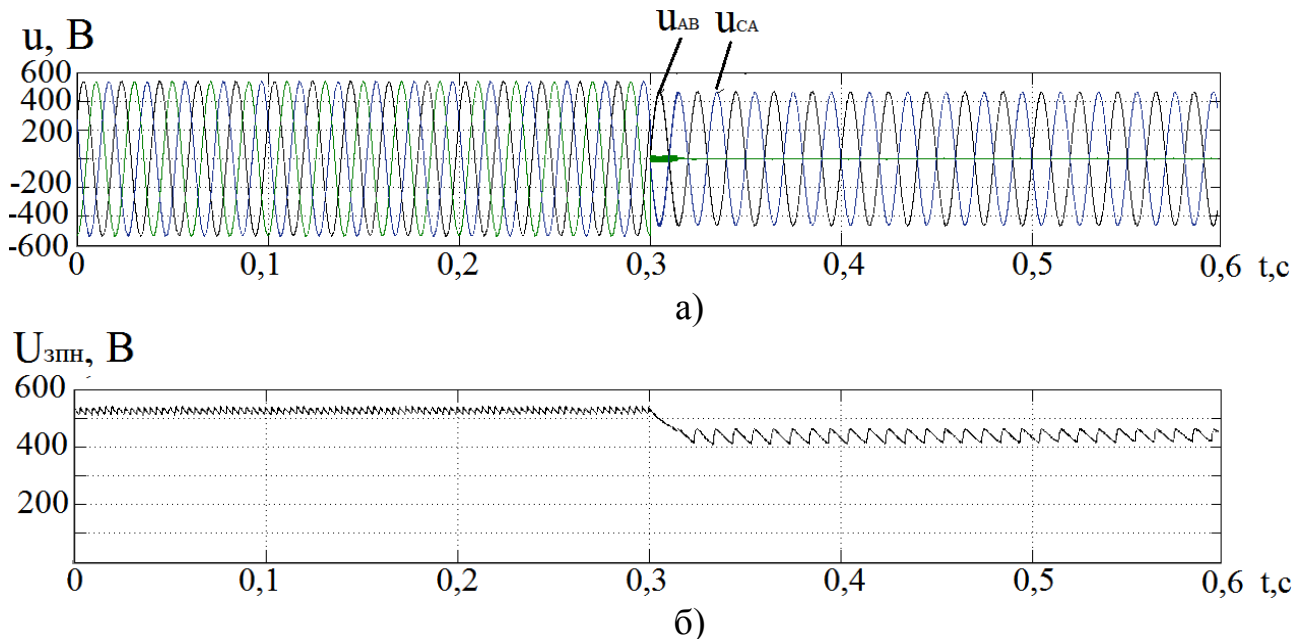


Рисунок 2.10 – Осциллограммы при двухфазном коротком замыкании на стороне 0,4 кВ трансформатора Т6: изменение напряжения на входе общего ВВ ГЧРП (а); изменение напряжения в ЗПН ГЧРП (б)

При срабатывании АВР в распределительной сети происходит глубокий провал напряжения во всех фазах. При подключении мощной симметричной нагрузки к линиям напряжением 110кВ и 10кВ происходит снижение напряжения во всех фазах до значения, зависящего от комплексного сопротивления распределительной сети напряжением 110кВ / 10кВ / 0,4 кВ.

Комплексное сопротивление распределительной сети зависит от протяжённости линии электропередач, типа и сечения фазных проводников, мощности трансформатора в распределительной сети верхнего уровня и точки подключения нагрузки, определяемой расстоянием от места подключения нагрузки к распределительной сети до источника трёхфазного напряжения. При проведении исследований влияния аварийных режимов на напряжение в ЗПН комплексное сопротивление распределительной сети не учитывалось.

На рисунке 2.11 представлены осциллограммы изменения входного тока  $I_{Вх.АИН}$  АИН (рис. 2.11 б) при снижении напряжения в ЗПН  $U_{ЗПН}$  до  $0,9U_{ЗПН ном}$  с последующим его восстановлением до номинального значения  $U_{ЗПН ном}$  (рис. 2.11 а). Как видно из представленных на рисунке 2.11 осциллограмм при восстановлении напряжения в ЗПН после его снижения до значения  $0,9U_{ЗПН ном}$  возникает бросок входного тока АИН  $I_{Вх.АИН} = 2I_{Вх.АИН.ном}$ .

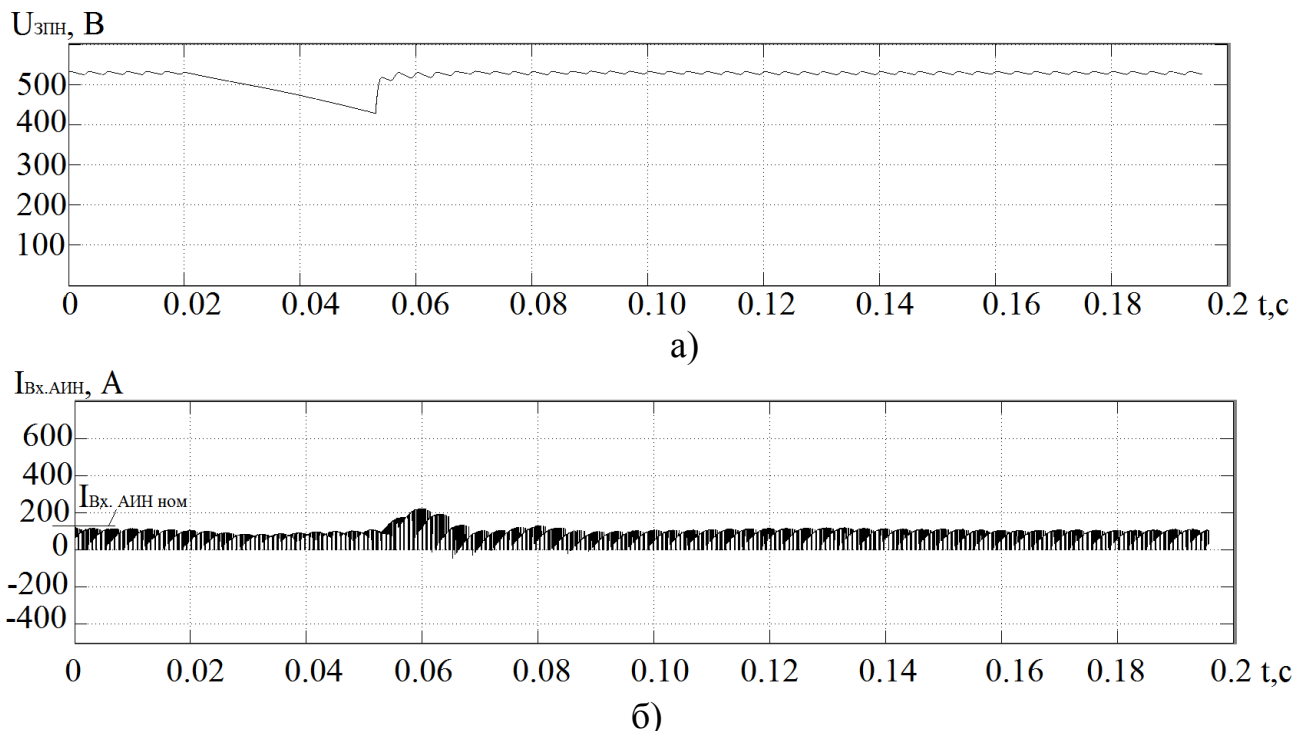


Рисунок 2.11 – Осциллограммы при снижении напряжения в ЗПН

ГЧРП: снижение напряжения в ЗПН до  $0,9U_{ЗПН ном}$  (а); входной ток АИН

$I_{Вх.АИН}$  (б)

На рисунке 2.12 представлены осциллограммы изменения входного тока  $I_{Вх.АИН}$  АИН (рис. 2.12 б) при снижении напряжения  $U_{ЗПН}$  в ЗПН до  $0,1U_{ЗПН ном}$

с последующим его восстановлением до номинального значения  $U_{\text{ЗПН ном}}$  (рис. 2.12 а).

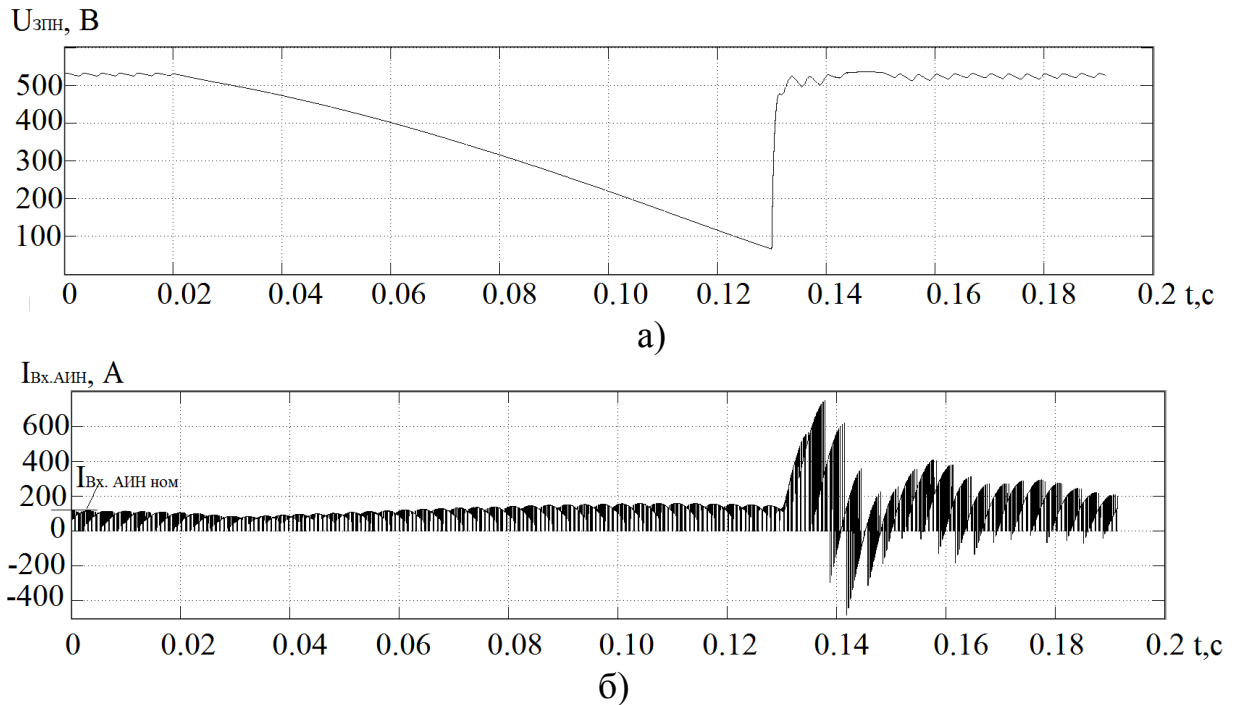


Рисунок 2.12 – Осциллограммы при снижении напряжения в ЗПН

ГЧРП: снижение напряжения в ЗПН до  $0,1U_{\text{ЗПН ном}}$  (а); входной ток АИН

$I_{\text{Вх АИН}}$  (б)

Из осциллограмм, представленных на рисунке 2.12 видно, что при восстановлении напряжения в ЗПН после его снижения до значения  $0,1U_{\text{ЗПН ном}}$  возникает бросок входного тока АИН  $I_{\text{Вх АИН}} = 6I_{\text{Вх АИН.ном}}$ . Таким образом, провалы напряжения, возникающие в питающей сети приводят к снижению напряжения в ЗПН, а после его восстановления возникают броски входного тока АИН, которые превышают номинальное значение в 2-6 раз и вызывают перегрузку транзисторных ключей по току в случае снижения напряжения в ЗПН ниже уставки ЗМН.

Осциллограмма, представленная на рисунке 2.13 иллюстрирует снижение скорости АД с вентиляторной механической нагрузкой после возникновения провала напряжения в ЗПН в момент времени ( $t= 0,02$  с), где АД из двигательного режима переходит в режим свободного выбега,

продолжительность  $t$  которого составляет более 2с, что больше длительности кратковременных провалов напряжения в питающей сети. Запуск АД в работу возможен после полной его остановки, что приводит к увеличению времени подготовки к автоматическому повторному запуску.

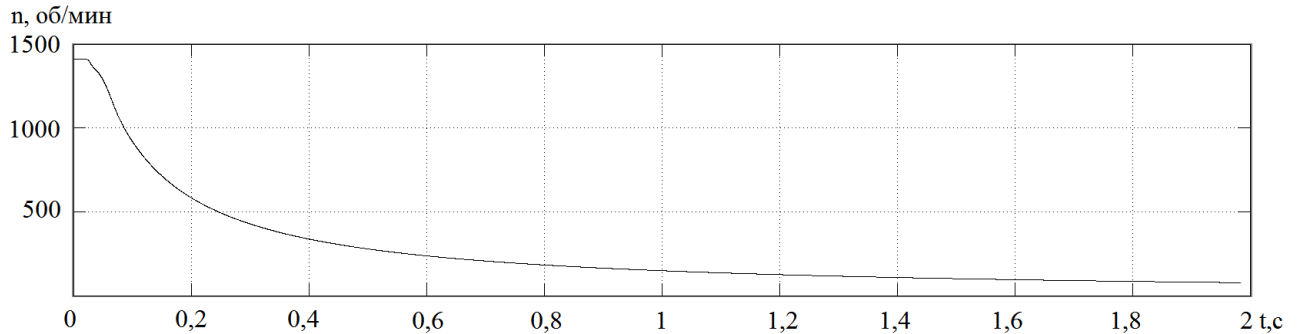


Рисунок 2.13 – Осциллограмма снижения скорости АД в режиме свободного выбега после провала напряжения в ЗПН

В ходе анализа влияния аварийных режимов, возникающих в системе электроснабжения, на работу ГЧРП установлено, что все рассмотренные аварийные режимы на стороне ВН приводят к снижению напряжения в ЗПН до уровня, при котором происходит срабатывание ЗМН. Величина отклонения напряжения при возникновении провала напряжения в системе электроснабжения зависит от расстояния между электроприёмником и источником питания, мощности понижающих трансформаторов, включенных между источником питания  $G$  и конечным электроприёмником, коэффициента загрузки понижающих трансформаторов, мощности и пусковых токов подключаемой нагрузки. Полученные результаты исследований функционирования ГЧРП, проведённые в среде Matlab при аварийных режимах показали, что наличие аварийных режимов в системе электроснабжения влияют на работу ГЧРП и приводят к срабатыванию ЗМН, что подтверждает необходимость разработки способа управления ГЧРП направленного на обеспечение нормального функционирования привода при снижении напряжения в ЗПН ниже уставки срабатывания ЗМН. Полученные результаты исследования обосновывают необходимость повышения устойчивости ГЧРП к

влиянию аварийных режимов, возникающих на различных уровнях распределительной сети системы электроснабжения.

### **Выводы по второй главе**

1. Разработана имитационная модель системы скалярная управления АИН привода ГЧРП, позволяющая установить взаимосвязь между напряжением в ЗПН, напряжением на выходе АИН и коэффициентом заполнения при ШИМ-управлении, что позволяет провести исследование и оценку функционирования ГЧРП при возникновении аварийных режимов в системе электроснабжения.

2. Выявлено, что при возникновении аварийного режима в питающей сети происходит снижение напряжения ЗПН до уровня срабатывания ЗМН, что приводит к остановке технологического процесса.

3. Результатами исследования подтверждено, что при восстановлении напряжения в питающей сети в цепи ГЧРП возникает бросок входного тока АИН, превышающий номинальное значение в 2-6 раз, что отрицательно сказывается на работе и сроке службы транзисторных ключей АИН.

4. Установлено, что время свободного выбега АД превышает время аварийного режима питающей сети, что обосновывает необходимость разработки устройства управления АИН, которое позволяет обеспечить разгон АД с любой пониженной скорости при одновременном устранении бросков входного тока АИН в момент восстановления нормального режима питающей сети.

### **Глава 3. Разработка и исследование способов повышения устойчивости группового частотно-регулируемого привода к провалам напряжения питающей сети**

#### **Вводная часть 3.1**

Для устранения влияния аварийного режима на ГЧРП предлагается замедлять процесс разряда конденсаторов С-фильтра при наличии провала напряжения путём перевода АД в режим генераторного торможения, что позволяет увеличить продолжительность сохранения управления приводом при провалах напряжения в питающей сети [33]. Также предлагается в момент восстановления напряжения ограничить входной ток АИН до допустимого значения, а также зарядный ток конденсаторов С-фильтра за счёт применения диодно-реакторного ограничителя тока заряда конденсаторов С-фильтра [55].

Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать и исследовать способ управления АИН для замедления разряда конденсатора С-фильтра при провале напряжения в питающей сети за счёт перехода АД из двигательного режима в режим генераторного торможения и для ограничения входного тока АИН при резком восстановлении напряжения в питающей сети.

2. Разработать и исследовать систему управления АИН позволяющую увеличить время разряда конденсатора С-фильтра и продолжительность сохранения управления АД при провале напряжения, а также ограничить броски входного тока АИН при резком восстановлении напряжения в ЗПН.

3. Разработать и исследовать ограничитель тока заряда конденсаторов С-фильтра ЗПН позволяющий снизить ток заряда конденсаторов С-фильтра при восстановлении напряжения в питающей сети и одновременном разгоне АД с пониженной скорости.

### 3.2 Разработка способа управления АИН при провалах напряжения в питающей сети

При возникновении аварийных режимов в системе электроснабжения происходит снижение напряжения в ЗПН. Снижение напряжения в ЗПН в свою очередь влияет на работу ПЧ, характеризуемую двумя случаями. Первый случай, когда снижение напряжения в питающей сети не вызывает срабатывание уставки ЗМН при условии  $U_{DC \text{ ном}} > U_{DC} > U_{DC \text{ мин}}$ , где привод продолжает работать с уменьшенным электромагнитным моментом.

Второй случай, когда выполняется условие  $U_{DC} < U_{DC \text{ мин}}$  происходит отключение привода после разряда конденсатора С-фильтра ЗПН до значения уставки ЗМН, после срабатывания которой отключение привода осуществляется за счёт снятия импульсов управления IGBT транзисторами АИН с переходом АД из нормального режима на режим свободного выбега, после чего повторный запуск АД возможен при восстановлении напряжения в питающей сети и заряде конденсаторов С-фильтра ЗПН до номинального значения  $U_{DC \text{ ном}}$ . Время подготовки к повторному включению  $t_{п.в}$  ПЧ зависит от постоянной времени заряда  $t_{RC}$  конденсаторов С-фильтра, параметров токоограничительной цепи и быстродействия системы шунтирования  $t_{с.ш.}$  токоограничительной цепи, согласно выражению  $t_{п.в} = t_{RC} + t_{с.ш.}$ . При срабатывании ЗМН длительность подготовки к повторному включению  $t_{п.в}$  может превышать длительность аварийного режима возникающего в системе электроснабжения.

В настоящее время существует два основных подхода, направленных на обеспечение работоспособности ЧРП при снижении напряжения в питающей сети, где первый подход основан на сохранении его режима работы при изменении напряжения в питающей сети, при котором напряжение  $U_{DC}$  в ЗПН находится в допустимом диапазоне согласно условию  $U_{DC \text{ ном}} > U_{DC} > U_{DC \text{ мин}}$ , а второй подход направлен на решение задач сокращения времени повторного

запуска привода после восстановления напряжения в питающей сети. Однако, в настоящее время не рассмотрена возможность сохранения продолжительности управления приводом при изменении напряжения в ЗПН в случае выполнения условия  $U_{DC \text{ мин}} > U_{DC}$ . Задача обеспечения управления приводом при снижении напряжении ЗПН ниже уставки ЗМН актуальна для технологического оборудования с ГЧРП, в котором должна обеспечиваться синхронизация скорости АД в процессе остановки и их разгона до номинальной скорости, а также для минимизации времени автоматического повторного пуска.

Сравнительный анализ работы ЧРП производился для двух режимов работы питающей сети как нормального, так и аварийного. Для проведения исследования работы ЧРП использовалась имитационная модель, на которой ГЧРП подключен к питающей сети.

Осциллограммы входного тока АИН ( $I_{\text{Вх. АИН}}$ ) и тока статора ( $I_{\text{Ст.}}$ ) АД полученные при проведении имитационного моделирования для нормального режима работы ЧРП представлены на рис. 3.1. и рис. 3.2, соответственно.

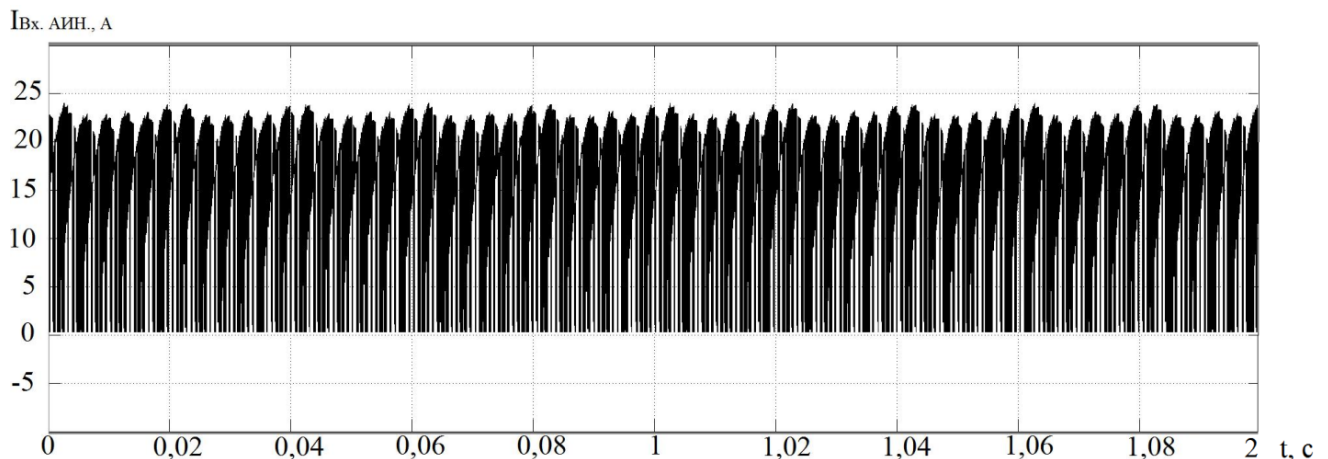


Рисунок 3.1– Осциллограмма входного тока АИН

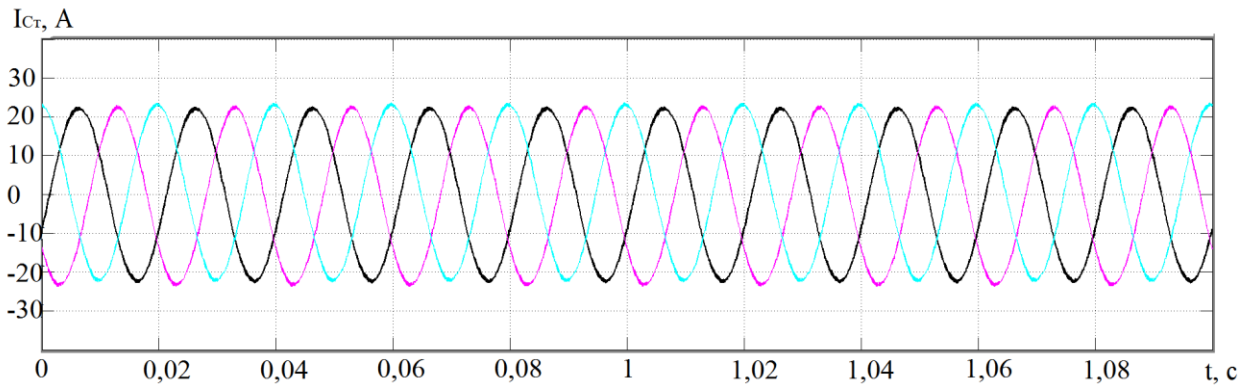


Рисунок 3.2 – Осциллограмма тока статора АД при нормальном режиме работы ПЧ

Входной ток АИН представляет собой импульсную последовательность с положительной и отрицательной полярностью. Формирование импульсов положительной полярности происходит при открывании транзисторных ключей АИН, отрицательных в момент перехода диодов обратного выпрямителя в проводящее состояние [92]. Среднее значение входного тока АИН зависит от мощности электродвигателя, нагрузки на валу АД и его скорости.

При снижении напряжения в одной или нескольких фазах питающей сети происходит разряд конденсатора С-фильтра ЗПН. Время разряда конденсатора зависит от механической нагрузки на валу двигателя и ёмкости конденсатора С-фильтра. Для оценки времени разряда конденсатора используется уравнение энергетического баланса (3.1):

$$U_{DC}(t) = \sqrt{U_{DC\text{ ном}}^2 - \frac{2 \cdot P_{\text{нагр.}}}{C_{\phi}} \cdot T}, \quad (3.1)$$

Где:  $U_{DC\text{ ном}}$  – номинальное значение напряжения постоянного тока в ЗПН;

$C_{\phi}$  – ёмкость конденсатора С-фильтра ЗПН;

$P_{\text{нагр}}$  – активная мощность нагруженного двигателя;

$T$  – интервал времени разряда конденсатора.

Ёмкость конденсатора выбирается из условия сохранения напряжения в ЗПН не ниже уровня 20% от номинального значения напряжения  $U_{DC \text{ ном}}$ . При построении имитационной модели ёмкость конденсатора С-фильтра выбрана из условия (3.2):

$$C_{\phi} \geq \frac{2 \cdot P_{\text{нагр}} \cdot T}{U_{DC}^2 - (0,2 \cdot U_{DC})^2} \quad (3.2)$$

Анализ уравнения (3.2) показывает, что скорость разряда конденсатора С-фильтра ЗПН зависит от активной мощности нагруженного АД  $P_{\text{нагр}}$ , где её значение зависит от типа применяемого механизма и начальной скорости двигателя  $n$  на момент возникновения провала напряжения в системе электроснабжения.

При проведении численного эксперимента рассматривались зависимости времени  $t$  разряда конденсатора С-фильтра  $C_{\phi}$  ЗПН от его ёмкости и начальной скорости  $n_{\text{ном}}$  АД с вентиляторной механической нагрузкой. На рисунке 3.3 проиллюстрирована зависимость изменения скорости разряда конденсатора С-фильтра ЗПН от ёмкости конденсатора, а на рисунке 3.4 проиллюстрирована зависимость скорости разряда конденсатора С-фильтра ЗПН от начальной скорости АД при возникновении провала напряжения в системе электроснабжения.

При проведении численных экспериментов использовался двигатель типа ВАСО-37-14 с вентиляторной механической нагрузкой со следующими параметрами:  $P_{\text{дв}} = 7,5 \text{ kW}$ ,  $U_{\text{дв.ф.}} = 400 \text{ В}$ ,  $f_{\text{дв.раб.}} = 50 \text{ Гц}$ ,  $R_s = 0,7384 \text{ Ом}$ ,  $L_s = 0,003045 \text{ Гн}$ ,  $R_{l.r.} = 0,7402 \text{ Ом}$ ,  $L_{l.r.} = 0,003045 \text{ Гн}$ ,  $L_m = 0,1241 \text{ Гн}$ ,  $\omega_{\text{дв.}} = 146,6 \text{ рад/с}$ ,  $U_{DC \text{ ЗПН.}} = 537 \text{ В}$ . Ёмкость конденсатора С-фильтра ЗПН определена в соответствии с выражением (3.2). При проведении эксперимента выяснилось, что скорость снижения напряжения при разряде конденсатора С-фильтра в большей степени зависит от начальной скорости  $n_{\text{ном}}$  АД при провале напряжения в системе электроснабжения. Полученные результаты будут использоваться при разработке способа управления АИН, направленного

на замедление разряда конденсатора С-фильтра, сохранения продолжительности работы привода при провале напряжения в системе электроснабжения и снижении напряжения в ЗПН до значения при котором выполняется условие  $U_{DC \text{ мин}} > U_{DC}$ .

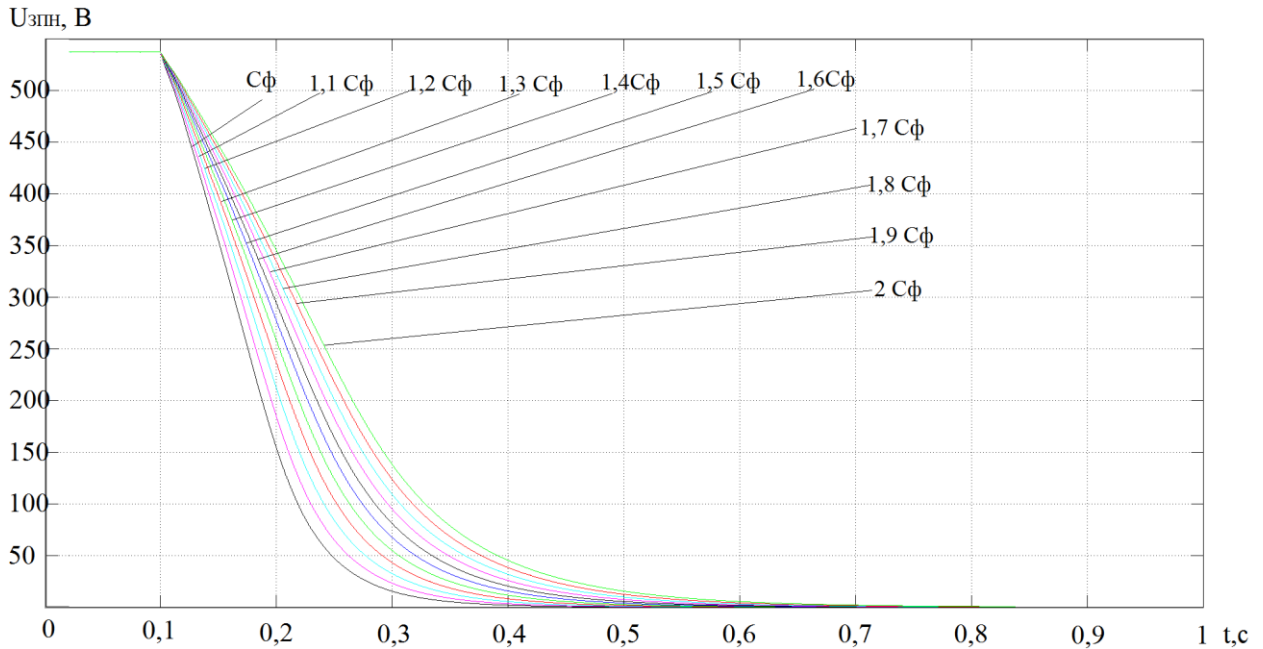


Рисунок 3.3 – Зависимость скорости разряда конденсатора С-фильтра ЗПН от ёмкости при провале напряжения

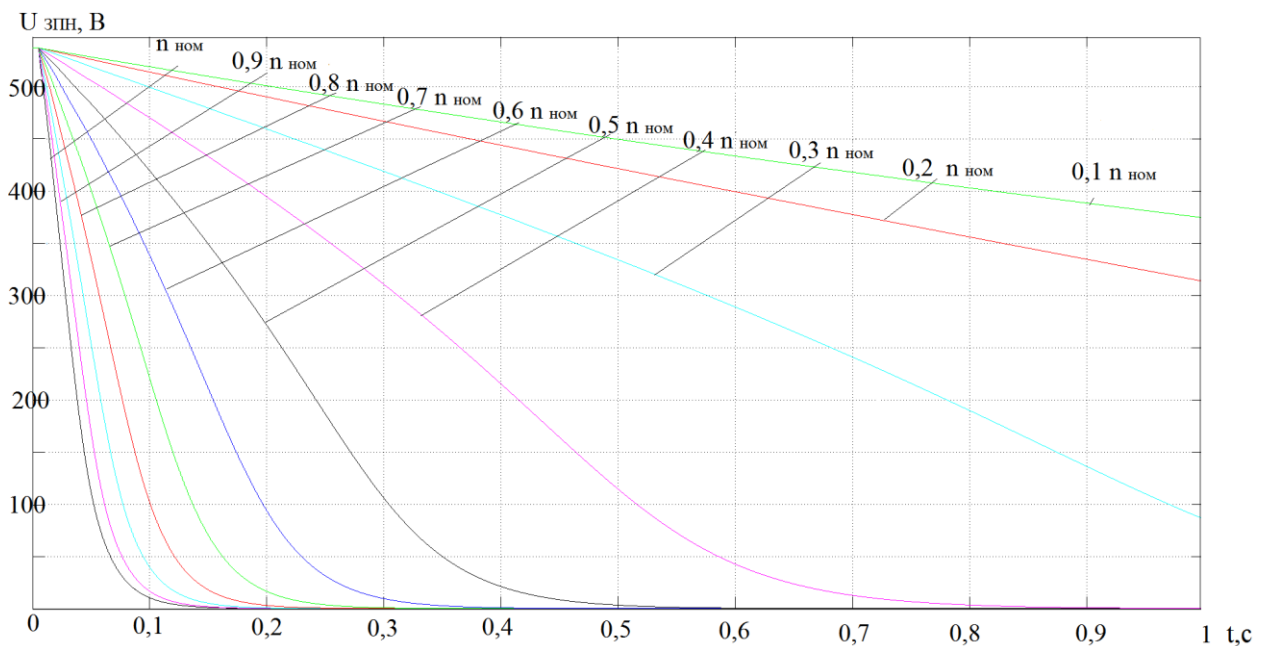


Рисунок 3.4 – Зависимость скорости разряда конденсатора С-фильтра ЗПН от начальной скорости АД при провале напряжения

Величина минимального напряжения  $U_{DC \text{ мин}}$  в ЗПН при разряде конденсатора С-фильтра ЗПН определяется в соответствии с выражением (3.3):

$$U_{DC \text{ мин}}(t) = \sqrt{U_{DC \text{ ном.}}^2 - \frac{2 \cdot P_{дв}}{C_{\phi}} \cdot T} \quad (3.3)$$

Где:  $U_{DC \text{ ном}}$  – номинальное напряжение ЗПН;

$C_{\phi}$  – ёмкость конденсатора С-фильтра ЗПН;

$P_{дв}$  – активная мощность, потребляемая АД из питающей сети.

Активная мощность  $P_{дв}$ , потребляемая АД из питающей сети связана со скоростью  $n_{дв}$  и механическим моментом  $M_{дв}$  на валу АД соотношением (3.4):

$$P_{дв} = \frac{M_{дв} \cdot n_{дв}}{9,55} \quad (3.4)$$

Активная входная мощность  $P_{вх. АИН}$ , потребляемая АИН из ЗПН определяется в соответствии с (3.5):

$$P_{вх. АИН} = U_{DC} \cdot I_{вх. АИН} \quad (3.5)$$

Где:  $U_{DC}$  – напряжение в ЗПН;

$I_{вх. АИН}$  – входной ток АИН.

Активная мощность  $P_{дв}$  АД, потребляемая из АИН согласно (3.6):

$$P_{дв} = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi \quad (3.6)$$

Где:  $U_1$  – амплитуда первой гармоники линейного напряжения на выходе АИН;

$I_1$  – амплитуда первой гармоники тока на выходе АИН.

В установившемся режиме работы ЧРП активная входная мощность потребляемая АИН из ЗПН равна потребляемой мощности АД ( $P_{вх. АИН} = P_{дв}$ ).

Амплитуда первой гармоники линейного напряжения  $U_1$  на выходе АИН с ШИМ определяется по формуле  $U_1 = \frac{m \cdot U_{DC}}{\sqrt{2}}$ , где  $m$  – коэффициент модуляции АИН. Входной ток АИН зависящий от активной мощности АД определяется соотношением (3.7):

$$I_{вх. АИН} = \frac{\sqrt{3} \cdot m \cdot I_1 \cdot \cos\varphi}{\sqrt{2}} \quad (3.7)$$

Интервал времени разряда конденсатора С-фильтра до значения напряжения  $U_{DC} = 0$  в ЗПН определяется из уравнения энергетического баланса, где  $k$  - это вновь введенный коэффициент загрузки привода согласно (3.8):

$$T = \frac{U_{DC}^2 \cdot C_{\phi}}{2 \cdot k \cdot P_{дв}} \quad (3.8)$$

Время разряда конденсатора С-фильтра зависит от его ёмкости и коэффициента загрузки привода  $k$ , а коэффициент загрузки  $k$  зависит от скорости АД согласно (3.9):

$$k = \frac{M_{дв} \cdot n_{дв.}}{9,55 \cdot P_{дв.}} \quad (3.9)$$

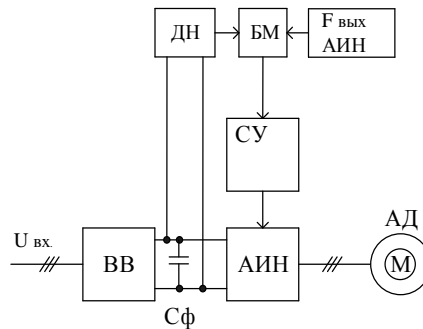
Где:  $M_{дв}$  – момент, развиваемый на валу АД;

$n_{дв.}$  – скорость АД.

Для сохранения продолжительности функционирования оборудования при аварийном режиме питающей сети ГЧРП выдвинуто предположение о возможности замедления разряда конденсатора С-фильтра ЗПН за счёт управления выходной частотой АИН изменяющимся напряжением в ЗПН. Для проверки работоспособности ЧРП при аварийном режиме была разработана функциональная схема ЧРП, показанная на рисунке 3.5.

При снятии напряжения с входа ВВ происходит разряд конденсатора С-фильтра. С выхода ДН, подключенного к ЗПН, информация о значении напряжения в ЗПН поступает на один из входов БМ, а на второй вход БМ с выхода блока  $F_{вых}$  АИН поступает задание на управление выходной частотой АИН. При снижении напряжения в ЗПН на выходе БМ формируется задание для управления выходной частотой АИН, которое изменяется пропорционально напряжению ЗПН, что приводит к возникновению отрицательного скольжения и переходу АД в режим генераторного торможения. В режиме генераторного торможения происходит блокировка силовых транзисторных ключей АИН и накопленная в АД электромагнитная энергия передается в ЗПН через обратный мостовой выпрямитель АИН, что приводит к увеличению напряжения в ЗПН.

При увеличении напряжения в ЗПН на выходе БМ формируется задание на повышение выходной частоты АИН и АД вновь переходит в двигательный режим, потребляя при этом энергию из конденсатора.



$U_{\text{вх}}$  – питающая сеть напряжением 0,4 кВ, ВВ – входной выпрямитель,  $C_{\phi}$  – конденсатор С-фильтра, ДН – датчик напряжения, БМ – блок масштабирования, АИН – автономный инвертор напряжения,  $F_{\text{вых}}$  АИН – задатчик выходной частоты АИН, АД – асинхронный двигатель.

Рисунок 3.5 – Функциональная схема ЧРП при управлении выходной частотой АИН изменяющимся напряжением в ЗПН

Возникающий периодический процесс перехода АД из двигательного режима в режим торможения, а из режима торможения в двигательный режим многократно повторяется, что приводит к замедлению разряда конденсатора С-фильтра. Длительность периодического процесса определяется запасом кинетической энергии в механической части привода и зависит от момента инерции привода, что в конечном итоге позволяет сохранить продолжительность управления приводом в процессе замедления его скорости.

Для подтверждения выдвинутого предположения на имитационной модели, разработанной в соответствии с функциональной схемой (см. рис. 3.5), проводились исследования возможности сохранения продолжительности управления приводом без его остановки при управлении выходной частотой АИН изменяющимся напряжением в ЗПН.

На рисунке 3.6 представлена имитационная модель ЧРП при управлении выходной частотой АИН изменяющимся напряжением в ЗПН, построенная в

среде MatLab.

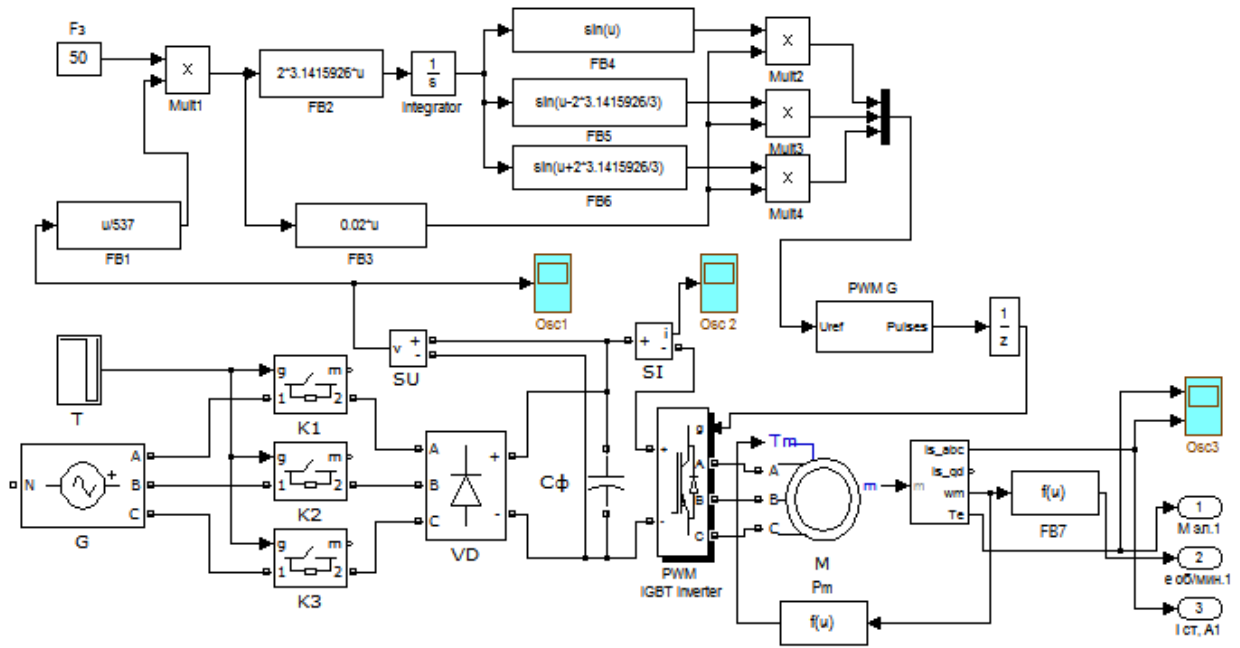


Рисунок 3.6 – Имитационная модель ЧРП при управлении выходной частотой АИН изменяющимся напряжением в ЗПН

В имитационной модели в качестве нагрузки АИН использовался двигатель ВАСО-37-14 с параметрами:  $P_{дв} = 7,5 \text{ kW}$ ,  $U_{дв.ф.} = 400 \text{ В}$ ,  $f_{дв.раб.} = 50 \text{ Гц}$ ,  $R_s = 0,7384 \text{ Ом}$ ,  $L_s = 0,003045 \text{ Гн}$ ,  $R_{l.r.} = 0,7402 \text{ Ом}$ ,  $L_{l.r.} = 0,003045 \text{ Гн}$ ,  $L_m = 0,1241 \text{ Гн}$ ,  $\omega_{дв.} = 146,6 \text{ рад/с}$ ,  $U_{DC \text{ ЗПН}} = 537 \text{ В}$ . Ёмкость конденсатора С-фильтра ЗПН определена в соответствии с выражением (3.2).

Имитационная модель содержит: задатчик скорости ( $F_3$ ); блок масштабирования состоящий из делителя (FB1) и элемента умножения (Mult 1); функциональный блок задания выходной частоты АИН (FB2); функциональный блок выполнения закона частотного регулирования (FB3); генераторы синусоидальных колебаний (FB4, FB5, FB6); элементы умножения (Mult 2 - Mult 4); генератор с ШИМ (PWM G); датчик напряжения (SU); датчик тока (SI); таймер (T); источник напряжения (G); коммутирующие ключи (K1-K3); диодный выпрямитель (VD); конденсатор С-фильтра ( $C_\phi$ ); автономный инвертор напряжения (PWM IGBT Inverter); асинхронный двигатель (M); механическая нагрузка (Pm); измерительный блок (FB7).

На рисунке 3.7 проиллюстрированы осциллограммы изменения напряжения в ЗПН при разряде конденсатора С-фильтра в штатном режиме управления (кривая 1) и режиме управления выходной частотой АИН при снижении напряжения ЗПН в соответствии с предлагаемым способом (кривая 2).

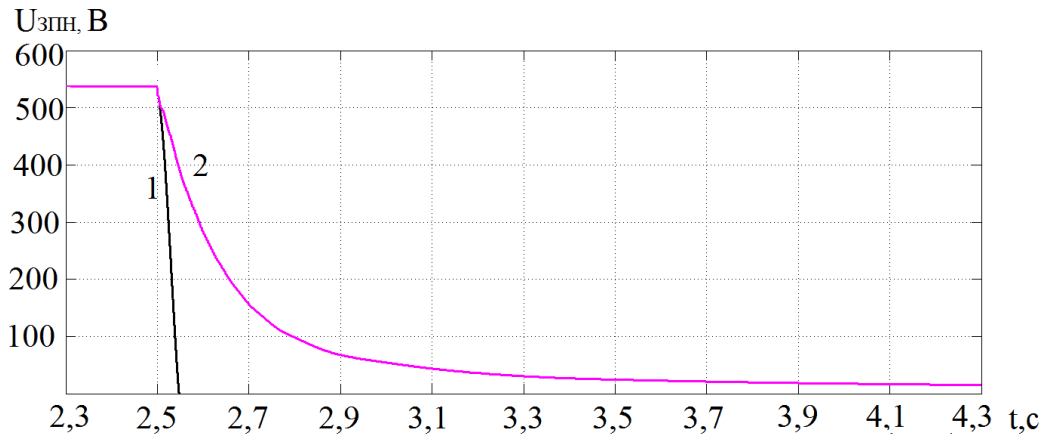


Рисунок 3.7 – Кривая изменения напряжения на конденсаторе С-фильтра в штатном режиме управления (кривая 1) и с предложенной СУ (кривая 2) при провале напряжения в питающей сети

При управлении снижающимся напряжением  $U_{\text{ДС. ЗПН}}$  выходной частотой АИН  $f_{\text{вых. АИН}}$  увеличивается длительность разряда конденсатора за счёт поочерёдной рекуперации реактивной энергии из АД в ЗПН и её потребления АД из ЗПН в процессе снижения скорости с сохранением управления АД на всём интервале разряда конденсатора С-фильтра.

На рисунках 3.8 и 3.9 осциллограммами проиллюстрированы фрагменты изменения тока статора АД ( $I_{\text{СТ}}$ ) и входного тока АИН ( $I_{\text{Вх. АИН}}$ ) на интервалах времени  $t = 2,4-2,6\text{с}$  (рис. 3.8 а, б),  $t = 2,7-2,9\text{с}$  (рис. 3.8 в, г) и  $t = 2,7-2,9\text{с}$  (рис. 3.9 а, б) при снижении напряжения на конденсаторе С-фильтра (рис. 3.7, кривая 2) и управлении выходной частотой АИН изменяющимся напряжением в ЗПН. Как видно из осциллограмм, представленных на (рис. 3.8 а, г), после возникновения провала напряжения в питающей сети с момента времени  $t = 2,5\text{с}$  АД поочерёдно находится в двигательном режиме и режиме генераторного

торможения с изменением направления входного тока АИН ( $I_{\text{вх. АИН}}$ ). При разряде конденсатора С-фильтра также происходит снижение частоты на выходе АИН, что приводит к замедлению скорости АД.

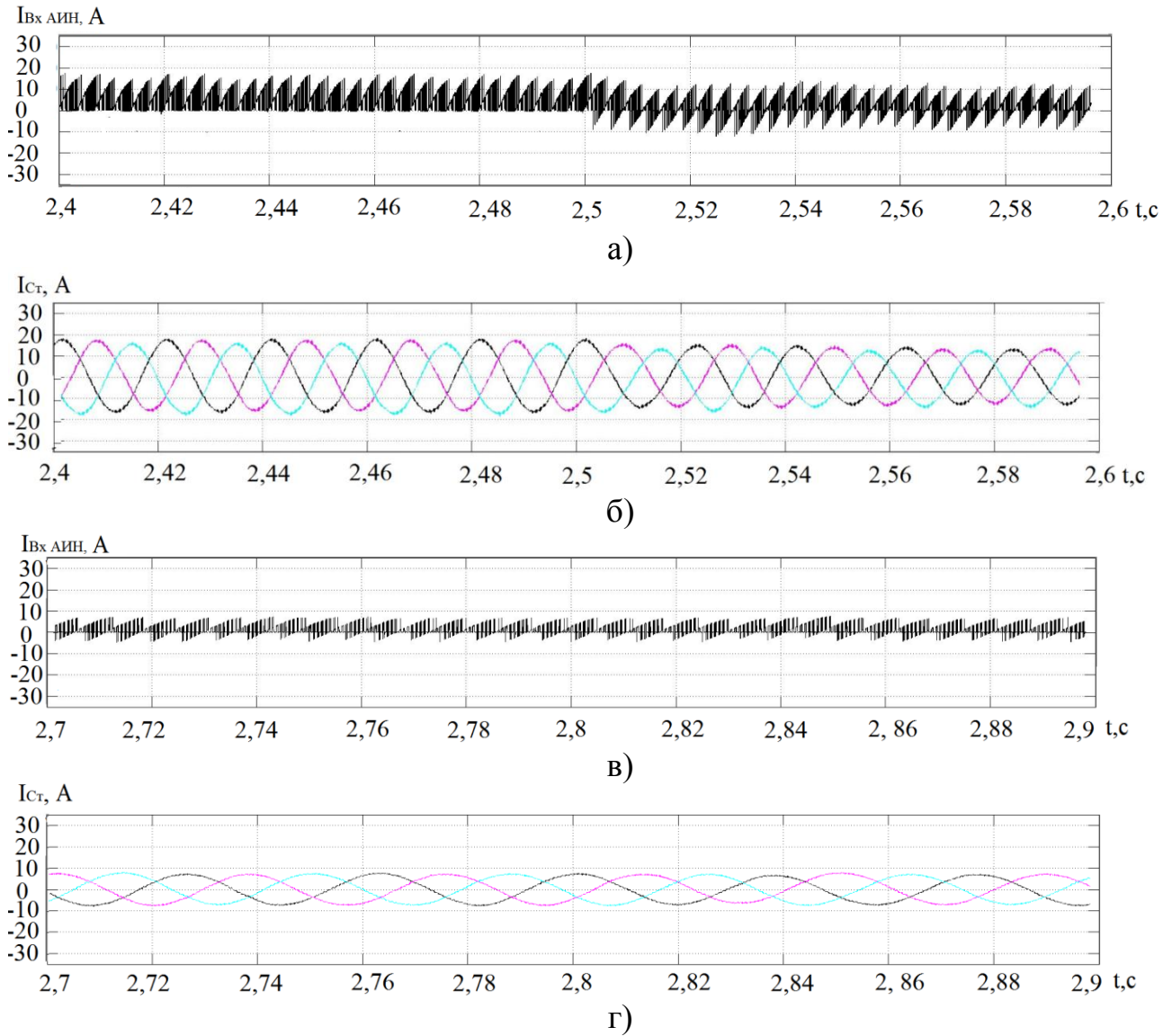
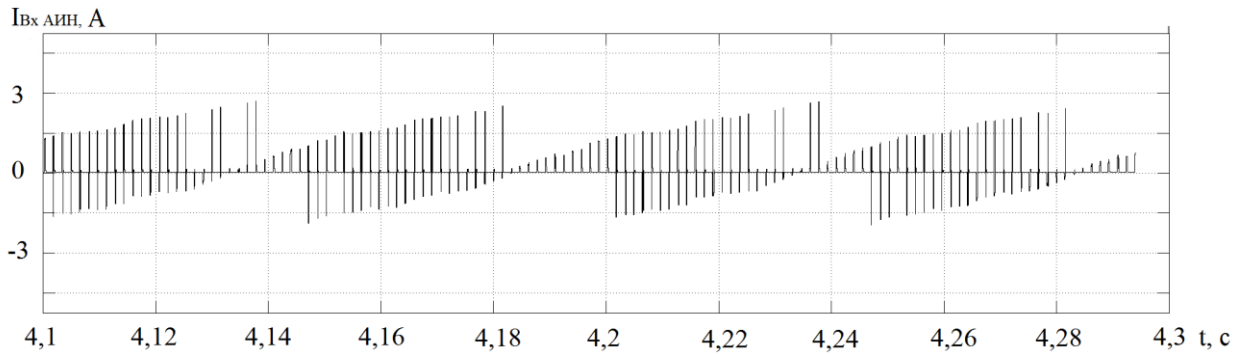


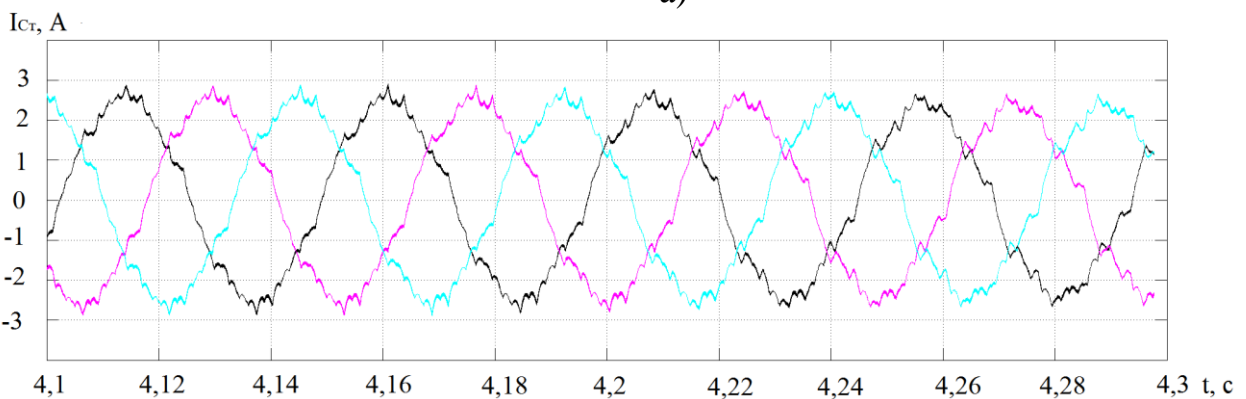
Рисунок 3.8 – Осциллограммы изменения тока статора АД и входного тока АИН при возникновении провала напряжения с предложенной СУ: изменение входного тока АИН (а, в); изменения тока статора АД (б, г)

Форма входного тока АИН (рис. 3.9 б) обусловлена равнопеременным характером длительности потребления энергии из ЗПН в двигательном режиме работы АД и возврата реактивной энергии в конденсатор С-фильтра в режиме генераторного торможения АД, что объясняет процесс замедления снижения

напряжения при разряде конденсатора С-фильтра после отключения ВВ от питающей сети.



а)



б)

Рисунок 3.9 – Осциллограммы изменения тока статора АД и входного тока АИН при управлении выходной частотой АИН напряжением ЗПН: изменение входного тока АИН  $I_{вх. АИН}$  (а); изменения тока статора АД  $I_{ст}$  (б)

Искажение формы кривой тока статора АД (рис. 3.9 б) связано с попеременной работой силовых ключей АИН и проводящим состоянием диодов, шунтирующих силовые ключи АИН при рекуперации реактивного тока в конденсатор С-фильтра ЗПН.

Таким образом, проведённый численный эксперимент подтвердил возможность замедления процесса разряда конденсатора С-фильтра в момент возникновения провала напряжения, что позволяет увеличить продолжительность управления приводом при аварийных режимах в питающей сети.

Для подтверждения возможности разгона АД до номинальной скорости после восстановления напряжения в питающей сети необходимо исследовать

возможность управления выходной частотой АИН при нарастании напряжения в ЗПН. Значение напряжения  $U_{\text{вых. АИН}}$  на выходе трёхфазного АИН с предложенной СУ с ШИМ определяется выражением (3.10):

$$U_{\text{вых. АИН}} = \frac{K \cdot \sin(2\pi f_{\text{вых. АИН}}) \cdot U_{\text{ДС.ЗПН.НОМ}}}{\sqrt{2}}, \quad (3.10)$$

Где:  $f_{\text{вых. АИН}}$  – частота переменного тока на выходе АИН;

$U_{\text{ДС.ЗПН.НОМ}}$  – номинальное напряжение в ЗПН;

$K$  – коэффициент заполнения ШИМ, изменяющийся в диапазоне  $K = 0 \div 1$  при управлении  $f_{\text{вых. АИН}} = 0 \div 50$  Гц:

$$K = \frac{U_{\text{ДС.ЗПН.НОМ}}}{f_{\text{ДВ.НОМ}}} \cdot f_{\text{вых. АИН}}, \quad (3.11)$$

Где:  $f_{\text{ДВ.НОМ}}$  – номинальная частота питающей сети АД.

В случае управления выходной частотой  $f_{\text{вых. АИН}}$  изменяющимся напряжением в ЗПН  $U_{\text{ДС.ЗПН.Var}}$  в процессе разгона АД до номинальной скорости значение напряжения на выходе трёхфазного АИН определяется выражениями (3.12) и (3.13):

$$U_{\text{вых. АИН}} = \frac{K \cdot \sin(2\pi f_{\text{вых. АИН}}'') \cdot U_{\text{ДС.ЗПН.Var}}}{\sqrt{2}}, \quad (3.12)$$

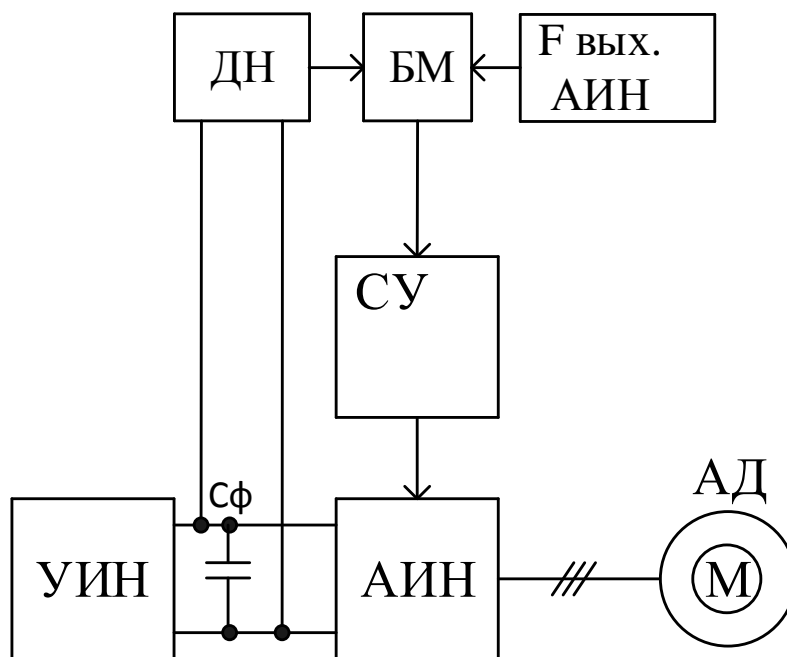
Где:  $f_{\text{вых. АИН}}''$  – выходная частота АИН при её управлении изменяющимся напряжением в ЗПН  $U_{\text{ДС.ЗПН.Var}}$ :

$$f_{\text{вых. АИН}}'' = f_{\text{вых. АИН}} \cdot \frac{U_{\text{ДС.ЗПН.Var}}}{U_{\text{ДС.ЗПН.НОМ}}} \quad (3.13)$$

При управлении выходной частотой  $f_{\text{вых. АИН}}$  изменяющимся в ЗПН напряжением  $U_{\text{ДС.ЗПН.Var}}$  управляющим воздействием является напряжение  $U_{\text{ДС.ЗПН.Var}}$ . (при  $K=1$  для  $f_{\text{вых. АИН}} = f_{\text{ДВ.НОМ}}$ ). При изменении  $U_{\text{ДС.ЗПН.Var}}$  в диапазоне  $U_{\text{ДС.ЗПН.Var}} = 0 \div U_{\text{ДС.НОМ}}$  для выражения (3.12) выполняется закон частотного регулирования  $\frac{U}{f} = \text{const}$ .

На рисунке 3.10 представлена функциональная схема управления выходной частотой АИН изменяющимся напряжением в ЗПН в режиме разгона АД до номинальной скорости. К выходу управляемого источника напряжения (УИН) подключен вход АИН, где управление выходной частотой АИН

производится на основе анализа изменения напряжения поступающего на вход АИН с БМ. Информация об изменении напряжения поступает с ДН на вход БМ, в котором формируется управляющее воздействие на систему управления таким образом, чтобы выходная частота АИН изменялась пропорционально с  $U_{\text{ДС.ЗПН.Var}}$ .



УИН – управляемый источник напряжения,  $C_{\phi}$  – конденсатор С-фильтра, ДН – датчик напряжения, БМ – блок масштабирования, АИН – автономный инвертор напряжения,  $F_{\text{вых. АИН}}$  – задатчик выходной частоты АИН, АД – асинхронный двигатель.

Рисунок 3.10 – Функциональная схема управления выходной частотой АИН изменяющимся напряжением в ЗПН в режиме разгона АД

В соответствии с функциональной схемой (рис. 3.10) разработана имитационная модель в среде MatLab для проведения исследования возможности управления выходной частотой АИН изменяющимся напряжением в ЗПН в режиме разгона АД, которая представлена на рисунке 3.11. Имитационная модель содержит: задатчик скорости ( $F_3$ ); блок масштабирования, состоящий из делителя (FB1) и элемента умножения (Mult

1); функциональный блок задания выходной частоты АИН (FB2); фиксированную константу (K) для выполнения условия (3.12); генераторы синусоидальных колебаний (FB3, FB4, FB5); элементы умножения (Mult 2 - Mult 4); генератор с ШИМ (PWM G); датчик напряжения (SU); датчик тока (SI); блок управления источником постоянного напряжения (BCDC); управляемый источник напряжения (CDC); конденсатор С-фильтра ( $C_\phi$ ); автономный инвертор напряжения (PWM IGBT Inverter); асинхронный двигатель (M); механическую нагрузку (Pm); измерительный блок (FB6).

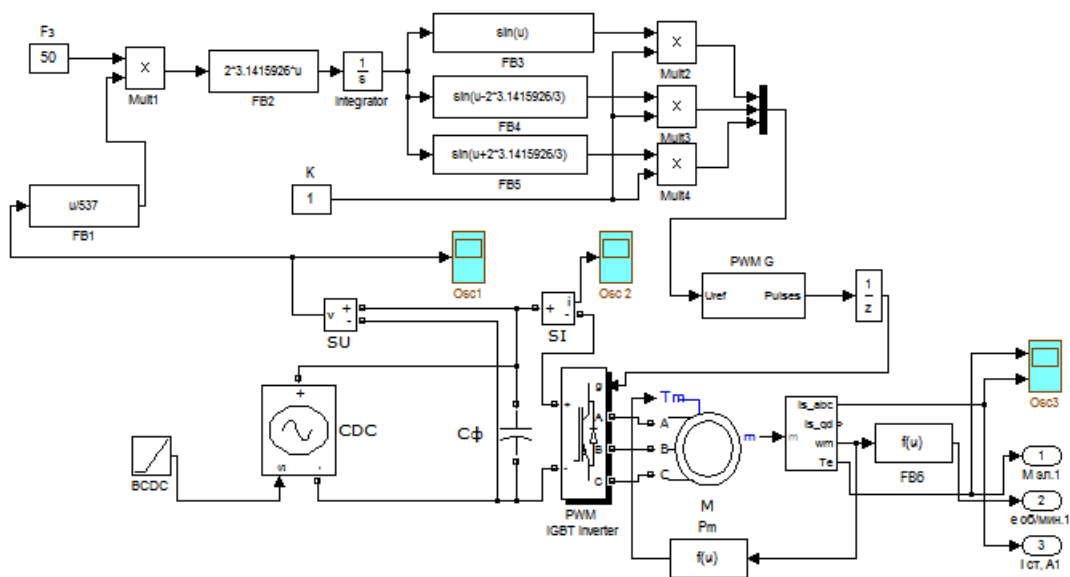
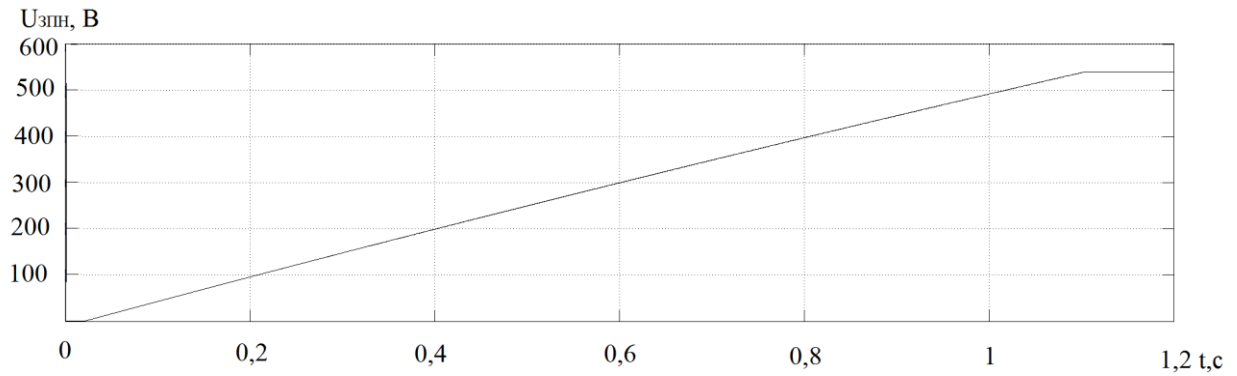


Рисунок 3.11 – Имитационная модель системы управления выходной частотой АИН изменяющимся напряжением в ЗПН в режиме разгона АД

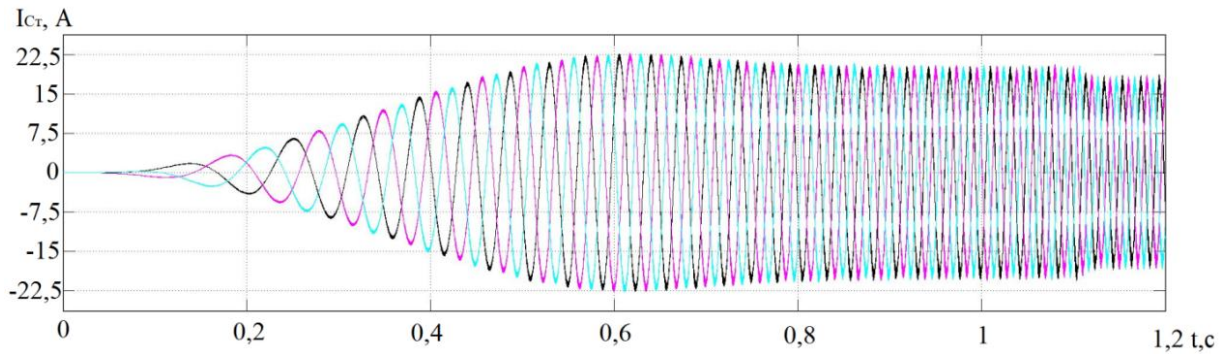
На рисунке 3.12 проиллюстрированы полученные осциллограммы зависимости тока статора  $I_{ст}$ , момента развиваемого на валу АД  $M_{дв}$  при изменении напряжения на входе АИН от  $U_{ЗПН} = 0$  до  $U_{ЗПН} = 537$  В. Как видно из осциллограмм изменение тока статора АД и момента на валу АД при нарастании напряжения в ЗПН происходит без возникновения колебательных процессов.

Превышение тока статора АД на 25% относительно номинального значения в процессе разгона АД является допустимым значением для силовых транзисторных модулей АИН [72, 73, 74] и статорных обмоток АД. Анализ

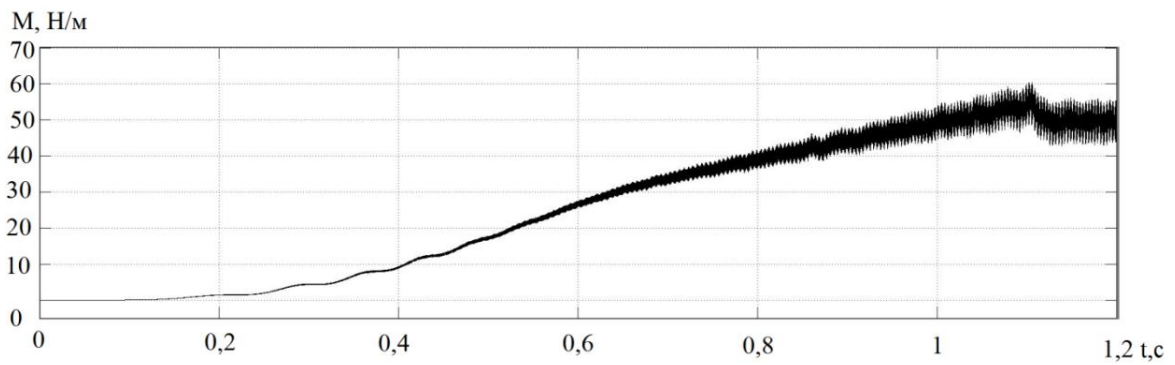
осциллограмм, полученных в процессе имитационного моделирования показывает, что происходит плавное нарастание тока статора АД (рис. 3.12 б) и изменение момента  $M$ , развиваемого на валу АД при отсутствии колебательных процессов при разгоне АД (рис. 3.12 в).



а)



б)



в)

Рисунок 3.12 – Осциллограммы изменения тока статора АД и момента на валу АД при управлении выходной частотой АИН напряжением ЗПН: изменение напряжения в ЗПН (а); изменение тока статора АД (б); изменение момента на валу АД (в)

Полученные результаты имитационного моделирования показали возможность управления выходной частотой АИН при снижении и нарастании напряжения на входе АИН.

Для устранения бросков входного тока АИН при резком восстановлении напряжения на его входе необходимо рассмотреть причины их возникновения.

Первая причина – при резком повышении напряжения на входе АИН его выходное напряжение  $U_{\text{Вых.АИН}}$  для каждой из фаз определяется выражением (3.13):

$$U_{\text{Вых.АИН}} = \frac{K \cdot U_{\text{DC ном}}}{\sqrt{2}}, \quad (3.14)$$

Где:  $K$  – коэффициент широтно-импульсной модуляции IGBT транзисторов силового модуля АИН, зависящий от задания выходной частоты АИН  $f_{\text{Вых.АИН}}$  на момент восстановления напряжения в ЗПН.

Вторая причина связана с нарушением синхронизации выходного тока  $I_{\text{Вых.АИН}}$  АИН и тока статора  $I_{\text{Ст.АД}}$  АД. Нарушение синхронизации  $I_{\text{Вых.АИН}}$  и  $I_{\text{Ст.АД}}$  связано с неуправляемым снижением скорости АД со стороны АИН в режиме свободного выбега.

Для преодоления провала напряжения в ЗПН при восстановлении напряжения на входе АИН с отсутствием бросков входного  $I_{\text{Вх.АИН}}$  и выходного тока АИН  $I_{\text{Вых.АИН}}$ , необходимо выполнить следующие условия:

– баланса частот  $f_{\text{Вых.АИН}} = 2\pi\omega_s$ ,

Где:  $\omega_s$  – циклическая частота вектора поля статора АД;

– баланса напряжения на выходе АИН  $U_{\text{Вых.АИН}}$  и остаточного напряжения на статорных обмотках АД  $U_{\text{Ст.АД}}$  на момент восстановления напряжения в звене постоянного напряжения  $U_{\text{Вых.АИН}} = U_{\text{Ст.АД}}$ .

Представленные выражения (3.15) и (3.16) обосновывают возможность управления АИН без возникновения бросков входного тока АИН  $I_{\text{Вх.АИН}}$  и тока статора АД  $I_{\text{Ст.АД}}$  после восстановления напряжения в ЗПН:

$$U_{\text{Вых.АИН}} = \frac{K'' \cdot \sin(2\pi f_{\text{Вых.АИН}}') \cdot U_{\text{DC.ЗПН.Var}}}{\sqrt{2}} \quad (3.15)$$

$$f_{\text{ВЫХ.АИН}}'' = f_{\text{ВЫХ.АИН}} \cdot \frac{U_{\text{DC.ЗПН.Var}}}{U_{\text{DC.ЗПН.НОМ}}} \quad (3.16)$$

Согласно выражениям (3.15) и (3.16) сохранение баланса частот  $f_{\text{ВЫХ.АИН}} = 2\pi\omega_s$  и баланса напряжений  $U_{\text{ВЫХ.АИН}} = U_{\text{СТ.АД}}$  возможно достичь в момент восстановления напряжения на входе АИН в случае если выполнить условие сохранения информации о выходной частоте АИН на момент восстановления напряжения на входе АИН и подстройки коэффициента заполнения ШИМ  $K''$  по закону нарастания  $U_{\text{DC.ЗПН.Var}}$ .

Таким образом, имеется возможность обеспечения включения в работу АИН без нарушения синхронизации тока статора АД и выходного тока АИН с отсутствием бросков тока статора АД и входного тока АИН. Разгон АД до номинальной скорости после восстановления напряжения на входе АИН осуществляется за счёт изменения  $K''$  и  $f_{\text{ВЫХ.АИН}}$  в пропорции, изменяющейся в соответствии с кривой разгона АД [58].

На основании полученных результатов численных экспериментов при управлении выходной частотой АИН напряжением ЗПН и анализе причин возникновения бросков входного тока АИН, разработана комбинированная система управления АИН, позволяющая устранить аварийные броски тока в транзисторных ключах при резком восстановлении напряжения на его входе. Функциональная схема комбинированной системы управления представлена на рисунке 3.13.

Работа комбинированной системы управления основана на контроле изменяющегося напряжения  $U_{\text{DC}}$  в ЗПН и управлении выходной частотой  $f_{\text{ВЫХ.АИН}}$  АИН для замедления разряда конденсатора С-фильтра ЗПН, после регистрации провала напряжения  $U_{\text{Вх}}$ . При восстановлении напряжения в питающей сети осуществляется плавный разгон АД до номинальной скорости изменяющимся напряжением в ЗПН в режиме разгона АД с учётом особенностей, связанных с сохранением баланса частот и напряжения, которые определяются выражениями (3.15) и (3.16).

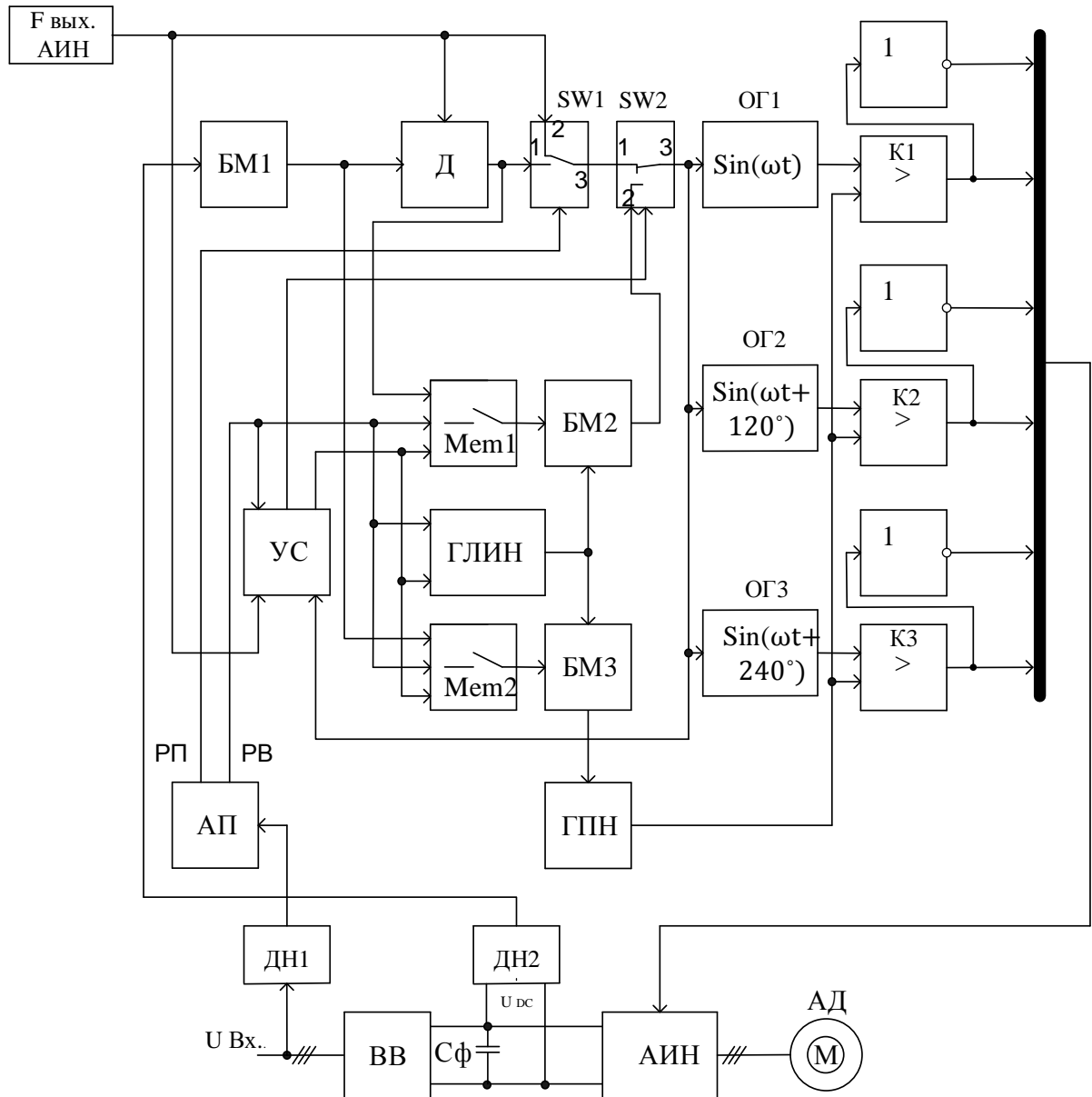


Рисунок 3.13 – Функциональная схема комбинированной системы управления АИН

Ниже рассмотрен алгоритм работы комбинированной системы управления. В нормальном режиме закон частотного регулирования подчиняется отношению  $U/f = \text{const}$ . В момент регистрации провала напряжения в питающей сети сигнал с датчика напряжения (ДН1) поступает на вход анализатора провала (АП) напряжения, где формируется сигнал управления который через канал РП подаётся на вход управления коммутатора SW1, где его вход 1 соединяется с выходом 3. Информация об изменении напряжения

$U_{ЗПН}$  поступает с ДН2 через блок масштабирования (БМ1) на вход делителя (Д), где формируется сигнал управления выходной частотой АИН в соответствии с законом изменения напряжения  $U_{ЗПН}$ , поступающий на вход управления частотой генераторов синусоидального напряжения через коммутатор SW2, а с выходов опорных генераторов (ОГ1-ОГ3) синусоидальное напряжение с изменяющейся частотой поступает на входы компараторов (К1-К3). В компараторах амплитуда напряжения, изменяющаяся по синусоидальному закону, сравнивается с напряжением, формируемым на выходе генератора пилообразного напряжения (ГПН). На выходе компараторов формируется ШИМ сигнал управления транзисторными ключами АИН. В момент восстановления напряжения в питающей сети в АП формируется сигнал, который через выходной канал РВ подаётся на входы устройства управления (УС), элементы памяти Mem1, Mem2 и вход запуска генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН). Сформированный в УС сигнал управления подаётся на вход управления коммутатором SW2, который подключает выход 3 SW2 к входу 2. Элемент памяти Mem1 сохраняет информацию о значении задания выходной частоты АИН, а Mem2 о значении напряжения в ЗПН на момент восстановления напряжения в системе электроснабжения. При восстановлении напряжения в питающей сети запускается ГЛИН, где время нарастания выходного напряжения определяет интенсивность разгона АД с пониженной скорости до номинальной. Информация об остаточном значении выходной частоты АИН и напряжения ЗПН на момент восстановления напряжения в питающей сети поступает на входы блоков масштабирования БМ2 и БМ3 с ячеек памяти Mem1, Mem2, после чего в блоке БМ2 формируется сигнал управления выходной частотой АИН, а в БМ3 амплитудой пилообразного напряжения который подаётся на генератор пилообразного напряжения (ГПН) для выполнения условия баланса частот и напряжения за счёт подстройки коэффициента модуляции  $K''$  в соответствии с (3.15) и (3.16), в результате чего ГПН формирует сигнал,

который подаётся на компараторы К1-К3. Дальнейшее управление выходной частотой и напряжением АИН осуществляется в соответствии с законом изменения напряжения на выходе ГЛИН, который определяет интенсивность разгона АД до номинальной скорости. По достижению заданного значения выходной частоты АИН происходит переключение коммутатора SW2 в исходное состояние и ГПН переходит в исходный режим работы, а ГЛИН и ячейки памяти Mem1, Mem2 подготавливаются к регистрации следующего провала напряжения.

Комбинированная система управления позволяет сохранить продолжительность работы привода при провале напряжения в питающей сети и замедлить разряд конденсатора С-фильтра, а после восстановления напряжения обеспечить разгон АД до номинальной скорости без перегрузки транзисторных ключей силового модуля АИН по току [33, 58].

Для проведения исследования в среде Matlab разработана имитационная модель комбинированной системы управления АИН с учётом функциональной схемы (см. рис. 3.13), которая представлена на рисунке 3.14. В состав имитационной модели комбинированной системы управления АИН входят: таймер (Т); питающая сеть (G); ключи (SW1-SW3); входной выпрямитель (VD1); конденсатор С-фильтра ЗПН ( $C_{\phi}$ ); ключ, фиксирующий остаточное напряжения в ЗПН (SW4); конденсатор (C1) выполняющий функцию ячейки памяти; функции масштабирования напряжения ЗПН (F1, F2); функции масштабирования амплитуды линейно-изменяющегося напряжения (F3, F9); генераторы линейно-изменяющегося напряжения (GLAV1, GLAV2), функция задания выходной частоты АИН (F4); функция для выполнения закона частотного регулирования (F5); генераторы синусоидальных колебаний (F6, F7, F8); элементы, выполняющие функцию логического умножения (DD1-DD15); элементы, выполняющие функцию логического отрицания (D1-D5); генератор с ШИМ (G1); автономный инвертор напряжения (IGBT inverter); асинхронный двигатель (M); функциональный блок механической нагрузки (FB1); датчики напряжения (SU1, SU2); сумматоры (Add1-Add6), компараторы

(Cmp1, Cmp2); датчик выходной частоты АИН ( $F_3$ ); константа задания времени разгона АД ( $K1$ ); константа задания времени подстройки коэффициента заполнения ШИМ  $K''$  ( $K2$ ); константа опорного уровня ( $K3$ ); константа переключения типа механической нагрузки ( $K4$ ).

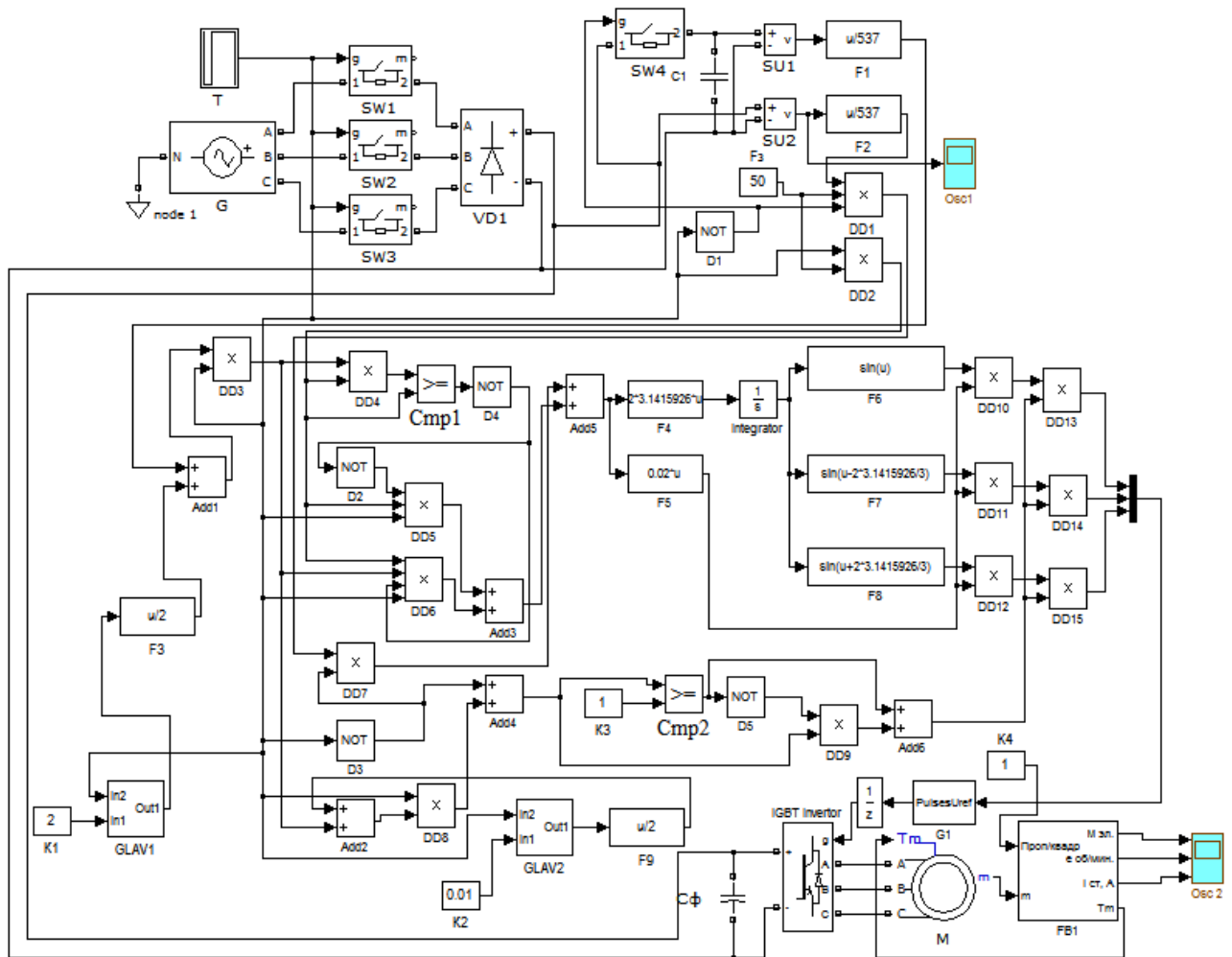


Рисунок 3.14 – Имитационная модель комбинированной системы управления АИН

На рисунке 3.15 проиллюстрированы осциллограммы, полученные на разработанной имитационной модели комбинированной системы управления АИН в среде MatLab, с параметрами АД типа АДКЗР мощностью  $P=37$  кВт с вентиляторной нагрузкой и ёмкостью конденсатора С-фильтра  $C_{\phi}=22000$  мкФ. В момент времени  $t=0,1$ с в питающей сети возникает провал напряжения в ЗПН, а в момент времени  $t=1,3$  напряжение в питающей сети резко

восстанавливается. На интервале времени  $t=0,1\text{с}$  до  $t=1,3\text{с}$  напряжение в ЗПН снижается до значения  $U_{\text{ЗПН}} = 270\text{В}$ , (см. рис. 3.15, б). Как видно из осциллограммы (рис. 3.15 а) на этом интервале времени не происходит нарушения синхронизации выходного тока АИН и тока статора  $I_{\text{Ст}}$  АД, не возникают броски тока статора АД, где ток статора АД не превышает номинального значения при восстановлении напряжения на входе АИН, а также разгон АД (см. рис. 3.15 в) осуществлялся до номинальной скорости по завершению провала напряжения по линейному закону.

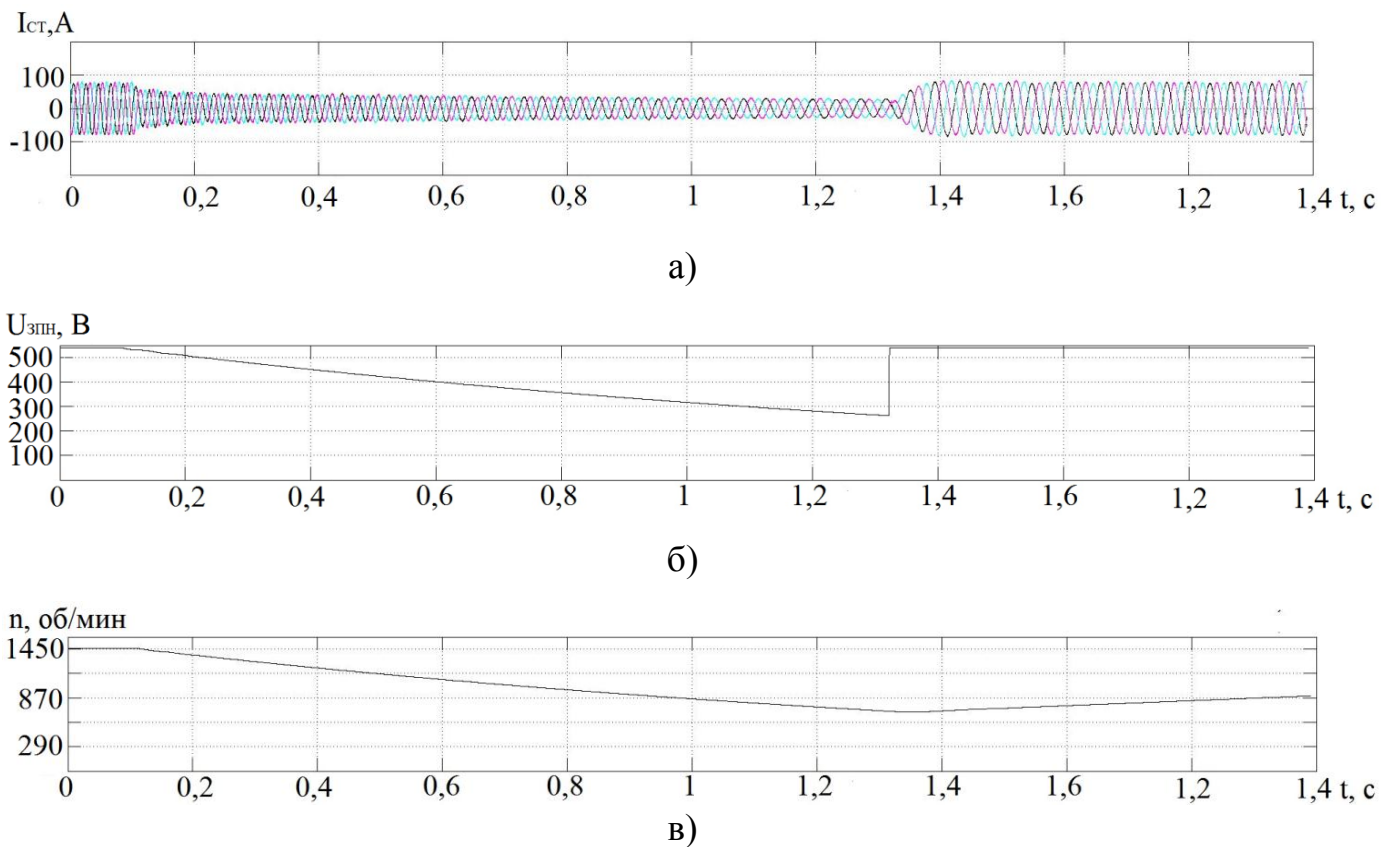
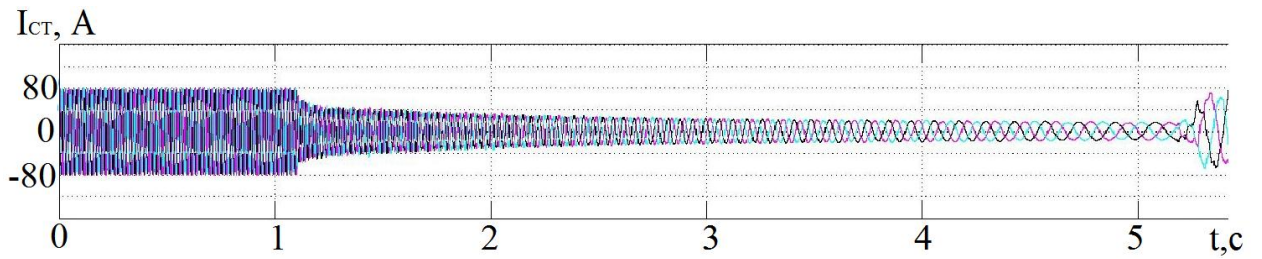


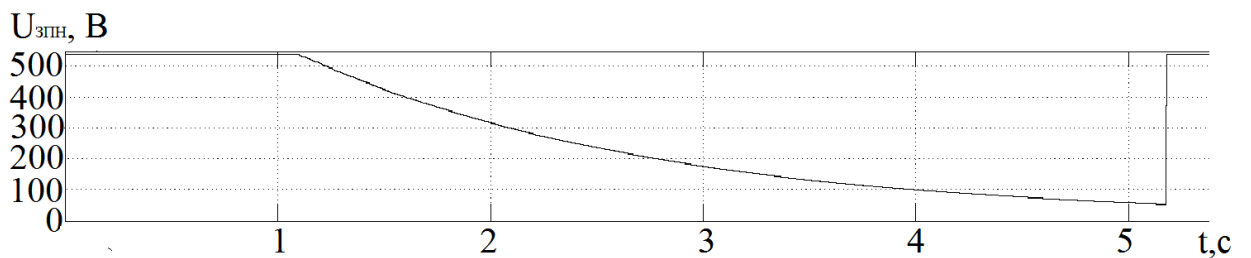
Рисунок 3.15 – Результаты исследования при провале напряжения длительностью  $t=1,2\text{с}$ : ток статора АД (а); напряжение в ЗПН (б); скорость АД (в)

На рисунке 3.16 представлены осциллограммы преодоления ЧРП провала напряжения длительностью  $t=4\text{с}$ . Синхронизация выходного тока АИН и тока статора АД поддерживается при провале напряжения длительностью

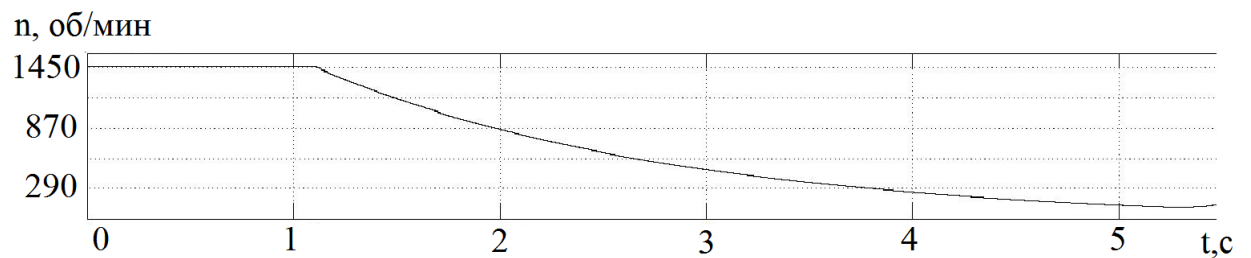
$t=4\text{с}$  (рис. 3.16 а) и снижении напряжения в ЗПН до значения  $0,1U_{DC\text{ ном.}}$  (рис. 3.16 б).



а)



б)



в)

Рисунок 3.16 – Результаты исследования при провале напряжения длительностью  $t=4\text{с}$ : ток статора АД (а); напряжение в ЗПН (б); скорость АД (в)

На рисунке 3.17 проиллюстрированы осциллограммы переходных процессов после восстановления напряжения в ЗПН, где их продолжительность составляет  $t=0,28\text{с}$ . В момент времени  $t=5,1\text{с}$  напряжение в ЗПН восстанавливается с  $U_{DC} = 54\text{В}$  до номинального значения  $U_{DC\text{ ном}} = 537\text{В}$ . Как видно из рис. 3.17 а, на интервале времени  $t=5,1-5,38\text{с}$  наблюдаются искажения формы тока статора АД в следствии переходных электромагнитных

процессов возникающих при переходе АД в режим разгона и подстройки  $K''$  (см. уравнения 3.16, 3.17).

Значение выходного тока АИН (рис 3.17, а) на интервале времени  $t=5,25 - 5,65$  с превышает номинальное на 20%, что допустимо для существующих транзисторных модулей, на основе которых реализуется АИН используемый в составе ПЧ (кратковременная допустимая перегрузка существующих АИН в составе ПЧ составляет 150-200%) [72, 73, 74]. На интервале времени  $t=5,65 - 7,2$  с выходной ток АИН не превышает номинального значения  $I_{\text{вых.АИН}}$ .

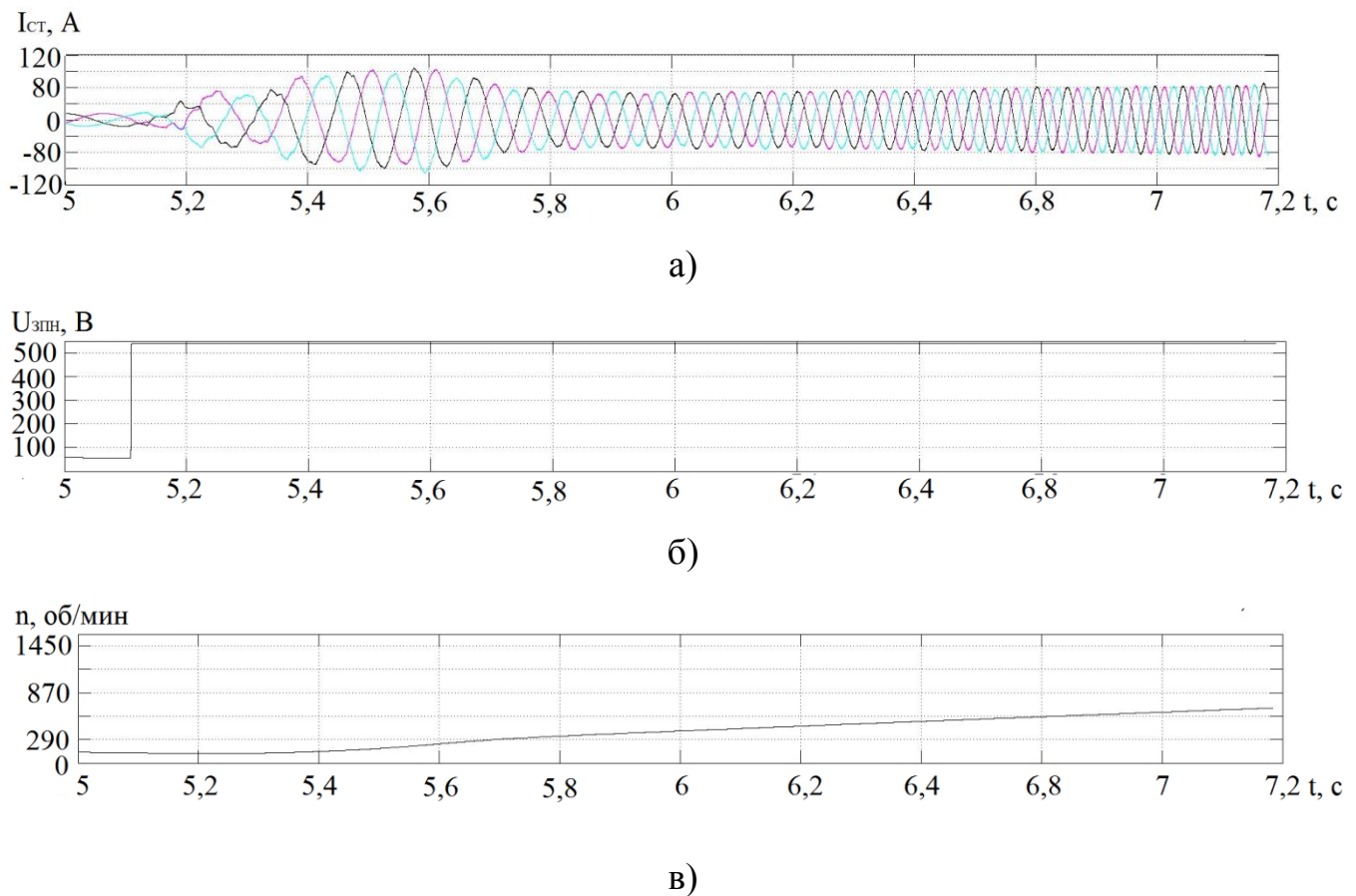


Рисунок 3.17 – Осциллограммы тока статора АД (а), напряжения в ЗПН (б) и скорости АД при восстановлении напряжения в ЗПН

Проведённые на имитационной модели исследования комбинированной системы управления подтвердили возможность увеличения времени ожидания напряжения в системе электроснабжения за счёт замедления разряда

конденсатора С-фильтра ЗПН, при управлении выходной частотой АИН напряжением ЗПН. В процессе понижения напряжения в ЗПН при разряде конденсатора С-фильтра происходит плавное снижение скорости АД, а при восстановлении напряжения происходит разгон АД до номинальной скорости, при этом выходной ток АИН не превышает номинального значения в момент восстановления напряжения на входе АИН, а также сохраняется режим управления АД на всём интервале времени преодоления провала напряжения в питающей сети.

Для повышения устойчивости ГЧРП к аварийным режимам в питающей сети, предотвращения остановок ГЧРП и обеспечения управляемого синхронного снижения скорости всех АД с последующим их разгоном до номинальной скорости на интервале преодоления аварийного режима в системе электроснабжения предлагается запатентованный способ управления АИН [33]. Предлагаемый способ управления выходной частотой АИН изменяющимся напряжением звена ЗПН реализуется с использованием комбинированной системы управления АИН. Суть предлагаемого способа заключается в плавном синхронном снижении скорости АД после регистрации в питающей сети провала напряжения за счёт управления частотой первой гармоники выходного тока АИН при снижении напряжения ЗПН. По завершении провала напряжения осуществляется плавный синхронный разгон АД до заданной скорости, что увеличивает продолжительность управления приводом на интервале времени между началом и концом провала напряжения в питающей сети.

Повышение устойчивости ГЧРП к провалам напряжения в питающей сети возможно за счёт применения запатентованного способа управления [33] основанного на введении комбинированных систем управления АИН в состав ГЧРП, где его функциональная схема представлена на рисунке 3.18. Функциональная схема ГЧРП содержит: распределительную сеть напряжением 10 кВ (РС 10кВ); понижающий трансформатор (ТП 10/0,4кВ); общий входной выпрямитель (ВВ); входной L-фильтр ( $L_{\phi}$ ); общие шины звена постоянного

напряжения (ЗПН); датчик контроля напряжения ЗПН (ДН); блок регистрации аварийных режимов (БРАР); задатчик скорости (ЗС); групповой частотно-регулируемый привод (ГЧРП); сглаживающие С-фильтры ( $C_{\phi}$ ); автономные инверторы напряжения (АИН); индивидуальные комбинированные системы управления (КСУ) АИН; асинхронные двигатели (АД).

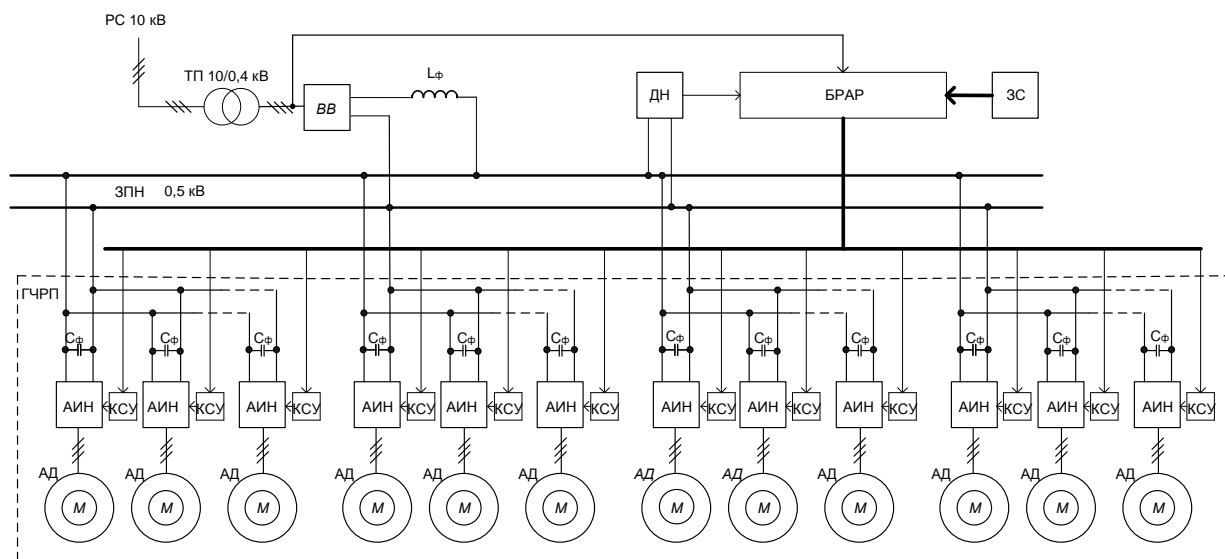


Рисунок 3.18 – Функциональная схема ГЧРП с комбинированными системами управления

Асинхронные двигатели АД входящие в состав ГЧРП, подключены к выходам трехфазных АИН, где к входу каждого из которых параллельно подключены  $C_{\phi}$  и общие шины ЗПН, к которым также через сглаживающий дроссель  $L_{\phi}$  подключен выход диодного выпрямителя ВВ, вход которого подключен к трехфазной распределительной сети напряжением 0,4кВ. Трехфазная распределительная сеть напряжением 0,4 кВ подключена к вторичной обмотке понижающего трансформатора ТП-0,4кВ, который стороной высокого напряжения подключен к сети напряжением 10 кВ. Управление интенсивностью разгона и торможения ГЧРП осуществляется от общей системы управления совмещённой с БРАР, на выходе которой формируется задание интенсивностью разгона и торможения поступающее на входы КСУ.

Устройство функционирует следующим образом. ВВ, получающий питание через понижающий трансформатор (ТП) из распределительной сети (РС) напряжением 10 кВ, преобразует трехфазную систему линейных напряжений (с действующим значением 380 В) в выпрямленное напряжение, которое через сглаживающий дроссель выпрямителя поступает на общие шины ЗПН. Выпрямленное напряжение подается на входы АИН, где АИН обеспечивают пуск, торможение и регулирование скорости АД с высокой эффективностью, в соответствии с заданием интенсивности разгона и торможения от общей системы управления совмещённой с БРАР, где БРАР имеет три входа и один выход. Один из его входов подключен к выходу ЗС определяющего интенсивность разгона и торможения АД, второй вход подключен к выходу ДН, предназначенного для контроля напряжения на общих шинах ЗПН, а третий вход используется для регистрации провала напряжения в питающей сети. Выход БРАР подключен к входам КСУ АИН, где БРАР совместно с КСУ после регистрации провала напряжения в одной или всех фазах питающей сети переводит АД в режим снижения скорости для замедления разряда конденсаторов  $C_{\phi}$  общего ЗПН и увеличения времени ожидания завершения провала напряжения в системе электроснабжения по окончании которого происходит плавный разгон АД до номинальной скорости.

### **3.3 Разработка способа ограничения зарядного тока конденсаторов С-фильтра ЗПН при динамических режимах работы питающей сети**

Функциональная схема ГЧРП с объединением АИН по входу общим ЗПН с выходом ВВ, представленная на рисунке 3.19 содержит конденсаторы  $C_{\phi}$ . При подключении ГЧРП к питающей сети через диоды ВВ протекает ток заряда конденсаторов  $C_{\phi}$ , превышающий максимально допустимый прямой ток диодов. При больших мощностях ГЧРП с объединёнными по входу АИН требуется применение технических решений для ограничения зарядного тока

конденсаторов С-фильтров на основе резистора, тиристора [52], дросселя с большой индуктивностью установленного на входе ВВ [28] и индуктивности  $L_\phi$  последовательно включенной между выходом ВВ и шинами ЗПН [28].

Увеличение индуктивности  $L_\phi$  приводит к повышению напряжения  $U_{DC}$  на общих шинах ЗПН до значения, определяемого выражением (3.17):

$$U_{DC} = U_{BB} + E_L, \quad (3.17)$$

Где:  $U_{BB}$  – напряжение на выходе входного выпрямителя;

$E_L$  – ЭДС самоиндукции дросселя.

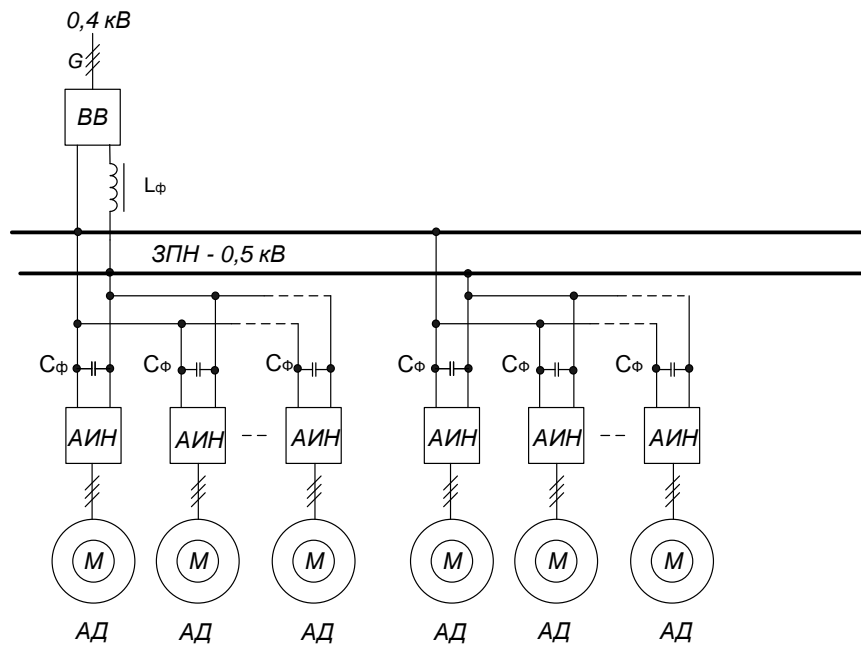


Рисунок 3.19 – Функциональная схема ГЧРП с объединением АИН по входу общим ЗПН

Повышение напряжения в ЗПН требует применения конденсаторов С-фильтра ЗПН с повышенным рабочим напряжением и выполнения особых требований к изоляции токоведущих шин, что является недостатком существующего способа ограничения зарядного тока. Для устранения недостатков существующих технических решений [28, 52] по ограничению зарядного тока разработан диодно-реакторный ограничитель тока заряда (ДР-ОТЗ) [55]. На рисунке 3.20. представлена функциональная схема ДР-ОТЗ.

В состав схемы ДР-ОТЗ входят следующие элементы: датчик напряжения (ДН); система управления шунтирующим ключом (СУ-ШК); трансформатор напряжения, работающий в режиме короткого замыкания (ТН); диодный выпрямитель (ДВ); реактор (Р); шунтирующий ключ (ШК). Силовой входной выпрямитель (СВВ) звена постоянного напряжения, звено постоянного напряжения (ЗПН) и конденсаторы С-фильтра ( $C_{\phi}$ ) ЗПН входят в состав ГЧРП.

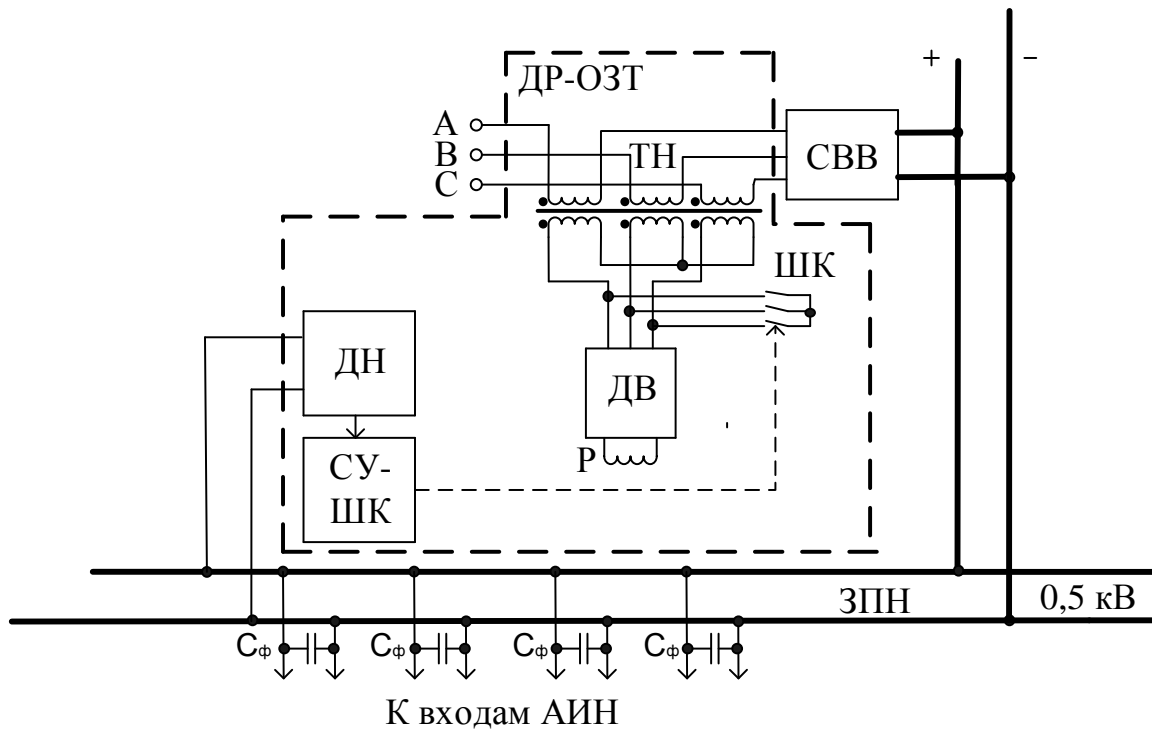


Рисунок 3.20 – Функциональная схема ДР-ОТЗ

ДР-ОТЗ работает следующим образом. При подаче напряжения из внешней сети происходит заряд конденсаторов  $C_{\phi}$  через выпрямитель СВВ входы которого подключены через первичные обмотки ТН к питающей сети. После подачи напряжения происходит плавное нарастание тока в следствии возникновения электромагнитных процессов в реакторе Р, что приводит к ограничению тока заряда конденсаторов  $C_{\phi}$ . В процессе плавного нарастания амплитуды тока происходит плавный заряд  $C_{\phi}$  ЗПН до номинального напряжения.

По завершению переходных процессов в реакторе Р диодный выпрямитель В шунтируется ключом (ШК), что приводит к гашению электромагнитной энергии накопленной в реакторе Р через выпрямитель В и подготовка ДР-ОТЗ к следующему включению.

На рисунке 3.21 представлена имитационная модель ДР-ОТЗ с ГЧРП, где АИН объединены общим ЗПН с выходом ВВ. В состав имитационной модели входят следующие элементы: таймер (ТМ); питающая сеть (G); блок входного контактора (ББК); датчик тока (ДТ); трансформатор напряжения работающий в режиме КЗ (ТН); выпрямитель в цепи реактора (VD1); реактор (L1); общий входной выпрямитель (VD2); компаратор (К); константа опорного напряжения ОН); шунтирующий контактор (ШК); датчик напряжения (ДН); собственные системы управления АИН (ССУ1- ССУ3); генераторы ШИМ (PWM G1- PWM G3); конденсаторы С-фильтров ( $C_{\phi 1}$ - $C_{\phi 3}$ ); автономные инверторы напряжения (АИН1- АИН3); асинхронные двигатели (АД1-АД3). В имитационной модели использовался ГЧРП мощностью  $P=640\text{кВт}$ , ёмкость конденсатора С-фильтра  $C_{\phi} = 88000\text{мкФ}$ .

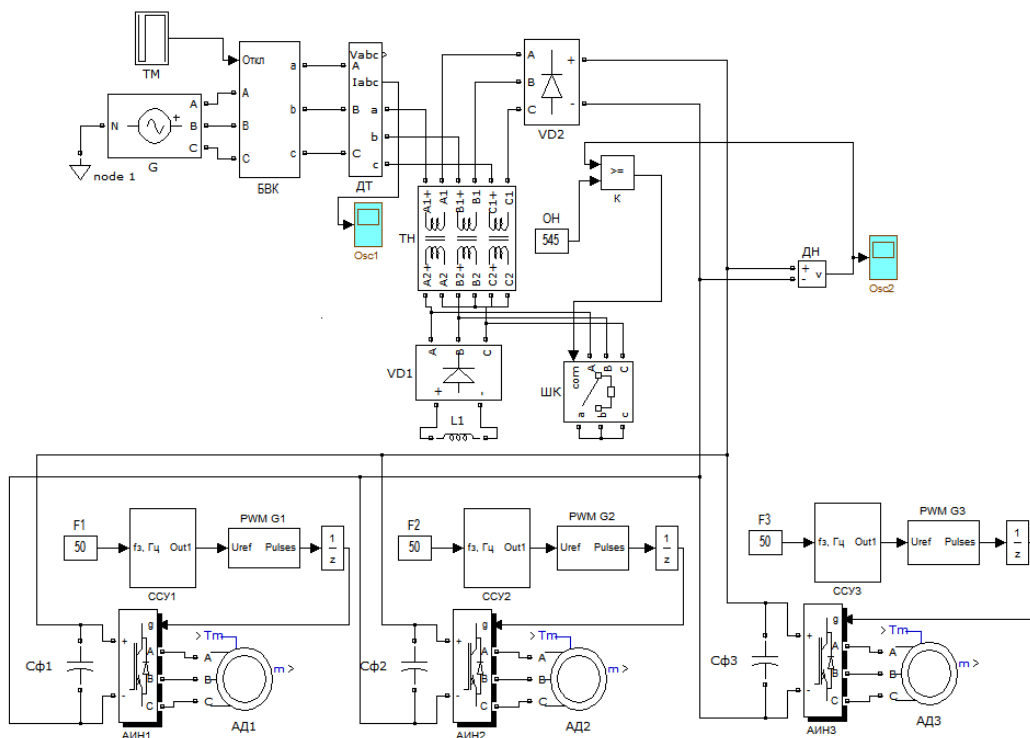


Рисунок 3.21 – Имитационная модель ДР-ОТЗ с ГЧРП

Для проведения сравнительной оценки влияния на питающую сеть разработанного ДР-ОТЗ с существующими техническими решениями ограничения зарядного тока конденсаторов С-фильтров на основе резистора  $R_{\text{огр.ЗПН}}$  и дросселя  $L_{\text{Ф}}$  разработаны имитационные модели ГЧРП с L-фильтром и резистором  $R_{\text{огр.ЗПН}}$  представленные на рисунке 3.21 и рисунке 3.22 соответственно. Параметры элементов имитационных моделей, представленных на рис. 3.22 и 3.23 соответствуют параметрам модели рис. 3.21 за исключением вновь введённых элементов  $L_{\text{Ф}}$  (см. рис. 3.22) и  $R_{\text{огр.ЗПН}}$  (см. рис. 3.23), где методика их расчёта приведена ниже.

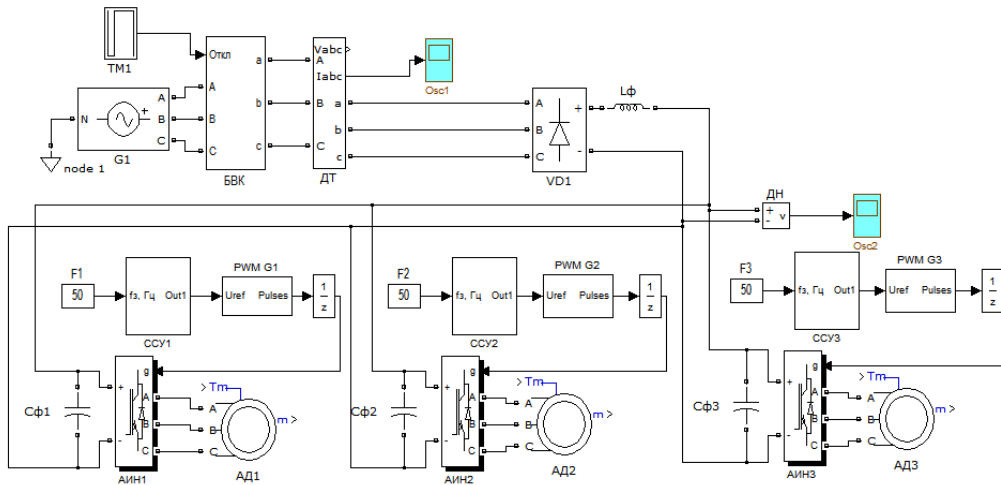


Рисунок 3.22 – Имитационная модель ГЧРП с L-фильтром

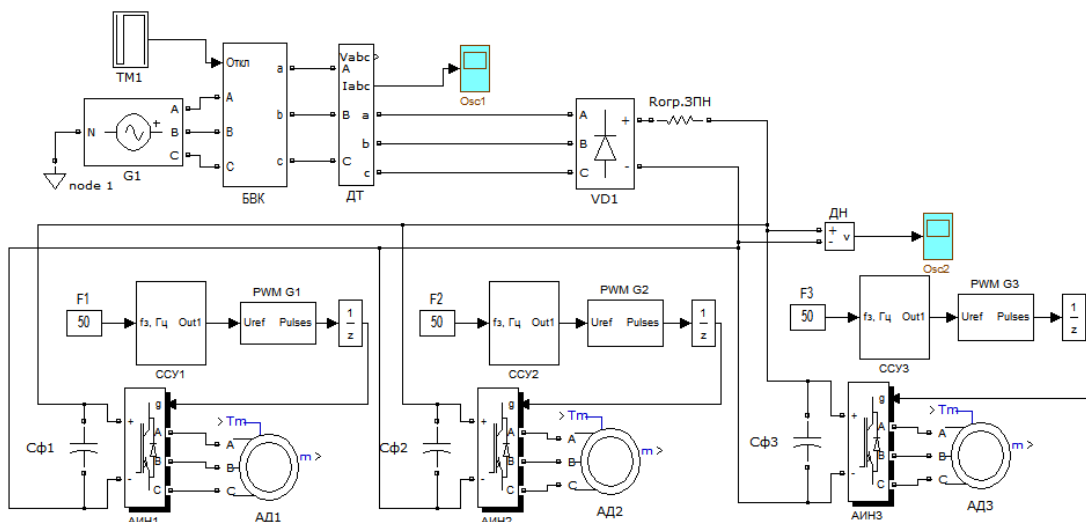


Рисунок 3.23 – Имитационная модель ГЧРП с токоограничивающим резистором

Значение токоограничивающего резистора равно  $R_{\text{Огр.ЗПН}} = 1,94 \text{ Ом}$ , которое получено расчётным путём из условия ограничения тока на выходе общего выпрямителя до значения  $I_{\text{НОМ}}$  в соответствии с выражением (3.18):

$$R_{\text{Огр.ЗПН}} = \frac{U_{DC \text{ ном}}}{I_{\text{НОМ}}} \quad (3.18)$$

При ограничении тока заряда конденсаторов С-фильтров дросселем  $L_{\phi}$ , установленным в ЗПН расчётная индуктивность равна  $L_{\phi} = 0,000012 \text{ Гн}$ , которая получена в соответствии с (3.19) и (3.20):

$$K_{\phi} = m_{\pi}^2 \cdot \omega^2 \cdot L_{\phi} \cdot C_{\phi} - 1, \quad (3.19)$$

Где:  $m_{\pi}$ -число пульсаций выпрямленного напряжения за период выпрямленного напряжения;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  - частота питающей сети;

$L$  – индуктивность дросселя фильтра;

$C_{\phi}$  – ёмкость конденсатора С-фильтра;

$K_{\phi}$  – коэффициент фильтрации фильтра, принят  $K_{\phi}=800$ .

$$L_{\phi} = \frac{K_{\phi}+1}{m_{\pi}^2 \cdot \omega^2 \cdot C_{\phi}} \quad (3.20)$$

Для созданного ДР-ОТЗ выбран коэффициент трансформации трансформатора напряжения (ТН) равный  $K_{\text{Т.ТН}} = 4$ , индуктивность реактора  $L_{\text{р}}$  включенного на выходе выпрямителя ДР-ОТЗ составляет  $L_{\text{р}} = L_{\phi}/4 = 0,00003 \text{ Гн}$ . В среде Matlab имитационным моделированием проведена оценка значения тока на входе общего выпрямителя в момент подачи напряжения на его вход при полностью разряженном конденсаторе  $C_{\phi}$  с выше приведёнными параметрами  $K_{\text{Т.ТН}}$  и  $L_{\text{р}}$ . На рисунке 3.24 приведены сравнительные осциллограммы входного тока общего входного выпрямителя при ограничении тока заряда  $C_{\phi}$  индуктивностью сглаживающего дросселя  $L_{\phi}$  включенного между выходом выпрямителя и шинами ЗПН (см. рис. 3.23, кривая 1), ограничительным резистором  $R_{\text{Огр.ЗПН}}$  включенным между выходом выпрямителя и ЗПН (см. рис. 3.24, кривая 2) ДР-ОТЗ установленном на входе выпрямителя (см. рис. 3.24, кривая 3). Максимальное значение входного тока

$I_{Вх.L\phi}$  при ограничении зарядного тока С-фильтра при помощи  $L_{\phi}$  составляет  $I_{Вх.L\phi}=4000$  А, ограничение зарядного тока С-фильтра посредством ДР-ОТЗ составляет  $I_{Вх.ТР-ОТЗ} = 1010$  А, а при ограничении резистором  $I_{Вх.R_{Огр.ЗПН}} = 1010$  А.

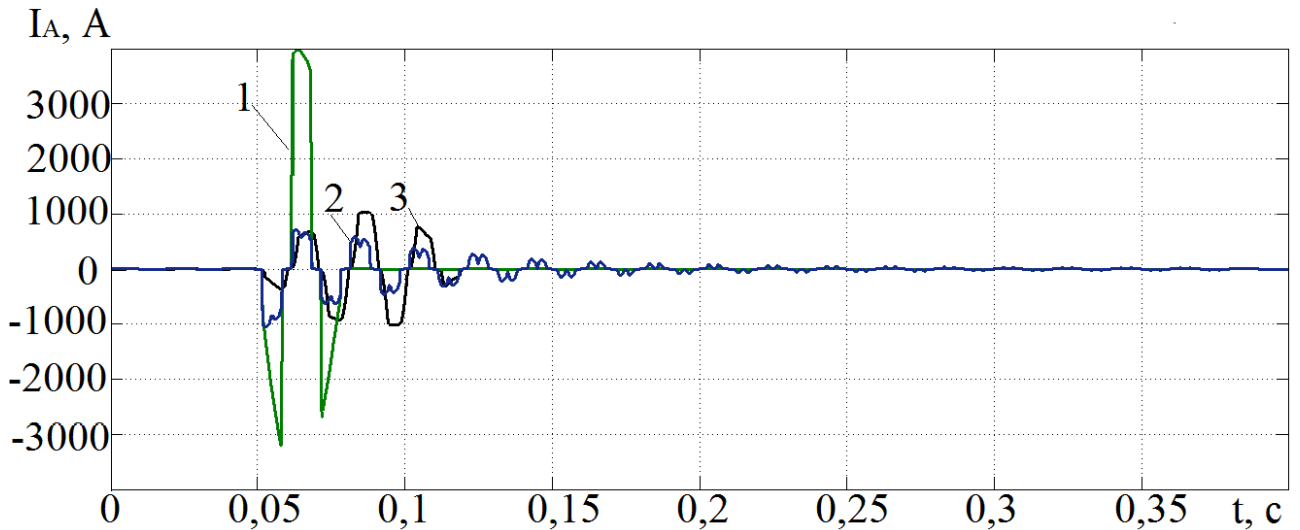
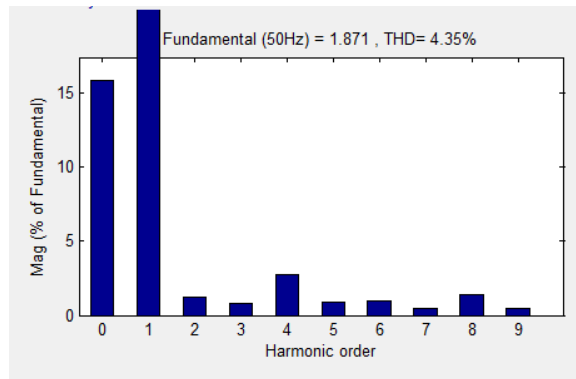


Рисунок 3.24 – Осциллограммы входного тока общего выпрямителя при: ограничении индуктивностью сглаживающего дросселя  $L_{\phi}$  ( $I_{Вх.L\phi}$  кривая 1); ограничении резистором  $R_{Огр.ЗПН}$  ( $I_{Вх.R_{Огр.ЗПН}}$  кривая 2); ограничении ДР-ОТЗ ( $I_{Вх.ДР-ОТЗ}$  кривая 3)

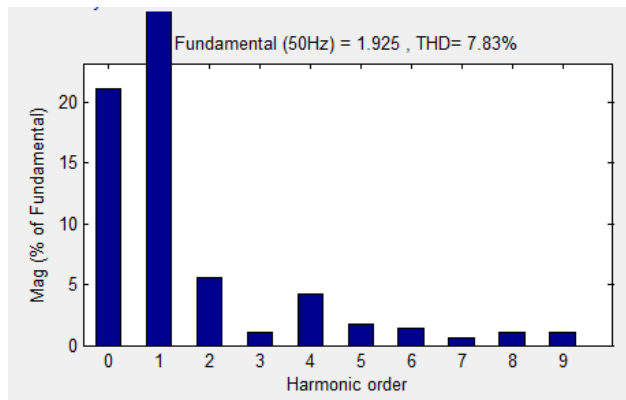
Для оценки влияния на питающую сеть ДР-ОТЗ на разработанной имитационной модели проведена сравнительная оценка коэффициентов гармоник тока, возникающих в момент ограничения зарядного тока резистивным ограничителем, индуктивностью сглаживающего дросселя и ДР-ОТЗ.

На рисунке 3.25 приведены результаты исследования гармонических составляющих фазного тока питающей сети при ограничении тока заряда конденсаторов С-фильтра ограничительным резистором (рис. 3.25 а), индуктивностью сглаживающего дросселя (рис. 3.25 б) и ДР-ОТЗ (рис. 3.25 в). Результаты исследования, представленные на рис. 3.25 получены при заряде

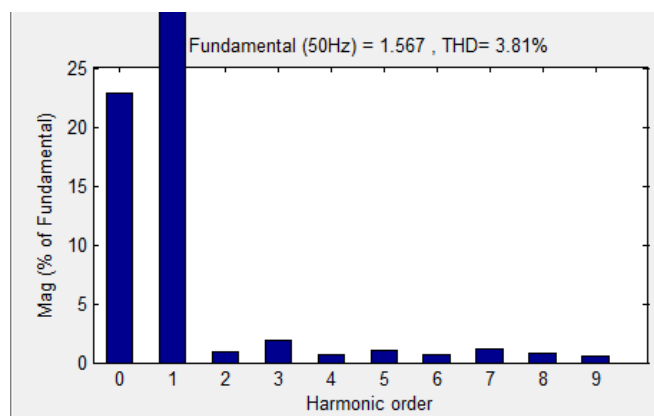
конденсаторов С-фильтра до номинального значения  $U_{DC \text{ ном}}$  на интервале времени  $t=0,05\text{с}$  до  $t=0,3\text{с}$ .



а)



б)



в)

Рисунок 3.25 – Результаты исследования гармонических составляющих фазного тока питающей сети при ограничении тока заряда конденсаторов С-фильтров разными техническими решениями

Численный эксперимент, проведённый в среде Matlab показал, что при ограничении тока заряда конденсаторов С-фильтров ограничительным резистором коэффициент гармоник тока составляет  $K_I=4,35\%$ , дросселем  $K_I=7,83\%$  и ДР-ОТЗ  $K_I=3,81\%$ . Таким образом, можно сделать вывод, что применение ДР-ОТЗ не вносит дополнительных гармонических составляющих тока в питающую сеть по сравнению с широко известными техническими решениями.

На рисунке 3.26 проиллюстрированы изменения напряжения в ЗПН при ограничении тока заряда конденсатора С-фильтра индуктивностью сглаживающего дросселя  $L_\Phi$  (см. рис. 3.26 кривая 1), ДР-ОТЗ (см. рис. 3.26 кривая 2) и резистором (см. рис. 3.26 кривая 3).

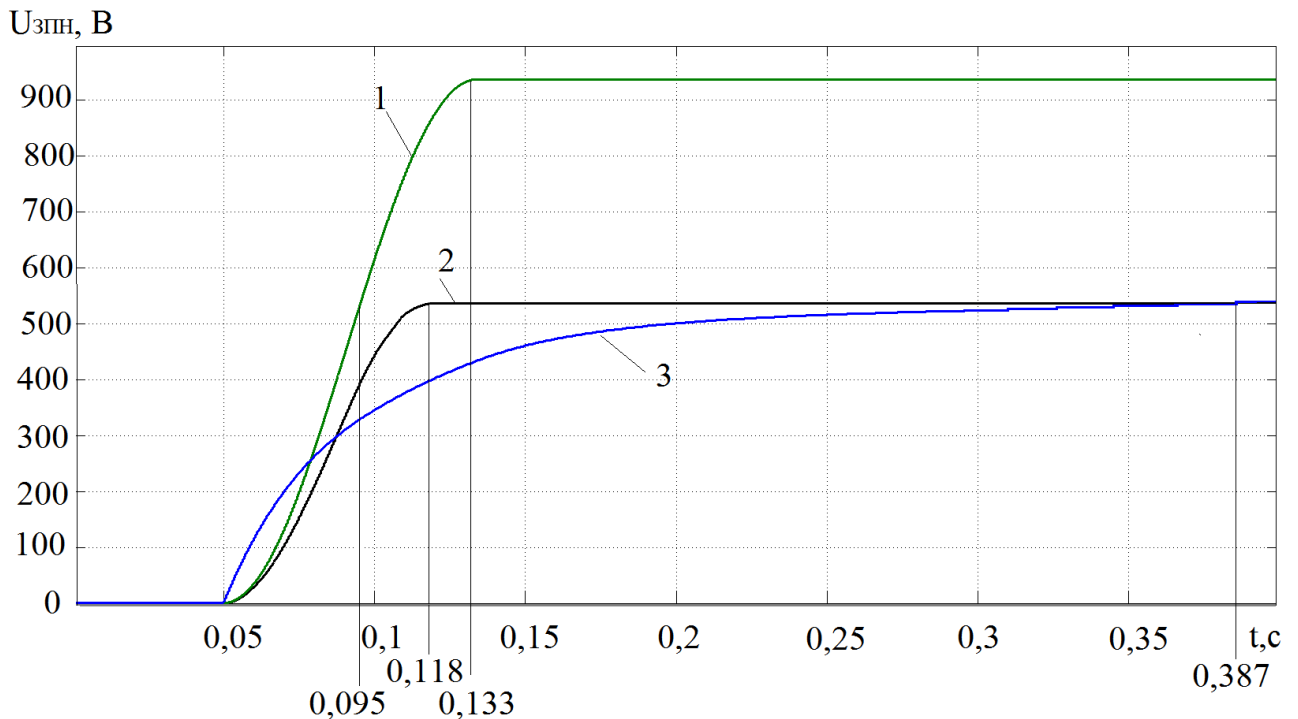


Рисунок 3.26 – Осциллограммы изменения напряжения в ЗПН при ограничении тока заряда С-фильтра

При подаче напряжения в ЗПН через сглаживающий дроссель с момента времени  $t_{\text{вкл.}} = 0,05$  с до  $t_{\text{нар.L}} = 0,095$  с происходит заряд конденсатора С-фильтра и нарастание напряжения от  $U_{DC} = 0$  до  $U_{DC} = 537$ В, а с момента

$t_{\text{Нар.}L} = 0,095 \text{ с}$  до  $t_{\text{Нар.}L} = 0,133 \text{ с}$  напряжение в ЗПН повышается с  $U_{DC} = 537 \text{ В}$  до значения  $U_{DC \text{ max.}} = 940 \text{ В}$ .

При ограничении тока заряда конденсатора С-фильтра ДР-ОТЗ время нарастания напряжения в ЗПН  $t_{\text{Нар.ДР-ОТЗ}}$  до номинального значения  $U_{DC \text{ ном}}$  составляет  $t_{\text{Нар.ДР-ОТЗ}} = 0,068 \text{ с}$ , для резистивного ограничителя при достижении  $U_{DC \text{ ном}}$  время нарастания  $t_{\text{Нар.}R} = 0,337 \text{ с}$ . В таблице 3.1. приведена сравнительная оценка способов ограничения тока заряда конденсатора С-фильтра ЗПН ГЧРП.

Таблица 3.1. Сравнительная оценка ограничения тока заряда конденсатора С-фильтра ЗПН с разными техническими решениями

|                                                                                      | Способ ограничения тока заряда конденсатора С-фильтра ЗПН. |                            |                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------|
|                                                                                      | Ограничение резистором                                     | Ограничение индуктивностью | Ограничение ДР-ОТЗ |
| Амплитуда тока на входе трёхфазного выпрямителя, А                                   | 1010                                                       | 4000                       | 1010               |
| Коэффициент гармоник тока в трёхфазной сети, %                                       | 4,35%                                                      | 7,83%                      | 3,81%              |
| Интервал времени заряда конденсатора С-фильтра ЗПН, с                                | 0,337с                                                     | 0,04с                      | 0,068с             |
| Напряжение в ЗПН $U_{DC}$ по окончанию процесса заряда конденсатора С-фильтра ЗПН, В | 537 В                                                      | 940 В                      | 537 В              |

На основе полученных в ходе имитационного моделирования данных можно сделать вывод, что ДР-ОТЗ не вносит дополнительных искажений тока и напряжения по сравнению с существующими техническими решениями,

обеспечивает плавное нарастание входного тока выпрямителя до номинального значения и не увеличивает время заряда конденсатора С-фильтра ЗПН.

Для подтверждения полученных результатов исследования ДР-ОТЗ, проведённых в среде MatLab, разработан физический макет ГЧРП с ДР-ОТЗ с общим выпрямителем и ЗПН. На рисунке 3.27 представлена функциональная схема, на основе которой построен физический макет ГЧРП с ДР-ОТЗ.

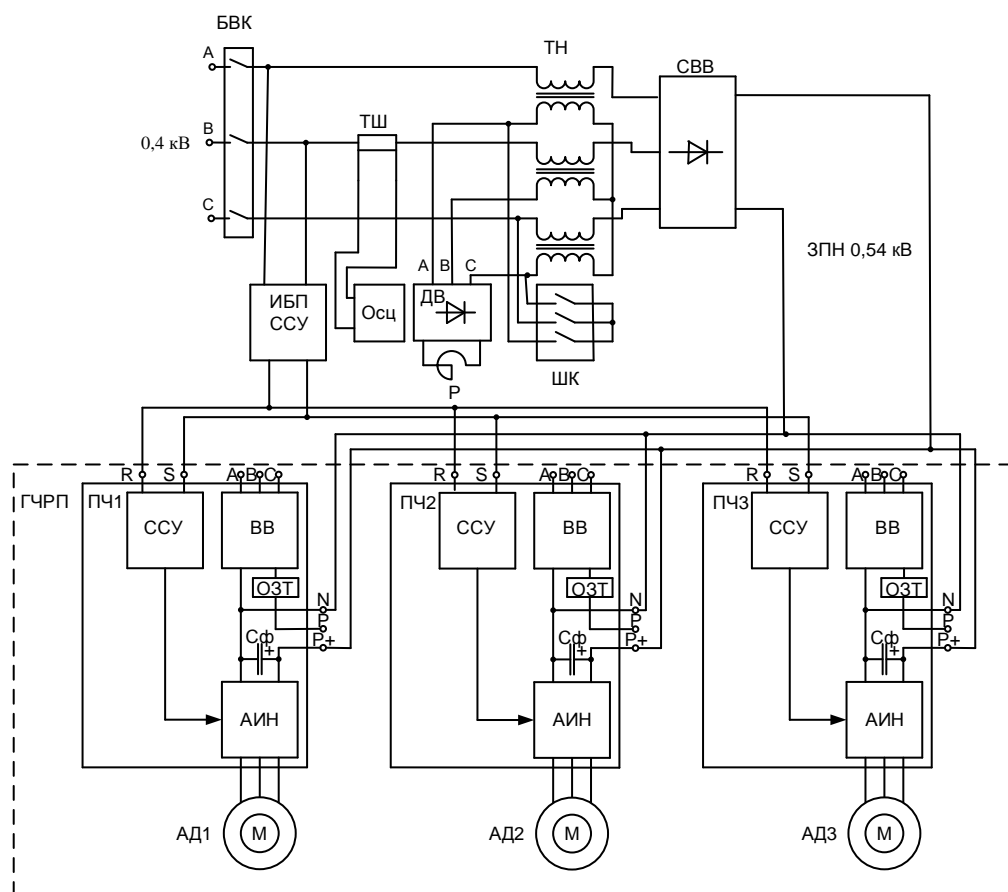
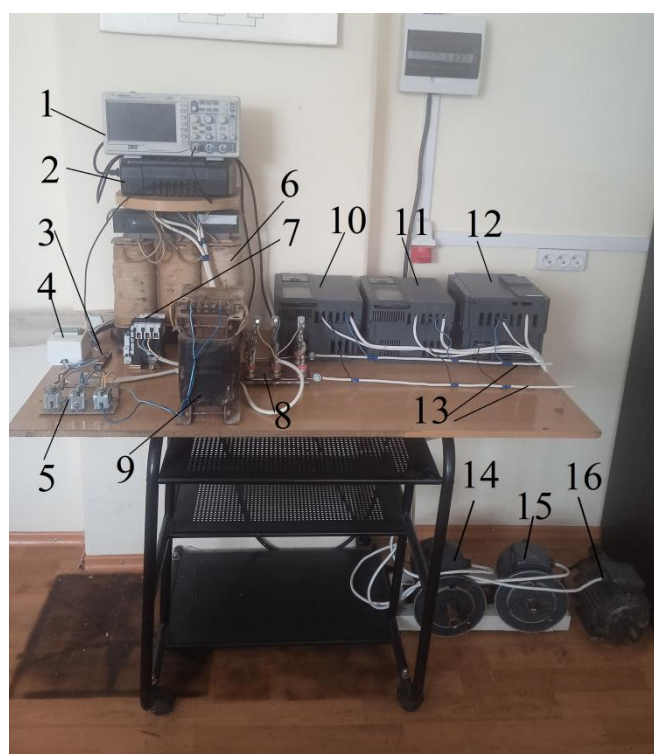


Рисунок 3.27 – Функциональная схема макета ГЧРП с ДР-ОТЗ

В состав макета входят следующие элементы: блок входного контактора (БВК); маломощный источник бесперебойного питания собственных систем управления преобразователей частоты (ИБП ССУ) в состав которого в частности входит маломощная аккумуляторная батарея; токоизмерительный шунт (ТШ); осциллограф (Осц); диодный выпрямитель нагруженный реактором (ДВ); реактор (Р); трансформатор напряжения (ТН); шунтирующий контактор (ШК); общий силовой входной выпрямитель (СВВ); звено постоянного напряжения с напряжением 0,54кВ (ЗПН 0,54 кВ); групповой частотно-

регулируемый привод (ГЧРП); преобразователи частоты (ПЧ1-ПЧ3); собственные системы управления ПЧ (ССУ); собственные входные выпрямители ПЧ (ВВ); собственные ограничители зарядного тока ПЧ (ОЗТ); конденсаторы С-фильтра ЗПН ( $C_{\Phi}$ ) входящие в состав ПЧ; автономные инверторы напряжения преобразователей частоты (АИН); асинхронные двигатели (АД1-АД3).

На рисунке 3.28 представлен физический макет ГЧРП с ДР-ОТЗ.



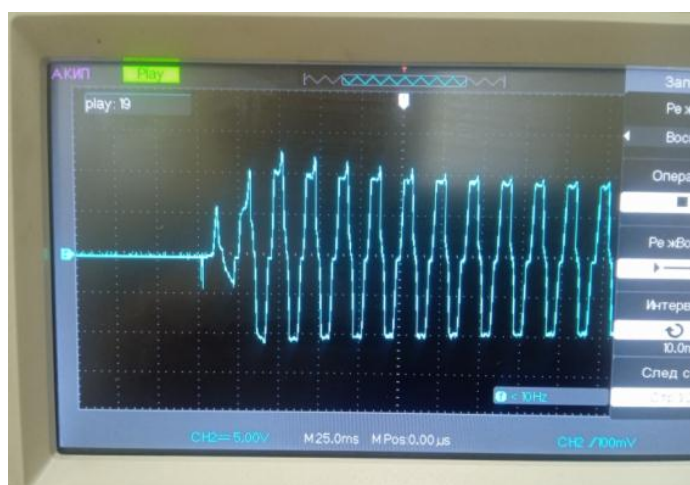
1 – осциллограф, 2 – маломощный источник бесперебойного питания, 3 – токовый шунт, 4 – блок входного контактора, 5 – диодный выпрямитель, 6 – трансформатор напряжения, 7 – шунтирующий контактор, 8 – силовой входной выпрямитель, 9 – реактор, 10 – ПЧ1, 11 – ПЧ2, 12 – ПЧ3, 13 – шины звена постоянного напряжения, 14 – АД1, 15 – АД2, 16 – АД3

Рисунок 3.28 – Физический макет ГЧРП с ДР-ОТЗ

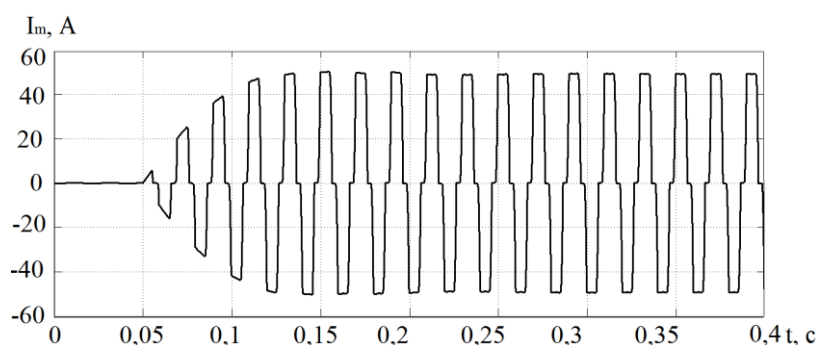
В составе ГЧРП в качестве ПЧ1-ПЧ3 использованы ПЧ промышленного применения Mitsubishi A-800 мощностью 7,5 кВт. В рассматриваемой схеме внутренние АИН ПЧ, подключены к выходу силового входного выпрямителя (СВВ) через клеммы ПЧ “N” и “P+” [72], при этом конденсаторы  $C_{\Phi}$

подключенные на входе каждого из АИН через общее ЗПН соединяются параллельно и образуют суммарную емкость конденсатора С-фильтра, а штатные блоки ОЗТ и ВВ входящие в состав ПЧ1-ПЧ3 не принимают участия при проведении эксперимента. Блок входного контактора (БВК) используется для создания провалов напряжения в питающей сети, где при таком случае питание ССУ ПЧ осуществляется от источника бесперебойного питания (ИБП) малой мощности при наличии искусственно созданных провалов напряжения в питающей сети. В состав ДР-ОТЗ входят ТН, ДВ, Р и ШК, а оценка величины тока на входе СВВ осуществлялась при помощи осциллографа через ТШ.

На рис. 3.29 а и рис. 3.29 б показаны осциллограммы изменения фазного тока  $I_m$  фазы «В» питающей сети в момент подключения ГЧРП к источнику питания напряжением 0,4 кВ, полученные на физическом макете (рис. 3.29 а) и на имитационной модели (рис. 3.29 б) ГЧРП с ДР-ОТЗ.



а)



б)

Рисунок 3.29 – Осциллограмма фазного тока питающей сети, полученные на физическом макете и на имитационной модели ГЧРП с ДР-ОТЗ

Пересчёт полученного результата исследования фазного тока проведённого на физическом макете ГЧРП с ДР-ОТЗ выполнялся по выражению (3.21):

$$I_m = \frac{K_0 \cdot n}{R_{ш.}} \quad (3.21)$$

Где:  $I_m$  – амплитудное значение фазного тока на входе ГЧРП;

$K_0$  – коэффициент отклонения луча осциллографа в канале вертикального отклонения,  $K_0 = 5\text{В/дел}$ ;

$n$  – число делений масштабной сетки осциллографа, где  $n=2$ ;

$R_{ш.}$  – сопротивление измерительного шунта ТШ,  $R_{ш.} = 0,2 \text{ Ом}$ .

Максимальное значение фазного тока  $I_m$  в ходе эксперимента составило  $I_m = 50\text{А}$ , что не превышает суммарного номинального тока ГЧРП макета ГЧРП с ДР-ОТЗ (рис.3.29 а), а на рис. 3.29 б представлена осциллограмма фазного тока, полученная на имитационной модели с идентичными электрическими параметрами, задаваемыми при проведении экспериментов.

Сравнительный анализ полученных осциллограмм, представленных на рисунке 3.29, подтверждает возможность применения ДР-ОТЗ на практике для ограничения зарядного тока конденсаторов С-фильтра ЗПН.

### **3.4 Разработка технического решения по реализации предложенных способов**

Для повышения устойчивости ГЧРП к аварийным режимам в питающей сети предлагается техническое решение на основе запатентованных способов [33, 55] для предотвращения остановок ГЧРП и обеспечения управляемого снижения скорости всех АД с последующим их разгоном до номинальной скорости при провале напряжения в системе электроснабжения. Это специальный способ управления выходной частотой АИН изменяющимся напряжением звена ЗПН с использованием комбинированной системы управления АИН. Суть предложенного технического решения заключается в

плавном снижении скорости АД после регистрации провала напряжения в питающей сети за счёт управления частотой первой гармоники выходного тока АИН напряжением ЗПН. По завершению провала напряжения осуществляется плавный разгон АД до заданной скорости, что обеспечивает сохранение продолжительности работы приводом на интервале времени между началом и завершением провала напряжения в питающей сети.

Функциональная схема ГЧРП с ДР-ОТЗ и повышенной устойчивостью к провалам напряжения в питающей сети представлена на рисунке 3.30.

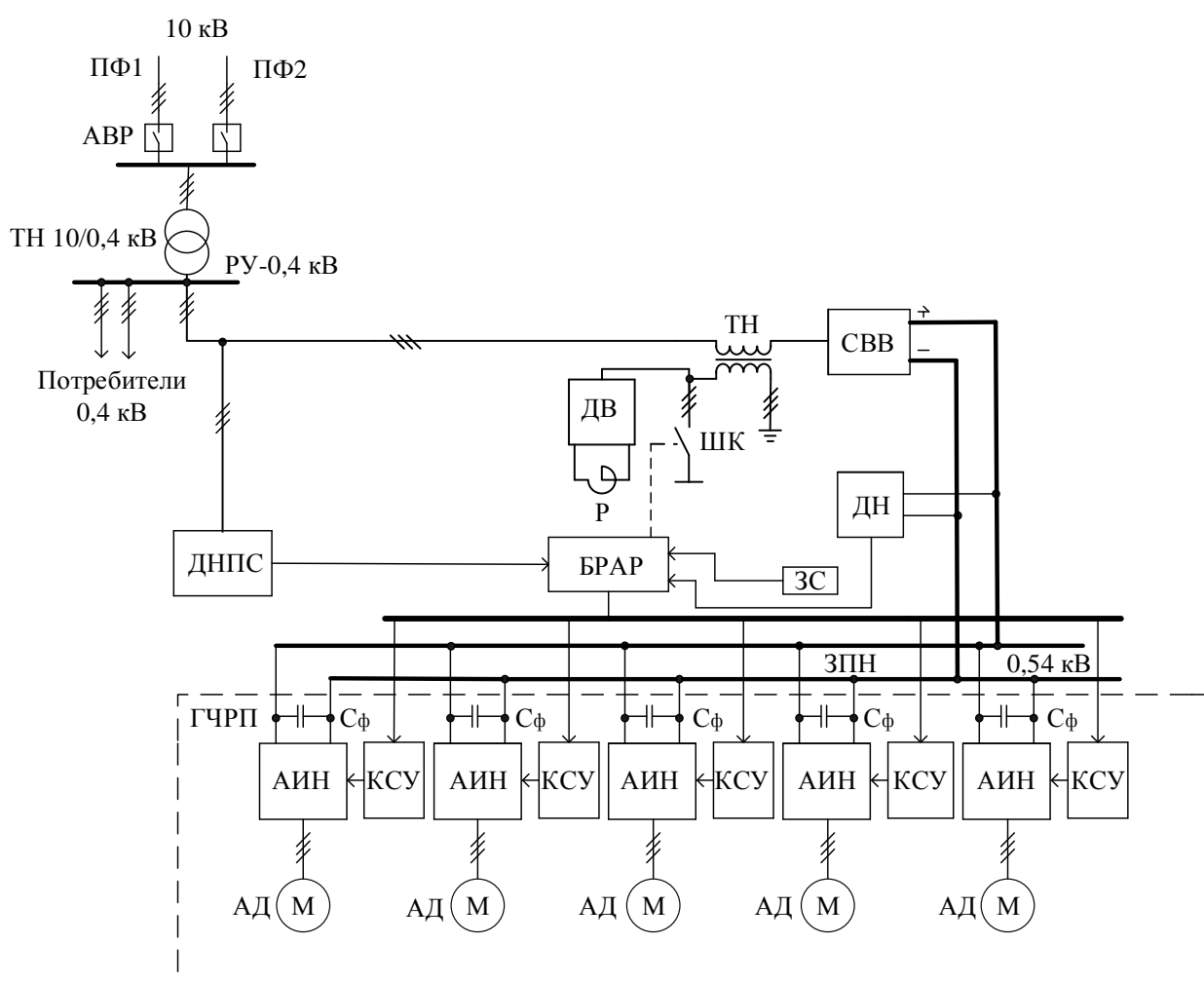


Рисунок 3.30 – Функциональная схема ГЧРП с ДР-ОТЗ

В состав ГЧРП с ДР-ОТЗ входит: питающий основной фидер (ПФ1); питающий резервный фидер (ПФ2); устройство автоматического включения

резерва (АВР); понижающий трансформатор напряжением 10/0,4кВ (ТП); распределительное устройство напряжением 0,4кВ (РУ-0,4кВ); трансформатор напряжения работающий в режиме короткого замыкания (ТН); силовой трёхфазный входной выпрямитель звена постоянного напряжения (СВВ); датчик напряжения питающей сети (ДНПС); диодный выпрямитель цепи реактора (ДВ); реактор (Р); шунтирующий ключ (ШК); блок регистрации аварийных режимов (БРАР); датчик скорости (ЗС); звено постоянного напряжения (ЗПН); групповой частотно-регулируемый привод (ГЧРП); конденсаторы С-фильтра ЗПН ( $C_{\phi}$ ); автономные инверторы напряжения (АИН); индивидуальные комбинированные системы управления (КСУ) АИН; асинхронные двигатели (АД).

Рассмотрим работу ГЧРП с ДР-ОТЗ. После возникновения провала напряжения в питающей сети, глубина которого анализируется ДНПС, КСУ совместно с БРАР обеспечивается управление снижением скорости АД при снижении напряжения в ЗПН, которое анализируется ДН для замедления разряда конденсаторов  $C_{\phi}$ . При восстановлении напряжения в питающей сети вводится в работу ДР-ОТЗ и ток заряда конденсаторов  $C_{\phi}$  протекает через его элементы. В реакторе Р происходит процесс плавного нарастания тока по экспоненциальному закону, что позволяет обеспечить плавное нарастание тока заряда конденсатора С-фильтра и тока в питающей сети. Одновременно с процессом заряда конденсаторов  $C_{\phi}$  активируется режим работы КСУ для разгона АД с пониженной скорости при одновременном выполнении условий определяемых выражениями (3.15) и (3.16).

Для оценки возможности совместного использования ДР-ОТЗ и комбинированных систем управления автономными инверторами напряжения при провалах напряжения в питающей сети проведены исследования на имитационной модели ГЧРП с ДР-ОТЗ в среде MatLab. Имитационная модель ЭТК с ГЧРП с повышенной устойчивостью к провалам напряжения в питающей сети представлена на рисунке 3.31.



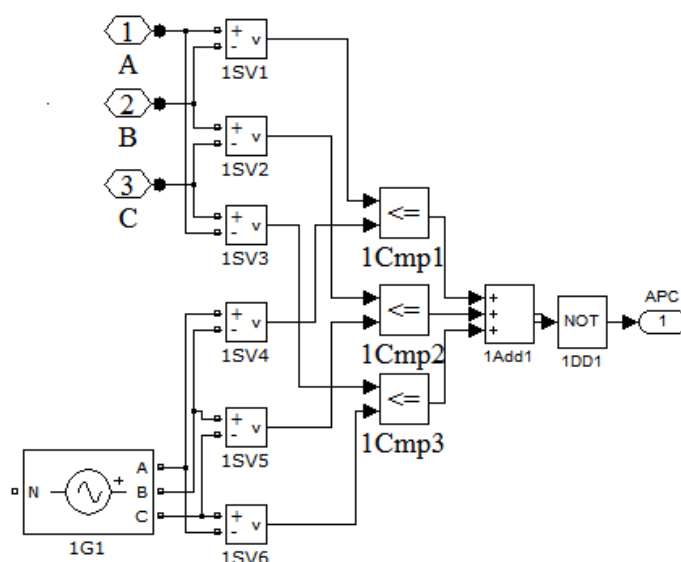


Рисунок 3.32 – Структура блока ДНПС в развёрнутом виде

В состав ДКНПС входят источник опорного напряжения (1G1), датчики напряжения (1SV1-1SV6), компараторы (1Cmp1-1Cmp3), сумматор (1Add1) и инвертер (1DD1). ДКНПС предназначен для сравнения напряжения в питающей сети с напряжением источника опорного напряжения 1G1 и в случае отклонения напряжения за пределы допустимого значения на выходе APC формируется сигнал управления блоками имитационной модели для перевода ГЧРП в режим снижения скорости АД с целью замедления разряда конденсаторов  $C_{\phi}$  подключенных к ЗПН.

На рисунке 3.33 в развёрнутом виде представлена структура блока ШК предназначенного для шунтирования и расшунтирования выпрямителя VD1 и реактора (см рис. 3.31).

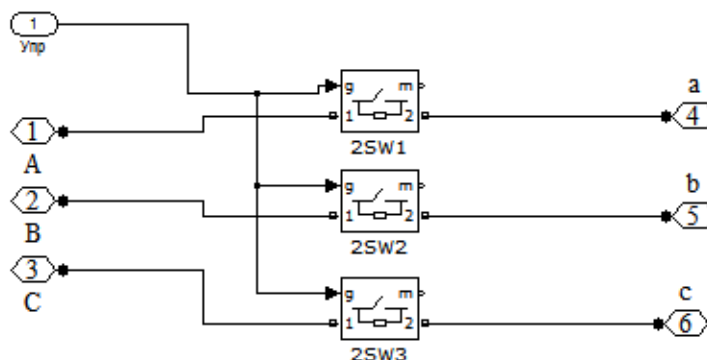


Рисунок 3.33 – Структура блока ШК в развёрнутом виде

На рисунке 3.34 в развёрнутом виде представлена структура блока регистрации аварийных режимов (БРАР) в состав которого входят: ключ (4Sw1); конденсатор (4C1); датчики напряжения (4SV1 и 4SV2); делители напряжения (4F1 и 4F2); логические элементы (4DD1-4DD3).

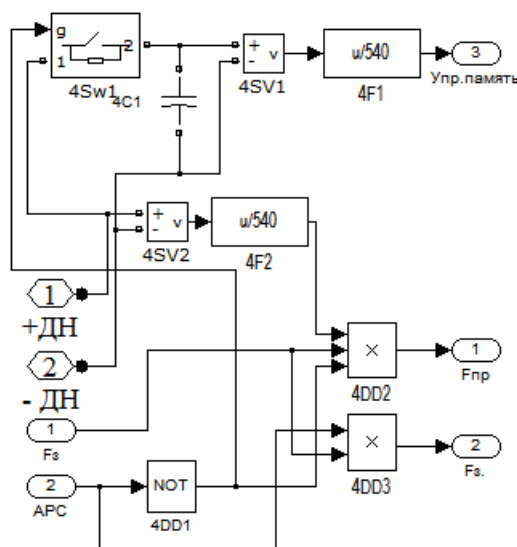


Рисунок 3.34 – Структура блока БРАР в развёрнутом виде

На основе элементов 4SW1, 4C1, 4SV1 и 4F1 создана ячейка памяти для фиксации остаточного напряжения в ЗПН при восстановлении нормального режима в питающей сети для подстройки  $K''$  и  $f_{\text{вых.АИН}}$  согласно выражениям (3.14) и (3.15), а элементы 4SV2 и 4F2 формируют сигнал управления на снижение скорости АД при разряде конденсаторов С-фильтра ЗПН. Логические элементы 4DD1-4DD3 определяют последовательность работы БРАР при возникновении и завершении провала напряжения в питающей сети.

На рисунке 3.35 в развёрнутом виде представлена структура КСУ АИН, в состав которого входят следующие основные элементы: генераторы линейно-изменяющегося напряжения (GLAV1, GLAV2); делители (5FB1 и 5FB2); сумматоры (5Add1-5Add6); компараторы (5Cmp1, 5Cmp2); специальные функциональные блоки (5FB3-5FB7); логические элементы (5DD1-5DD17). Выше перечисленные элементы определяют логику работы КСУ, принцип действия которой описан в разделе 3.1.

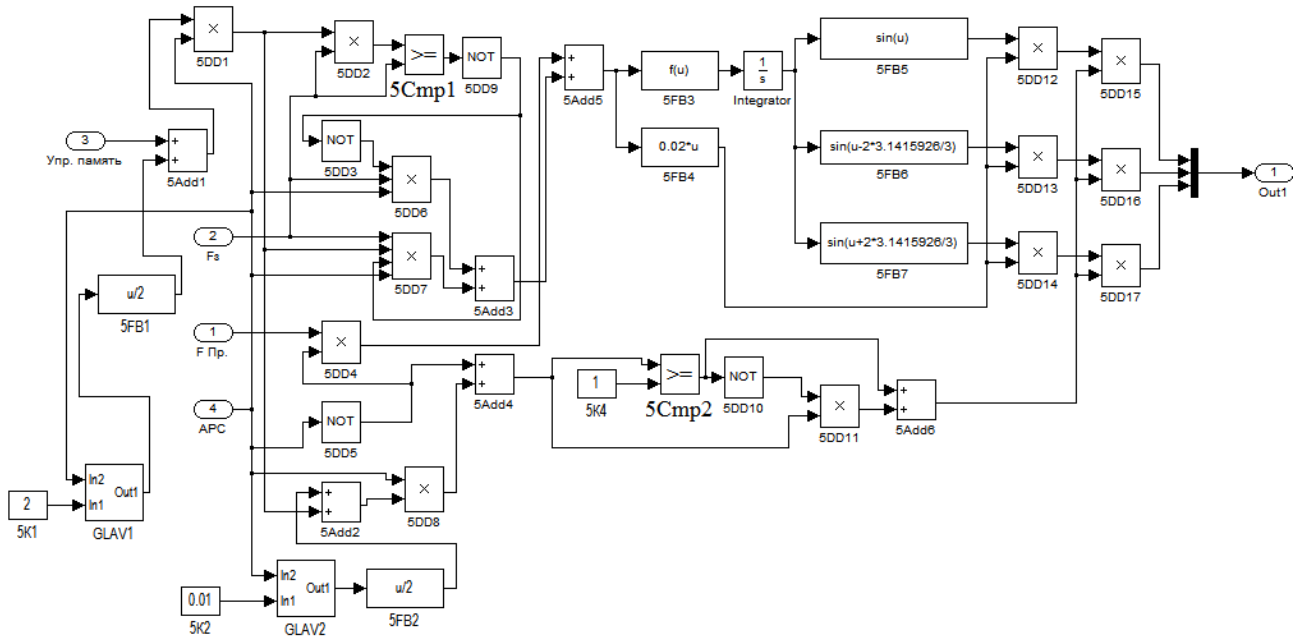


Рисунок 3.34 – Структура блока КСУ АИН в развёрнутом виде

На рисунке 3.35 в развёрнутом виде показана структура датчика напряжения ЗПН (ДН ЗПН), который состоит из датчика напряжения (3SV1), компаратора (3Cmp1), константы уставки ЗПН (3K1), логического элемента (3DD1).

ДН ЗПН предназначен для управления блоком ШК при разных режимах работы питающей сети.

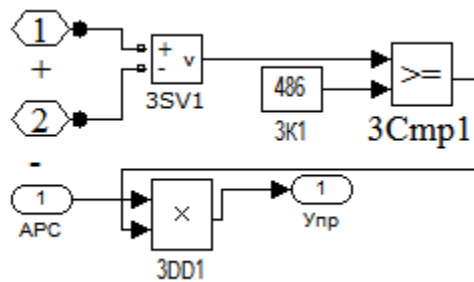


Рисунок 3.35 – Структура блока ДН ЗПН в развёрнутом виде

На рисунке 3.36 в развёрнутом виде представлена структура блока группового частотно-регулируемого привода (ГЧРП).

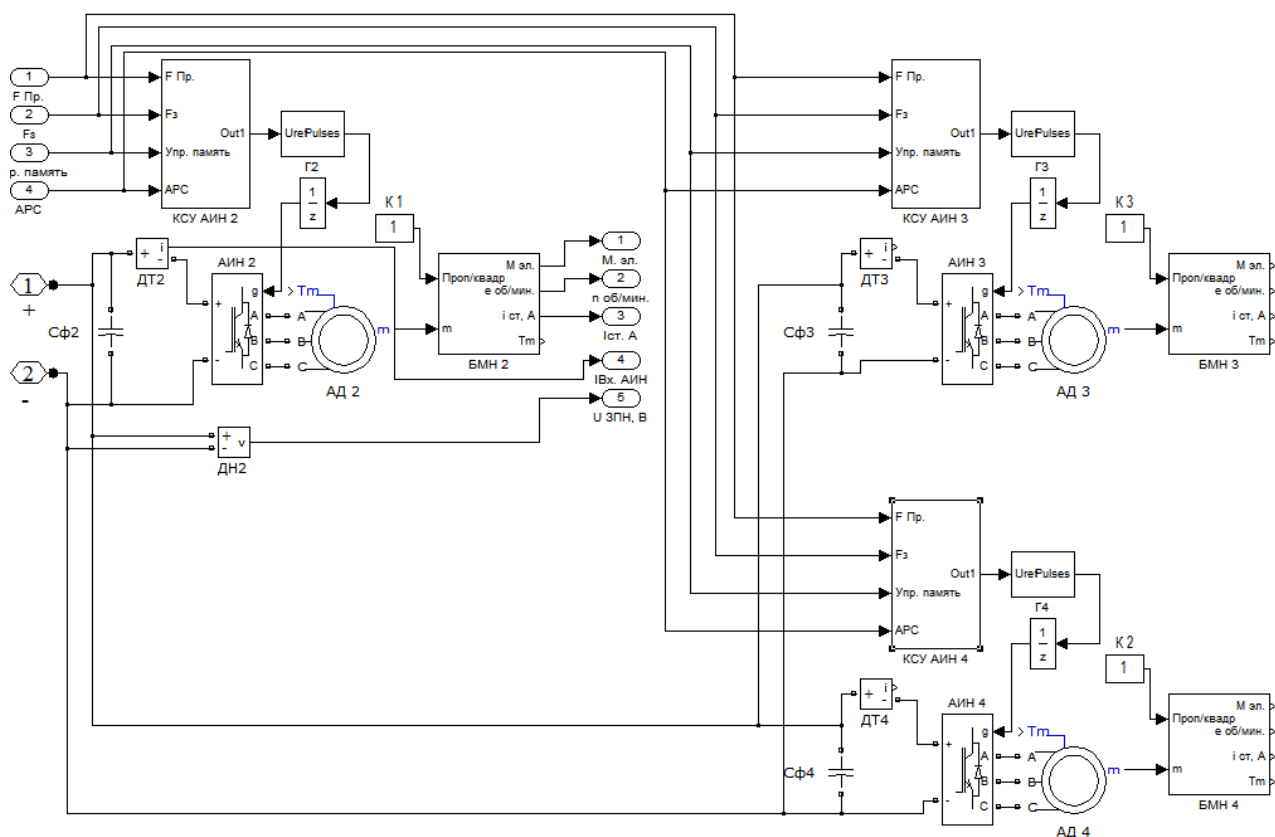
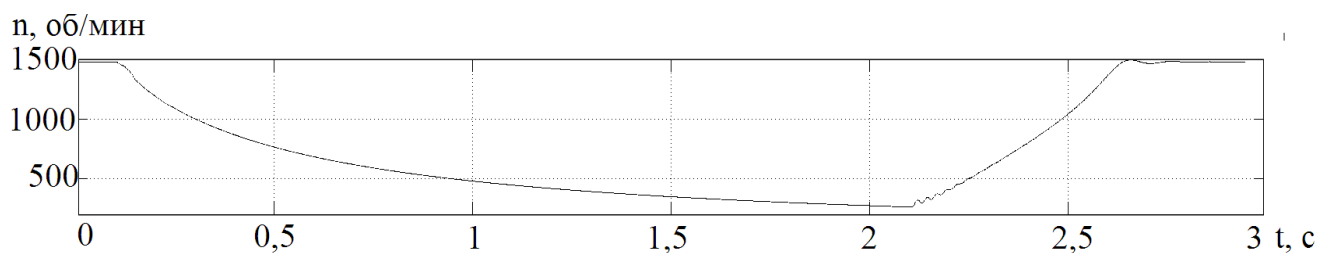


Рисунок 3.36 – Структура блока ГЧРП в развёрнутом виде

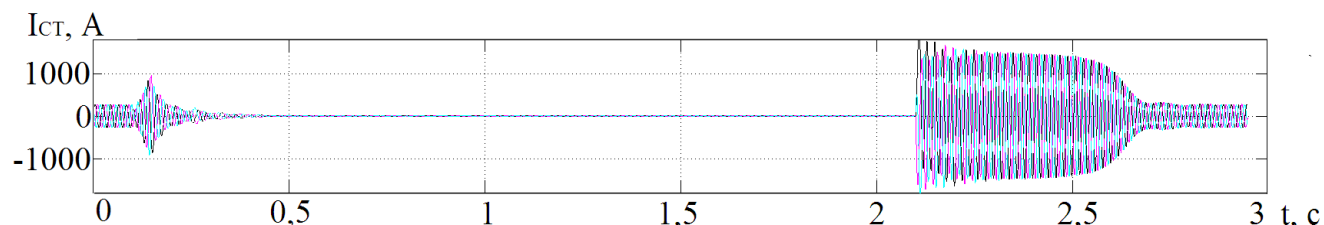
В состав блока ГЧРП входят следующие элементы: комбинированные системы управления (КСУ2 - КСУ4) автономными инверторами напряжения; генераторы ШИМ (Г2-Г4); автономные инверторы напряжения (АИН2-АИН4); асинхронные двигатели (АД2-АД4); конденсаторы С-фильтров ( $C_{\phi 2}$ - $C_{\phi 4}$ ), блоки механической нагрузки (БМН2-БМН4).

Блок механической нагрузки БМН в развёрнутом виде представлен на рисунке 3.37. В состав БМН входят: функциональный блок для преобразования единиц измерения скорости АД из рад/с в об/мин (6FB1); блок имитирования вентиляторной механической нагрузки (6FB2); блок имитирования конвейерной механической нагрузки (6FB3); сумматор (6Add1); логические элементы (6DD1-6DD3). Логические элементы 6DD1-6DD3 совместно с 6Add1 образуют схему переключения вида нагрузки по выбору, осуществляемому подачей управляющего сигнала на вход (Проп/квадр).

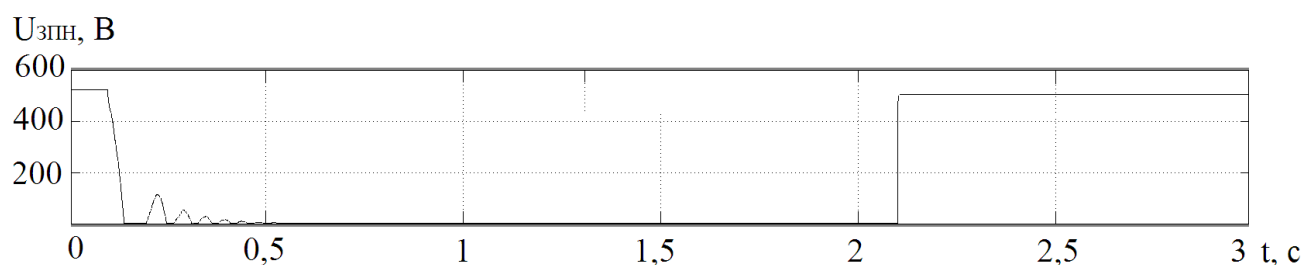




а)



б)



в)

Рисунок 3.38 – Осциллограммы, демонстрирующие работу ГЧРП с существующей СУ АИН: изменение скорости АД  $n$  (а); изменение тока статора АД  $I_{ст}$  (б); изменение напряжения на конденсаторе С- фильтра в ЗПН (в)

Значение тока статора АД  $I_{ст}$  ( см. рис. 3.38 в) при возникновении провала напряжения в питающей сети в момент времени  $t = 0,2с$  повышается с  $I_{ст. АД.Ном} = 280 А$  до  $I_{ст.АД.Пров} = 1000 А$ , что превышает ток статора АД на 257%, а при восстановлении напряжения в питающей сети и ЗПН в момент времени  $t = 2,2с$  (см. рис.3.38 б) ток статора  $I_{ст.Восст}$  при управлении АИН штатной СУ составил  $I_{ст.Восст} = 1980 А$ , что в 7,07 раз больше его номинального значения. Время нахождения в работе ГЧРП по штатной схеме при наличии провала напряжения в питающей сети составляет  $T_{Пр} = 0,06с$ ,

которое соответствует уравнению энергетического баланса согласно выражению (3.3).

Как упоминалось выше на рисунке 3.39 показаны осциллограммы демонстрирующие работу ГЧРП с предложенной КСУ при провале напряжения в питающей сети.

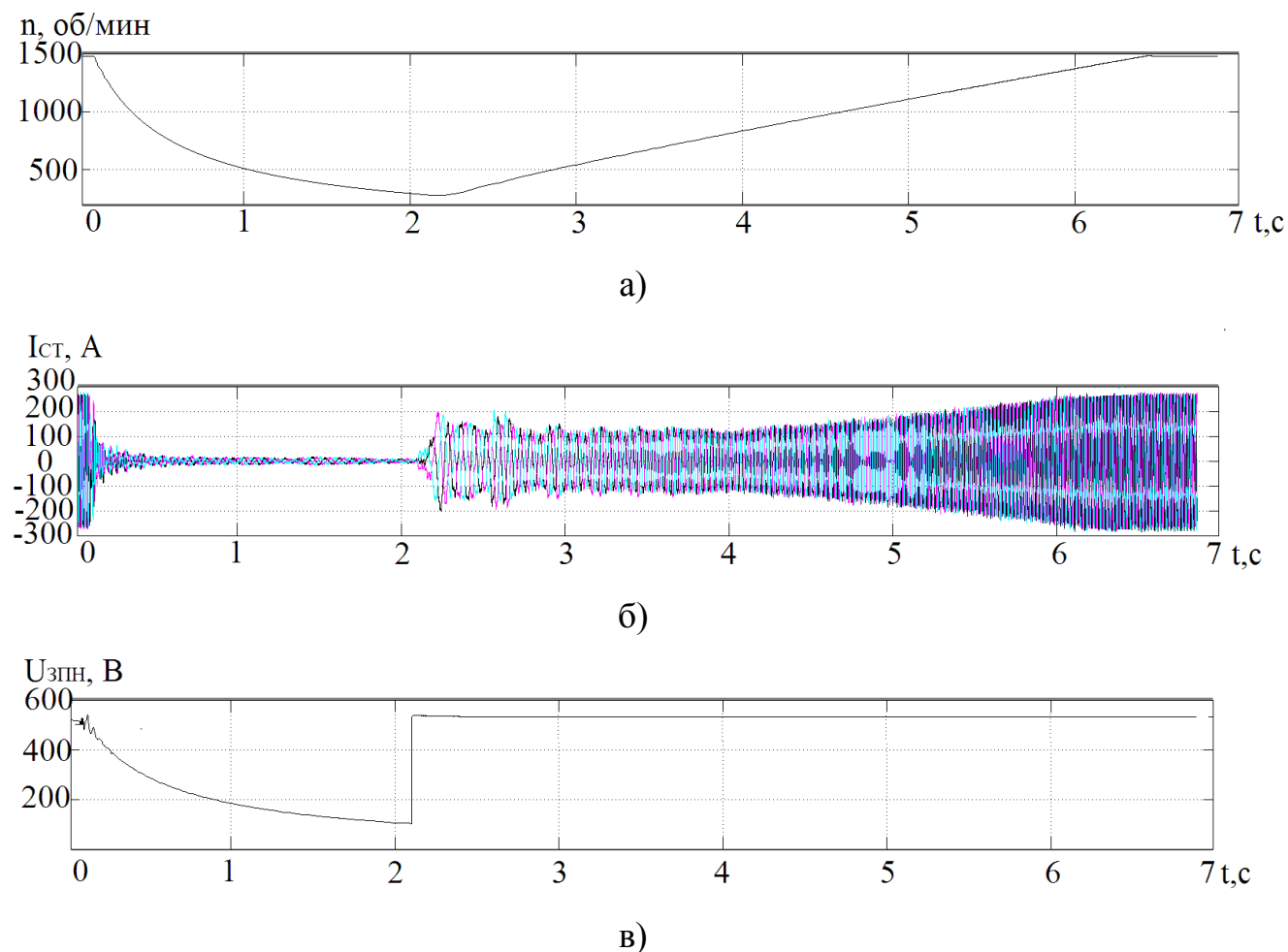
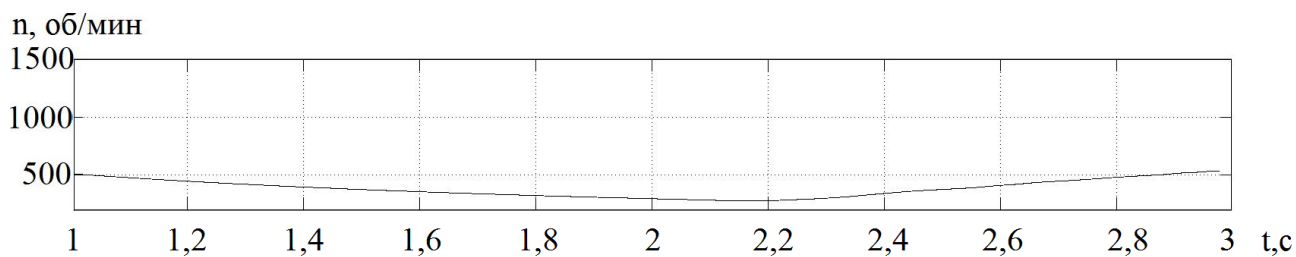


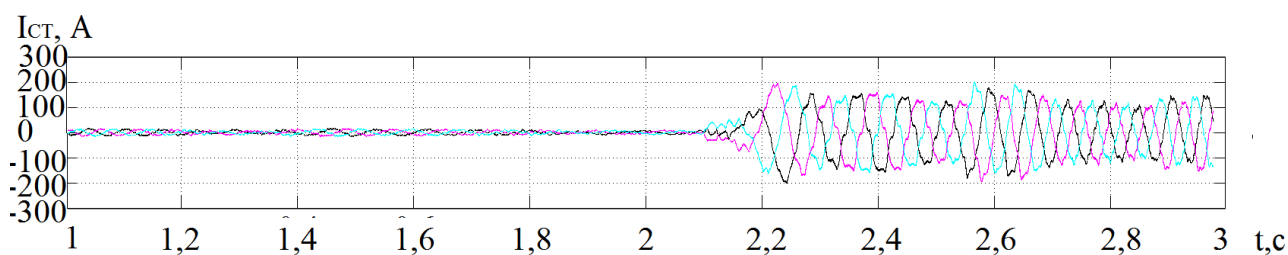
Рисунок 3.39 – Осциллограммы, демонстрирующие работу ГЧРП с КСУ при провале напряжения в питающей сети: изменение скорости АД  $n$  (а); изменение тока статора АД  $I_{ст}$  (б); изменение напряжения на конденсаторе С- фильтра в ЗПН (в)

На рисунке 3.40 показаны фрагменты осциллограмм рис. 3.39 при восстановлении напряжения в ЗПН. С момента времени  $t = 0,2$  с при возникновении провала напряжения в питающей сети осуществляется управляемое снижение скорости АД (см. рис. 3.40 а), где при снижении

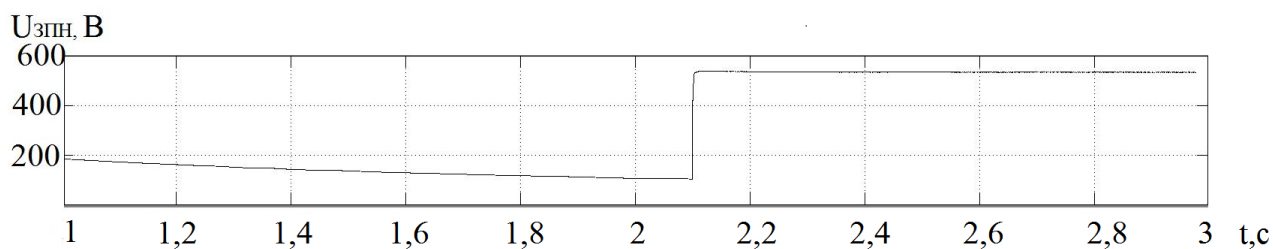
напряжения в ЗПН управление выходной частотой АИН осуществляется изменяющимся в ЗПН напряжением.



а)



б)



в)

Рисунок 3.40 – Осциллограммы при восстановлении напряжения в ЗПН: изменение тока статора АД  $I_{ст}$  (а); изменение скорости АД  $n$  (б); изменение напряжения  $U_{зпн}$  на конденсаторе С- фильтра (в)

Остаточное напряжение в ЗПН при восстановлении напряжения в питающей сети составило  $0,2U_{DC\text{ ном}}$ . Как видно из рис 3.40в в момент времени  $t = 2,2\text{с}$  напряжение в ЗПН восстанавливается и составляет  $U_{DC\text{ ном}}$  и на интервале времени  $t = 2,2\text{с}$  до  $t = 6,4\text{с}$  осуществляется разгон АД до номинальной скорости, при этом ток статора в режиме разгона АД  $I_{ст. Ад.Разг}$  с пониженной скорости соответствует условию  $I_{ст. Ад.Ном} > I_{ст. Ад.Разг}$ . Интервал времени в течение которого сохраняется продолжительность управления

$T_{П.Упр.Вент}$  приводом после возникновения провала напряжения в питающей сети согласно осциллограмм (см. рис. 3.39 и рис. 3.40), составляет  $T_{П.Упр.Вент} = 2с$ , где при  $T_{П.Упр.Вент} = 2с$  обеспечивается синхронизация выходного тока АИН и тока статора АД.

После восстановления напряжения в питающей сети на интервале времени  $t = 2,1с$  до  $t = 2,4с$  (см. рис. 3.40 б) возникают незначительные искажения тока статора АД, обусловленные подстройкой коэффициента заполнения ШИМ  $K$  в соответствии с выражениями (3.15) и (3.16). Результаты имитационного моделирования показали, что синхронизация выходного тока АИН и тока статора АД не нарушается, а ток статора АД в режиме разгона после восстановления напряжения в питающей сети не превышает номинального значения на всём интервале преодоления провала напряжения в питающей сети.

На рисунке 3.41 показаны осциллограммы, которые иллюстрируют работу ГЧРП с пропорциональной механической нагрузкой АД при провале напряжения в питающей сети. При возникновении провала напряжения в питающей сети в момент времени  $t = 0,1с$  происходит снижение скорости АД, тока статора АД и напряжения в ЗПН, (см. рис. 3.41).

Остаточное напряжение в ЗПН на момент восстановления напряжения в питающей сети составляет  $0,1U_{DC\text{ ном}}$  (см. рис. 3.41в), где в момент времени  $t = 1,1с$  напряжение в питающей сети восстанавливается и начиная с интервала времени  $t = 1,1с$  до  $t = 5,7с$  происходит разгон АД до номинальной скорости (см. рис. 3.41б). Как видно из рис. 3.41а ток статора в режиме разгона АД  $I_{Ст. АД.Разг.}$  на интервале времени  $t=1,4-1,5с$  превышает его номинальное значение  $I_{Ст. АД.Ном}$  на 30%, что является допустимым значением перегрузочной способности для существующих транзисторов АИН [71, 72, 73].

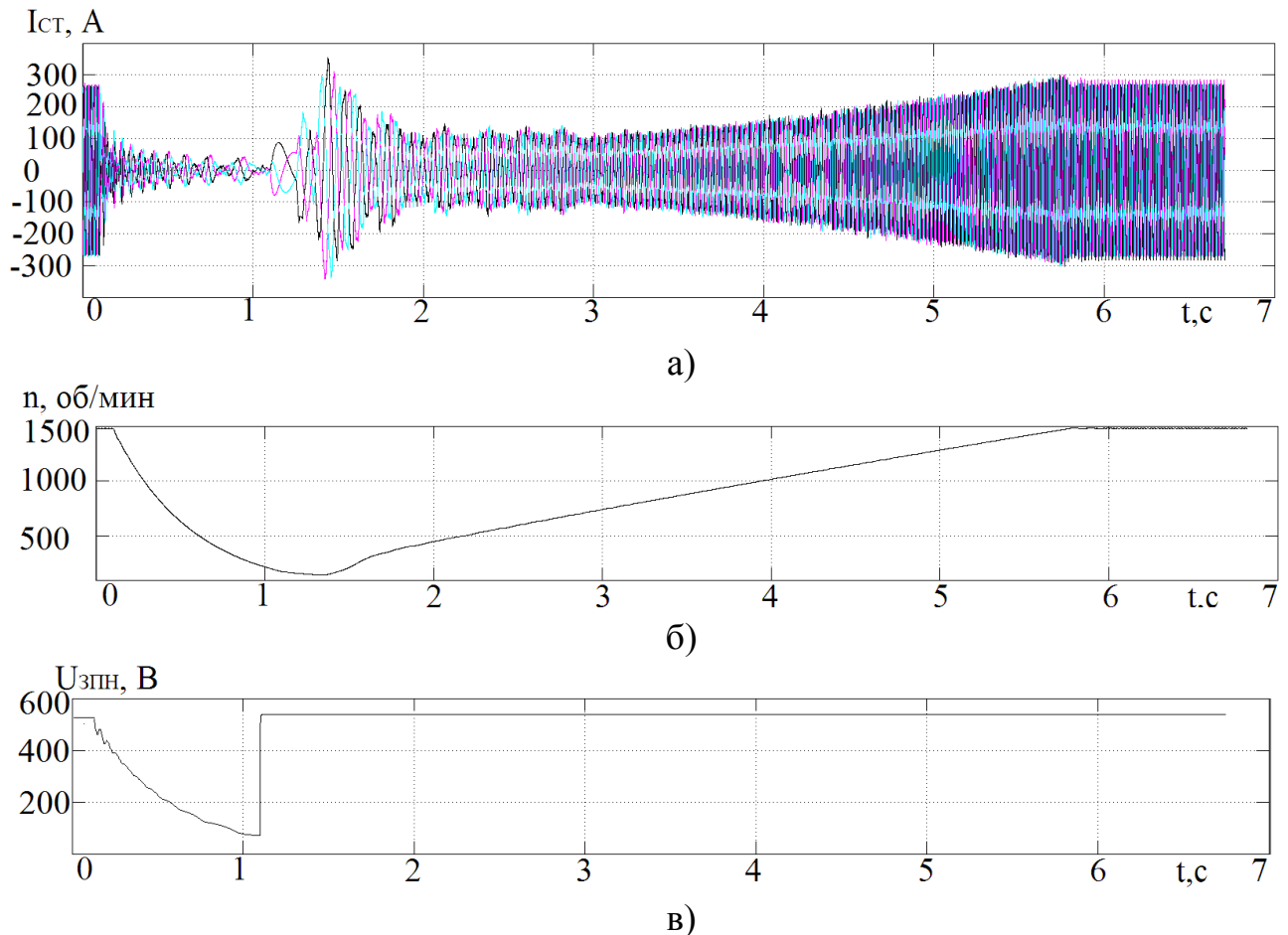


Рисунок 3.41 – Осциллограммы при провале и восстановлении напряжения в ЗПН с пропорциональной механической нагрузкой АД: изменение тока статора АД  $I_{СТ}$  (а); изменение скорости АД  $n$  (б); изменение напряжения  $U_{ЗПН}$  на конденсаторе С- фильтра (в)

Интервал времени, в течение которого сохраняется продолжительность управления приводом после регистрации провала напряжения в питающей сети, составляет  $T_{П.упр.Пр} = 1$  с (см. рис. 3.41а), где на интервале  $T_{П.упр.Пр} = 1$  с обеспечивается синхронизация выходного тока АИН и тока статора АД с пропорциональной механической нагрузкой. Результаты имитационного моделирования показали эффективность использования предлагаемого способа управления ГЧРП при пропорциональной механической нагрузке АД в случае возникновения глубокого провала напряжения в питающей сети, приводящего к снижению напряжения в ЗПН до  $0,1U_{DC\text{ ном}}$ .

Предложенная КСУ АИН совместно с применением ДР-ОТЗ позволяет обеспечить работу ГЧРП без его остановки при провалах напряжения питающей сети длительностью  $\Delta t_{\text{пр}}$  в соответствии с условием  $0,04 \leq \Delta t_{\text{пр}} \leq 2\text{с}$ , где остаточное напряжение  $U_{\text{ост.}}$  равно  $U_{\text{ост.}} = 0,1U_{DC \text{ ном}}$  и без возникновения бросков тока в силовых модулях АИН за счёт применения разработанной КСУ АИН совместно ДР-ОЗТ, что позволяет устранить электродинамические удары в системе электроснабжения, в частности в ГЧРП при подключении ЗПН к питающей сети. Численными экспериментами подтверждено, что время ожидания восстановления напряжения в питающей сети  $T_{\text{Восст.Вент}}$  увеличивается в  $N_{n \text{ Вент}} = 33$  раза согласно с выражением (3.22):

$$N_{n \text{ Вент}} = T_{\text{П.Упр.Вент}}/T_{\text{Пр}} \quad (3.22)$$

С пропорциональной механической нагрузкой АД ( $N_{n \text{ Пр}}$ ) время ожидания восстановления напряжения в питающей сети  $T_{\text{Восст.Пр}}$  увеличивается в  $N_{n \text{ Пр.}} = 16$  раз согласно с выражением (3.23):

$$N_{n \text{ Пр}} = T_{\text{П.Упр.Пр}}/T_{\text{Пр}} \quad (3.23)$$

### Выводы по третьей главе

1. Разработана КСУ АИН, позволяющая снизить броски входного тока АИН до допустимого значения и предотвратить остановку ГЧРП при возникновении провалов напряжения в питающей сети, что отражено в работе [58].

2. Разработан способ управления ГЧРП, направленный на увеличение времени ожидания напряжения питающей сети, который подтверждается патентом на изобретение [33].

3. Разработан способ ограничения зарядного тока конденсаторов  $C_{\text{ф}}$  ЗПН ГЧРП до номинального значения, позволяющий устранить броски тока в питающей сети и ВВ при подключении ГЧРП к питающей сети в нормальных и

аварийных режимах работы системы электроснабжения, который также подтверждается патентом на изобретение [55].

4. Разработано техническое решение на основе комбинированной системы управления и ДР-ОТЗ, позволяющее увеличить продолжительность работы ГЧРП при возникновении провалов напряжения в питающей сети.

5. Разработаны имитационные модели ЭТК с ГЧРП и ДР-ОТЗ в среде MatLab для проведения оценки эффективности функционирования предложенного технического решения и способов его управления.

6. На разработанной имитационной модели ЭТК с ГЧРП и ДР-ОТЗ проведён ряд численных экспериментов, которые подтверждают возможность увеличения продолжительности управления приводом и ограничения бросков входного тока в АИН и ВВ до допустимого значения при аварийном режиме питающей сети.

## Заключение

Проведенное диссертационное исследование является научно-квалификационной работой, в которой содержатся новые, научно обоснованные принципы построения ГЧРП, имеющие важное научное и прокладное значение для частотно-регулируемого электропривода. Основной целью работы является повышение эффективности функционирования ГЧРП при нормальных и аварийных режимах работы питающей сети за счет разработки специальных технических решений и новых способов их управления.

Отметим следующие наиболее важные результаты, полученные в ходе работы над диссертацией.

1. Предложен способ управления АИН для замедления разряда конденсатора С-фильтра ЗПН при возникновении глубоких провалов напряжения в системе электроснабжения позволяющий увеличить для ГЧРП время ожидания напряжения в сети  $T_{\text{Восст.Вент}}$  в 33 раза с вентиляторной и  $T_{\text{Восст.Проп}}$  в 16 раз с пропорциональной механической нагрузкой АД по сравнению с существующими способами управления.

2. Разработан принцип построения комбинированной системы управления АИН ГЧРП для устранения перегрузки АИН, позволяющий ограничить входной ток АИН  $I_{\text{Вх.АИН}}$  до значения  $I_{\text{Ном.Вх.АИН}}$  при резком восстановлении напряжения в ЗПН до номинального значения.

3. Предложен способ ограничения зарядного тока конденсаторов С-фильтра ЗПН  $I_{\text{З.Сф}}$  до значения  $I_{\text{З.Сф}} = I_{\text{Ном.ГЧРП}}$  при подключении ГЧРП к питающей сети и резком восстановлении напряжения после его провала, снижающий ударные динамические воздействия на электрооборудование ГЧРП и питающей сети.

4. Численными экспериментами на имитационной модели ЭТК с ГЧРП установлено, что при возникновении провала напряжения в питающей сети

глубиной 100% на интервале провала напряжения  $t_{\text{пров}} = 2\text{с}$ . сохраняется продолжительность управляемой работы ЭТК с ГЧРП с вентиляторной и  $t_{\text{пров}} = 1\text{с}$ . с пропорциональной механической нагрузкой АД.

5. Экспериментами в среде MatLab подтверждено, что применение предложенного принципа построения ЭТК с ГЧРП и способов его управления обеспечивают управляемую остановку АД до скорости  $0,2n_{\text{АД Ном}}$  с вентиляторной, а также до скорости  $0,1n_{\text{АД Ном}}$  с пропорциональной механической нагрузкой АД при последующем его разгоне до номинальной скорости  $n_{\text{АД Ном}}$  после завершения провала напряжения при одновременном ограничении тока статора АД до значения  $I_{\text{Ст. АД.Ном}} > I_{\text{Ст. АД.Разг}}$  при вентиляторной и  $1,3I_{\text{Ст. АД.Ном}} = I_{\text{Ст. АД.Разг}}$  при пропорциональной механической нагрузке АД.

6. Полученные в ходе исследования результаты могут найти практическое применение для повышения надёжности ЧРП и ГЧРП, допускающих по технологическим условиям кратковременное снижение скорости привода без его полной остановки, эксплуатируемых в нестабильных питающих сетях, а также ограничения зарядных токов и перенапряжения в ЗПН при проектировании внутризаводских систем электроснабжения на постоянном токе.

7. Дальнейшие исследования могут развиваться в следующих направлениях:

- совершенствование принципов построения и алгоритмов управления предложенных способов совместно с векторными системами управления ЧРП;
- построение объединённой системы ДР-ОЗТ с активным выпрямителем;
- создание компьютерной модели для исследования динамических процессов в транзисторных ключах при изменении напряжения на входе АИН;
- разработка физического макета двухзвенного ПЧ с возможностью управления выходной частотой АИН изменяющимся напряжением на его входе.

**Список сокращений и условных обозначения**

- АВР – автоматическое включение резерва
- АД – асинхронные двигатели
- АИН – автономный инвертор напряжения
- АКБ – аккумуляторная батарея
- АП – анализатор провалов
- БВК – блок входного контактора
- БМ – блок масштабирования
- БМН – блок механической нагрузки
- БРАР – блок регистрации аварийного режима
- ДВ – диодный выпрямитель
- ДН – датчик напряжения
- ДНПС – датчик напряжения питающей сети
- ВВ – входной выпрямитель
- ВЛ – воздушная линия
- ВН – высокое напряжение
- ГЛИН – генератор линейно-изменяющегося напряжения
- ГПН – генератор пилообразного напряжения
- ГЧРП – групповой частотно-регулируемый привод
- ДР-ОЗТ – диодно-реакторный ограничитель зарядного тока.
- ЗМН – защита минимального напряжения
- ЗПН – звено постоянного напряжения
- КЗ – короткое замыкание
- КСУ – комбинированная система управления
- НН – низкое напряжение
- ОГ – опорный генератор
- ОСУ – общая система управления
- ОТЗ – ограничитель тока заряда
- ПЧ – преобразователь частоты

РС – распределительная сеть

СВВ – силовой входной выпрямитель

ССУ – собственная система управления

СТ – силовой трансформатор

СУ – система управления

ТП – трансформатор понижающий

ТН – трансформатор напряжения

ТШ – токовый шунт

ЧРП – частотно-регулируемый привод

ШК – шунтирующий ключ

ШИМ – широтно-импульсная модуляция

ЭТК – электротехнический комплекс

**Список использованных источников**

1. Активный выпрямитель напряжения Altivar AFE. Руководство по выбору АВН мощностью 120 - 860 кВт Schneider Electric – 2010.

2. Артамонов В. Ю. Выбор перспективной топологии построения двухзвенного преобразователя частоты на базе управляемого выпрямителя и автономного инвертора напряжения / В. Ю. Артамонов, Н. В. Дубов // Материалы XXIII научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва. Материалы конференции. В 3-х частях. Составитель А. В. Столяров. Ответственный за выпуск П. В. Сенин. – 2019. – С. 67–71.

3. Асинхронные электроприводы двойного питания на базе преобразователей частоты "ЭРАТОН-ФР" / В. А. Отченаш, В. В. Панкратов, В. М. Берестов, В. А. Клан, Д. А. Котин // Труды IV Всероссийской научно-практической конф. "Автоматизированный электропривод и промышленная электроника" АЭПЭ–2010 – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ. – 2010. – С. 106 - 113.

4. Баринаева Е. А. Работа двенадцатипульсных выпрямителей с учётом несимметрии и несинусоидальности питающих напряжений / Е. А. Баринаева, Д. М. Стрельникова, М. Е. Вильбергер, А. В. Мятаж // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 2. – С. 264-267.

5. Берестов В.М. Инженерная методика расчёта синусных фильтров для активных выпрямителей и инверторов напряжения с ШИМ / В.М. Берестов, В.В. Вдовин, С.С. Доманов, В.В. Панкратов, Г.Г. Ситников // Электроприводы переменного тока: Труды международной 15-й конференции. Екатеринбург: УрФУ. –2012. – С. 167-170.

6. Боярская Н. П. Широкополосные силовые фильтры гармоник / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Е. С. Шевченко, Д. Э. Егоров // Ползуновский вестник – 2013 – № 4 – С.34 – 38.

7. Браславский И. Я. Математическая модель силовой части DC-DC преобразователя в составе частотно-регулируемого электропривода с суперконденсаторами / И. Я. Браславский, Ю. В. Плотников, З. Ш. Ишматов, Ф. А. Полунин, А. И. Суслов // ЭПТТ 2015. – Екатеринбург, 05-09 октября 2015 г. – С.125-130.

8. Браславский И. Я. Математическое моделирование частотно-регулируемого электропривода с емкостными накопителями энергии. / И. Я. Браславский, В. Н. Поляков, З. Ш. Ишматов, Ю. В. Плотников, А. В. Костылев, Г. З. Эрман // Труды международной пятнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». – Екатеринбург. – 2012.

9. Браславский И. Я. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод с емкостным накопителем энергии. / И. Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, А. В. Костылев, Ю. В. Плотников, В. Н. Поляков, Г. З. Эрман // Электротехника. – 2012 № 9. – 30 - 35 с.

10. Браславский И. Я. Оптимизация пусковых процессов в асинхронном частотном электроприводе со скалярной САР / И. Я. Браславский, А. В. Костылев, А. Косенко // Вісн. Кременчуцького держ. університету. – Кременчук, КДПУ, 2010. – В.№3(62). – Ч.2. – С. 11-14.

11. Волков И. В. Новая концепция построения силовых цепей частотно-регулируемых асинхронных электроприводов / И. В. Волков // Технічна електродинаміка. 1999. – №4. – С. 21-26.

12. Волков А. В. Управление при провале сетевого напряжения асинхронным электроприводом с автономным инвертором тока / А.В. Волков, В.А. Волков // Электротехника. – 2008. – №3. – С. 2-10.

13. Воробьев А. А. Групповое питание электропривода с общин накопителем энергии как новое направление энергосбережения / А. А. Воробьев, А. А. Колб // Проблемы автоматизированного электропривода Вестн.

нац. техн. Ун-та «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – Вип.10.М– С. 224-228.

14. Вислогузов Д. П. Работа частотно-регулируемого электропривода от резервного источника питания / Д. П. Вислогузов // Главный энергетик. –2019 №8 – 81 с.

15. Гельвер Ф. А. Выбор емкости конденсатора звена постоянного тока двухзвенного преобразователя частоты с инвертором напряжения / Ф. А. Гельвер // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы II междунар. науч. конф. г. Санкт – Петербург, апрель 2014 г.

16. ГОСТ 33073-2014. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии.

17. Гост 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в сетях общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 2013. – 16. с.

18. Гуляев Е. Н. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей с сетью и нагрузкой: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» / Е. Н. Гуляев // – Уфа, –2010. – 19 с.

19. Гуляев Е. Н. Высшие гармоники в сетях с нелинейной нагрузкой и методы их уменьшения / Е. Н. Гуляев // III Слет молодых энергетиков Республики Башкортостан: Сборник докладов молодежной научно – технической конференции. – Уфа: Издательство «Скиф», 2008 – 624 с. – С. 26-32.

20. Гуревич В. И. Автоматическое повторное включение промышленных электроустановок / В. И. Гуревич // Промышленная энергетика. – 2005. – №8. – С. 8-10.

21. Добрусин Л. А. Оптимальные фильтрокомпенсирующие устройства для силовых полупроводниковых преобразователей (Ч.1) / Л. А. Добрусин // Современная электроника. – 2005. – №6.– С. 56-59.

22. Довгун Е. П. Широкополосные силовые фильтры для систем электроснабжения с многофазными преобразователями. / Е. П. Довгун, Д. Э. Егоров, Н. Р. Прозоров, В. В. Новиков // Электротехника. – 2020. – № 5. – С. 47-51.

23. Ершов М. С. Устойчивость многомашинных промышленных электротехнических комплексов и систем / М. С. Ершов, А. В. Егоров, А. А. Трифонов // Труды 7-й международной конференции по автоматизированному электроприводу. – Саранск: Изд-во Мордовского университета, 2014. – Т.1. – С. 268-274.

24. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: Учеб. пособие.- Изд.2, испр. / Г.С. Зиновьев // Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.

25. Зиновьев Г. С. Электромагнитная совместимость устройств силовой электроники. Трехфазные выпрямители с улучшенной ЭМС : учебно-методическое пособие / Зиновьев Г. С., Александров И. А., Заводина С. В., Кочнев Д. В., Курочкин Д. А., Лопаткин Н. Н., Севастьянов Н. В. // Новосибирск, НГТУ. – 2019. – 70 с. :

26. Кабашов В. Ю. Исследование причин аварийных отключений сельских ВЛ 6-10 кВ / В. Ю. Кабашов // Международный научный журнал «Инновационная наука». – №04 – 3/2017 – С. 70 - 73.

27. Кабышев А. В. Электроснабжение объектов: Учеб. пособие. Ч.1 / А. В. Кабышев // Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2007. – 185 с.

28. Климаш В. С. Основы преобразовательной техники / В. С. Климаш // Комсомольск-на-Амуре – 2006. – 76 с.

29. Климаш В. С. Электропривод с общим выпрямителем и индивидуальными инверторами для асинхронных электродвигателей

деревообрабатывающей линии Амурского лесокомбината / В. С. Климаш, А. В. Петухов // Омский научный вестник.– 2018.– №3 (159).–С. 22-26.

30. Климаш В. С. Электротехнический деревообрабатывающий комплекс с улучшенной энергоэффективностью и производительностью / В. С. Климаш, А. В. Петухов // Электротехнические системы и комплексы.– 2021.– № 4 (53).– С. 19-27.

31. Климаш В. С. Исследование устойчивости электротехнического комплекса деревообрабатывающей линии к провалам напряжения в сети электроснабжения / В. С. Климаш, А. В. Петухов // Известия ТулГУ.– 2022.– № 3.– С. 184-190.

32. Климаш В. С. Выпрямитель с активным фильтром: пат. 2713493 С1 Рос. Федерация, H02J 5/00/ Климаш В. С., Соколовский М. А., Петухов А. В. Заявитель и патентообладатель Климаш В. С., Соколовский М. А., №2019127420; заявл. 25.03.2019; опубл. 05.02.2020, Бюл. № 3.

33. Климаш В. С., Петухов А. В. Способ управления электроприводом деревообрабатывающей линии во время автоматического включения резерва: пат. 2740813 Рос. Федерация, H02P 1/16, H02P 3/06/ Климаш В. С., Петухов А. В. Заявитель ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», №2020107224; заявл 17.02.2020; опубл. 21.01.2021, Бюл. № 3.

34. Климаш В. С., Петухов А. В. Электропривод деревообрабатывающей линии по производству шпона: пат. на полезную модель RU 181730, 26.07.2018 Климаш В. С., Петухов А. В., Соколовский М. А. Заявка № 2017130399 от 28.08.2017.

35. Климаш В. С., Петухов А. В. Программный комплекс математической модели электропривода деревообрабатывающей линии в среде MatLab: свид. №2021611165 Рос. Федерация, Климаш В. С., Петухов А. В., заявитель ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»; заявл. 18.12.20 опубл. 22.01.21.

36. Колб А. А. Система группового питания приводов с емкостными накопителями и параллельными активными фильтрами / А. А. Колб //

Электротехнические и компьютерные системы – К.: «Техника» – 2011. Выпуск 3(79). – С404-407.

37. Колб А. А. Расчет емкости накопительного конденсатора для системы группового питания частотно-регулируемых асинхронных электроприводов, снабженной активным фильтром / А. А. Колб // «Электротехніка та електроенергетика». – 2006 – №2 – С. 61-63.

38. Колб А. А. К расчету накопительных конденсаторов в системах группового питания электроприводов / А. А. Колб // Украина. Днепропетровск. Национальный горный университет. – 2004г.

39. Колб А. А. Энергосберегающая система группового питания электроприводов с общим преобразователем с двухсторонней проводимостью и емкостным накопителем энергии / А. А. Колб // Вестн. Кременчугского гос. политех. ун-та. – Кременчуг: КрГПУ, 2003. – Вып.1. – С. 135-143.

40. Колб А. А. Пространственно – векторное управление групповым IGBT-преобразователем для коррекции качества электроэнергии в системах электропривода с общими шинами постоянного тока / А. А. Колб // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2004., В. № 71. – С. 46-53.

41. Коновалов Б. И. Основы преобразовательной техники, учебное пособие / Б. И. Коновалов, В. С. Мишуров // Томск. Факультет дистанционного обучения, ТУСУР. – 2015.

42. Косчинский С. Л. Управление асинхронным электродвигателем в квазистационарных режимах повторный пуск, подхват и удержание / С. Л. Косчинский, Ю. В. Колоколов // Электротехника. – 2007. – №11. – С.25-30.

43. Курнышев Б. С. Электромагнитная совместимость в асинхронных электроприводах переменного тока / Б. С. Курнышев, П. А. Фомин // Вест. ИГЭ. – 2005. – Вып.3 – С. 16-19.

44. Лукевски М. М. Повышение энергосбережения электроприводов переменного тока с преобразователями частоты за счет использования дросселей фирмы ELHAND TRANSFORMATORY / М.М. Лукевски, А. Г.

Осетер, А. Н. Хебровски, В. И. Ткачук, Б. Л. Копчак // Проблемы автоматизированного электропривода Вестник национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», – 2008. – Вып.30. – С. 489-492.

45. Малофеев А. В. Режимы аварийной несимметрии систем электроснабжения. Монография / А. В. Малофеев, Е. А. Панова // Москва, Вологда: Инфра – инженерия, 2022 – 148 с.

46. Петрашевич Н. С. Сводка об аварийных отключениях ВЛ и КЛ 6-10 КВ / Н. С. Петрашевич, А. В. Манько, А. А. Захарченко // – 2021 – С. 72 - 76. – 2021 – С. 72 - 76.

47. Медведев В. Н. Способы обеспечения электромагнитной совместимости мощных преобразователей частоты с электродвигателем и сетью / В. Н. Медведев, А. С. Карандаев, С. А. Евдокимов // Электроприводы переменного тока: Труды международной 15-й конференции. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 161 – 165.

48. Мещеряков В. Н. Активный фильтр гармоник в системах регулируемого асинхронного электропривода / В. Н. Мещеряков, П. Н. Левин, А. М. Евсеев // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2017. № 2 (48). – С. 12-22.

49. Микитченко А. Я. Транзисторные преобразователи с рекуперацией энергии в сеть / А. Я. Микитченко, М. В. Могучев // Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития Ч.І . Труды IV международной конференции. Магнитогорск. МГГТУ , 2004. – С. 284- 286.

50. Немыкина О. В. Исследование процессов в сети, питающей группу частотно-регулируемых приводов для крановых установок / О. В. Немыкина // Электротехнические и компьютерные системы – К. «Техника», – 2011. № 03(79) – С. 355-356.

51. Новожилов Н. Г. Оценка устойчивости частотно-регулируемого привода при провалах напряжения в сети / Н. Г. Новожилов // Введение в энергетику сборник материалов II Всероссийской (с международным участием)

молодежной научно-практической конференции. Кузбасский государственный технический университет имени Т..Ф. Горбачева. – 2016. – 196 с.

52. Новиков П. Плавный заряд ёмкости, что выбрать. / П. Новиков, Н. Гриднев // Силовая электроника – 2012 – №2 - С. 30-32.

53. Анисимов В. А. Опыт разработки и применения тиристорных преобразователей напряжения для управления асинхронными электроприводами / В.А. Анисимов, А.О. Горнов, М.Ю. Катаев // Электротехника. – 1993 – №6. – С. 37-41.

54. Пивняк Г. Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г. Г. Пивняк, А. В. Волков // – Днепропетровск: НГУ, – 2006. –470 с.

55. Петухов А. В. Способ ограничения тока заряда конденсаторов С-фильтров звена постоянного напряжения группового частотно-регулируемого привода: пат. 2855053 Рос. Федерация, Н02М 5/44, Н02М 7/06, Н02М 7/46 / Петухов А. В.; Заявитель ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», №2025121379 заявл. 31.07.2025, опубл. 23.01.2026, Бюл. № 3.

56. Петухов А. В. Система электропитания частотно-регулируемого привода кранового хозяйства морского порта / А. В. Петухов // Морские интеллектуальные технологии. – 2025 – № 4. ЧЗ – С.128–135.

57. Петухов А. В. Управление электротехническим комплексом с групповым частотно-регулируемым приводом при провалах напряжения в питающей сети / А. В. Петухов, Д. А. Киба // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 9. – С. 579.

58. Петухов А. В. Разработка и исследование системы управления групповым частотно-регулируемым приводом с повышенной устойчивостью к провалам напряжения в сети / А. В. Петухов // Омский научный вестник. - 2025. - №1 (193). - С. 76-84.

59. Петухов А. В. Опыт эксплуатации комплекса электроприводов автоматизированных линий по производству шпона / А. В. Петухов, В. С. Климаш // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 47-й научн.-технич. конф. студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 10-21 апреля 2017 г. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2017. – С. 858-860.

60. Петухов А. В. Исследование электротехнического комплекса деревообрабатывающей линии при срабатывании АВР / А. В. Петухов, В. С. Климаш // Материалы V Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов: сб. науч. работ. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 134-136.

61. Петухов А. В. Способ управления электроприводом электротехнического комплекса деревообрабатывающей линии / А. В. Петухов, В. С. Климаш // Материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: сб. науч. работ. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 167 - 169.

62. Петухов А. В. Способ управления электротехническим комплексом деревообрабатывающей линии и его исследование / А. В. Петухов, В. С. Климаш. // Материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в 3 ч.: сб. науч. работ. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – С. 324 – 326.

63. Петухов А. В. Практическая реализация электротехнического комплекса с полезным использованием энергии генераторного торможения / А. В. Петухов, В. С. Климаш // Материалы международной научно-практической конференции: «Энергетика региона: состояние и перспективы развития» сб. науч. работ. – Душанбе: Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, 2019.

64. Петухов А. В. Практическая реализация электропривода автоматизированной линии по производству шпона с общим звеном постоянного напряжения / А. В. Петухов, В. С. Климаш // Материалы

Международной научно-практической конференции: сб. науч. работ. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2019. – С. 166 - 169.

65. Петухов А. В. Математическое моделирование электротехнического комплекса автоматизированной линии по производству шпона / А. В. Петухов, В. С. Климаш // Материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: сб. науч. работ. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2019. – С. 395-398.

66. Петухов А. В. Электропитание автономных инверторов напряжения преобразователей частоты от общего выпрямителя / А. В. Петухов, В. С. Климаш // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов: сб. науч. работ. Хабаровск ФГБОУ ВПО «ДВГУПС», 2018. – С. 303-311.

67. Петухов А. В. Повышение эксплуатационной надёжности и энергетической показателей электропривода / А. В. Петухов, В. С. Климаш // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов: сб. науч. работ. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2018. – С. 369-398.

68. Петухов А. В. Опыт эксплуатации комплекса электроприводов автоматизированных линий по производству шпона / А. В. Петухов, В. С. Климаш // Материалы 47-й научно-технической конференции студентов и аспирантов: сб. науч. работ. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2017. – С. 858-860.

69. Попов Е. В. Модернизация крановых асинхронных электроприводов с использованием полупроводниковых преобразователей: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» / Е. В. Попов М., – 2006.- 20с.

70. Попов Н. М. Анализ переходных процессов в электрических сетях 0,38 кВ при однофазном коротком замыкании / Н. М. Попов, И. А. Молодов // Журнал Достижения науки и техники АПК. – 2011. – №8. – С. 71-73.

71. Правила устройства электроустановок. 7-е издание 2003 г
72. Преобразователь частоты FR-A-700. Руководство по эксплуатации – Mitsubishi Electric. 2007. – 830 с.
73. Преобразователь Sinamics V20. Руководство по эксплуатации – Siemens. 2013. – 371 с.
74. Преобразователь частоты с широкими возможностями адаптации. 3G3RX Руководство по эксплуатации – Omron Corporation. 2018. –504 с.
75. Рогинская Л. Э. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей с сетью при питании нагрузки с нелинейной вольтамперной характеристикой / Л. Э. Рогинская, Е. Н. Гуляев // Вест. Чувашского университета. 2010. №3. – Чебоксары: ЧСУ. – С. 244-251.
76. Севостьянов А.А. О влиянии провалов и прерываний напряжения на режимы функционирования промышленных систем электроснабжения / А.А. Севостьянов // «Электроэнергия. Передача и распределение». 2023. № 6.
77. Соколов А. А. Влияние отклонения напряжения на работу электрооборудования промышленных предприятий / А. А. Соколов, Е. Н. Гаврилов, Р. Р. Тимергалиев // Новые вызовы - новые исследования. Сборник статей II Международной научно-практической конференции. – Петрозаводск, 2022. – С. 13– 21.
78. Стив Р. Корректоры коэффициента мощности / Р. Стив. // Силовая электроника – 2022 – № 1 – С.48–55.
79. Татарникова А. Н. Переходные процессы в электроэнергетических системах учебное пособие / А. Н. Татарникова, Н. А. Парфёнова // Рубцовский индустриальный институт, 2016. – 40 с.
80. Тимошкин В. В. Использование активного выпрямителя в энергосберегающих системах электропривода подъёма / В. В. Тимошкин, С. Н. Кладиев, Г. А. Климкин // Современные проблемы машиностроения: сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, г. Томск, 22-25

ноября 2022 г. Томск. Томский политехнический университет. – 2022. – С. 55-57

81. Томашевский Д. Н. Автономные инверторы: учебное пособие / Д. Н. Томашевский // Екатеринбург: Издательство Уральского университета. – 2019. – 120 с.

82. Усольцев А. А. Электрически й привод: учебное пособие / А. А. Усольцев // СПб.: Изд-во НИУ ИТМО, 2012. – 238 с.

83. Ушаков В. Я. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности: социально-экономические и правовые аспекты / В.Я Ушаков // Издательство Томского политехнического университета. – 2011. – 280 с.

84. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных // М.:ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

85. Фишман В. Провалы напряжения в сетях промпредприятий [Электронный ресурс] / В. Фишман. // Новости электротехники. – 2004. – №5(29). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2004/30/05.php>.

86. Хакимьянов М. И. Анализ использования частотно-регулируемого привода в нефтегазовой промышленности по результатам патентного поиска / М. И. Хакимьянов, Б. В. Гузеев // Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа. Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело» – 2011 – № 3

87. Чулюкова М. В. Электрические режимы в электроэнергетических системах / М. В. Чулюкова // Благовещенск, Амурский гос. университет. – 2017. – 81 с.

88. Шавёлкин А. А. Преобразователь частоты с промежуточным звеном повышенного напряжения при питании от аккумуляторной батареи / А. А. Шавёлкин, Д. Н. Мирошин // Научные труды ДонНТУ. Серия: Электротехника та енергетика. 2003 – Выпуск 67.

89. Шклярский Я. Э. Определение напряжения звена постоянного тока частотного электропривода при провалах напряжения / Я. Э. Шклярский, А. И. Барданов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – №12. – С.447-456.

90. Шонин О. Б. Обеспечение устойчивой работы частотно-регулируемого привода шахтной подъёмной установки при провалах напряжения / Т. С. Иванова, О. Б. Шонин // – Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. – №6. – С.53-67.

91. Шуин В. А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ / В. А. Шуин, А. В. Гусенков // М.: НТФ «Энергопрогресс». – 2001. – 104 с.

92. Эрнст А. Д. Самозапуск асинхронных электродвигателей: Учеб. пособие / А.Д. Эрнст. // Омск: Изд-во ОмГТУ. – 2006. – 46 с.

93. Яркий Я. В. Основные опасности и отказы оборудования на нефтеперерабатывающем заводе / Я. В. Яркий // Международный научный журнал «Вестник науки». – № 1 (82) Том 3. Январь 2025 г. – С. 1521 – 1526

94. Djokic S. Ž. Sensitivity of AC Adjustable Speed Drives to Voltage Sags and Short Interruptions / S. Ž. Djokic, K. Stockman, J. V. Milanovic, J. J. Desmet // 6324121 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. – IEEE standard 519 –1992, London 1992.

95. Klimash V. S. Electric Drive with Common Rectifier and Individual Inverters for Asynchronous Electric Motors of Woodworking Line / V. S. Klimash, A. V. Petuhov // 10.1109/FarEastCon. 2019. 8602876.

96. Pietiläinen K. DC - link stabilization and voltage sag ride through of inverter drive / K. Pietiläinen, L. Harnefors, A. Petersson // Industrial Electronics, IEEE Transactions on 53 (4), 1261–1268. 2006.

97. Jeong J. Three-phase interactive DVR with new sag detection algorithm / J. Jeong, J. Lee, B. Han // Journal of power electronic. – 2010. – V.10, № 2. – P.1-2.

98. Electromagnetic Compatibility (EMC) of Technical Equipment, IEC 61800 – 3:2012 International Standard, 2012.

99. Limitation of Emission of Harmonic Currents in low Voltage Power Supply Systems for Equipment with rated Current Greater than 16 A Per Phase, IEC 61000 – 3–12:2004 International Standard, 2004.

100. Leborgne R.C. Voltage sag characterization and estimation: thesis for the degree of licentiate of engineering / Leborgne Roberto Chouhy // Sweden: Goteborg, 2005. – 99 p.

101. Holtz J. Controlled AC Drives with Ride-Through Capability at Power Interruption / J. Holtz, W. Lotzkat // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1994. – Vol.30, No.5. – P. 1275-1283.

102. Petronijević, M. P. Voltage Sag Drop in Speed Minimization in Modern Adjustable Speed Drives / M. P. Petronijević, B.I. Jeftenić, N.M. Mitrović, V.Z. Kostić // Facta universitatis. – 2006. – v.16 – P.231-237

103. Soares V. Linear and sliding-mode controllers for three-phase four-wire power converters / V. Soares, P. Verdelho // IEEE Trans. Power Electron. – 2005. – June. – P. 799-804.

