

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”

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре - 2026

Работа выполнена на кафедре «Промышленная электроника и инновационные технологии» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Научный руководитель: **Табаров Бехруз Довудходжаевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Официальные оппоненты: **Зюзев Анатолий Михайлович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (Российская Федерация, г. Екатеринбург)

Лысенко Олег Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрическая техника» Энергетического института ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет» (Российская Федерация, г. Омск)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск

Защита диссертации состоится « 30 » июня 2026 г. в 9:00 часов на заседании диссертационного совета 99.2.140.02 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 201-3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27 и на официальном сайте https://sovet.knastu.ru/diss_defense

Автореферат разослан « ___ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета 99.2.140.02, канд. техн. наук



Гудим Александр Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Диссертационная работа направлена на решение задач, связанных с расширением функциональных возможностей частотно-регулируемого привода (ЧРП) и группового частотно-регулируемого привода (ГЧРП) для повышения устойчивости к провалам напряжения в питающей сети за счет применения специального способа управления автономным инвертором напряжения (АИН) при провалах напряжения и специального способа подключения звена постоянного напряжения (ЗПН) ЧРП к питающей сети в нормальном и аварийном режиме работы системы электроснабжения.

Особенностью ЧРП является его высокая чувствительность к провалам напряжения в питающей сети, возникновение которых приводит к срабатыванию собственной защиты минимального напряжения (ЗМН) преобразователя частоты (ПЧ) и отключению привода от сети во избежание аварийных бросков тока, как зарядных токов конденсатора С-фильтра, так и входных токов 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 питающей сети. 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.

Существующие системы управления АИН ЧРП после возникновения провала напряжения в питающей сети и срабатывании ЗМН обеспечивают снятие импульсов управления транзисторными ключами АИН для устранения аварийных бросков входного тока АИН. Повторный автоматический запуск ЧРП возможен после полной остановки асинхронного двигателя (АД) и зарядки конденсатора С-фильтра ЗПН до номинального напряжения, что приводит к полной остановке технологического процесса и возникновению аварийных ситуаций в технологическом оборудовании.

Все это подчеркивает важность и актуальность задачи разработки различных способов и устройств, направленных на расширение функциональных возможностей систем управления АИН, устранение влияния на работу ЧРП дестабилизирующих факторов, возникающих в питающей сети и снижения влияния электротехнических комплексов с ЧРП на питающую сеть.

Степень разработанности темы исследований. Значительный вклад в исследование, разработку технических решений, связанных с расширением

функциональных возможностей при управлении ЧРП внесли: Андриенко П.Д., Климаш В.С., Невраев В.Ю., Осипов О.И., Онищенко Г.Б., Шонин О.Б., Щедрович В.А. и др.

Объектом исследования является электротехнический комплекс (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.);

– Международная научно-практическая конференция: «Энергетика региона: состояние и перспективы развития» (г. Душанбе Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими. 25 октября 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.)

Научные достижения.

Личный вклад соискателя заключается в следующих работах:

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

– разработке математической модели специализированного программного комплекса ЭТК с ГЧРП;

– разработке системы управления АИН для плавного разгона АД на интервале преодоления провалов напряжения в питающей сети;

– разработке 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 нанoeлектроника», 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении Очерчен круг вопросов связанных с эксплуатацией ЭТК на базе ГЧРП в различных аварийных и предаварийных ситуациях возникающих в системе электроснабжения. Особый акцент уделён электромагнитной совместимости ГЧРП с питающей сетью. Выявлены проблемные аспекты при эксплуатации ГЧРП в условиях нестабильных электрических сетей. Сформулирована цель и основные задачи диссертационной работы, определены научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе проведён анализ существующих технических решений и способов, связанных с решением вопросов обеспечения работоспособности ГЧРП в условиях отклонения напряжения в питающей сети и снижения влияния ГЧРП на питающую сеть. Для уменьшения влияния отклонения параметров питающей сети на работоспособность ГЧРП предложена рациональная структура его построения. В процессе рассмотрения существующих технических решений ГЧРП установлено, что для технологического процесса допускающего кратковременное снижение скорости привода, целесообразно применение общего ЗПН для повышения эффективности системы электропитания ЧРП, способа управления АИН для увеличения продолжительности работы привода на интервале времени ожидания восстановления напряжения в питающей сети и ограничения входного тока АИН и способа ограничения зарядного тока конденсатора С-фильтра ЗПН при резком восстановлении напряжения после завершения аварийных режимов в системе электроснабжения. На основании результатов анализа сформулирована задача исследований.

Во второй главе синтезирована структура системы питания силовой части ГЧРП. Выявлены проблемы связанные с обеспечением электромагнитной совместимости ГЧРП с питающей сетью и устранением бросков зарядного тока конденсаторов С-фильтра ЗПН, определены факторы, влияющие на работу ПЧ в условиях эксплуатации при нестабильности питающего напряжения.

Для обоснования выбора системы электропитания ГЧРП проведена сравнительная оценка систем электропитания группы автономных инверторов на постоянном и преобразователей частоты на переменном токе. В результате анализа и сравнительной оценки систем питания ГЧРП на постоянном и переменном токе оказалось, что возможно снизить потери напряжения на постоянном токе в 1,2 раза по сравнению с ГЧРП на переменном токе. В процессе проведения исследования выполнена оценка влияния аварийных режимов, возникающих в различных участках системы электроснабжения на параметры напряжения в ЗПН АИН.

В третьей главе предложены и исследованы способы управления АИН ГЧРП, направленные на увеличение продолжительности работы привода и времени ожидания восстановления напряжения в питающей сети, сохранение управления ЧРП в процессе преодоления провалов напряжения, а также устранение бросков тока заряда конденсатора С-фильтра ЗПН в момент восстановления напряжения в питающей сети.

Уменьшение напряжения в ЗПН влияет на работу ЧРП, характеризуемую двумя случаями. Для случая, когда отклонение напряжения в трёхфазной сети не вызывает срабатывание уставки защиты минимального напряжения (ЗМН):

$$U_{DC \text{ ном}} > U_{DC} > U_{DC \text{ мин}},$$

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

U_{DC} – фактическое значение напряжения в ЗПН, В;

$U_{DC \text{ мин}}$ – напряжение срабатывания уставки ЗМН.

привод продолжает работать с уменьшенным электромагнитным моментом.

В случае если $U_{DC} < U_{DC \text{ мин}}$ существующей СУ ЧРП осуществляется отключение привода за счёт снятия импульсов управления IGBT транзисторами АИН с переходом АД на режим свободного выбега. Повторный запуск возможен после полной остановки АД, восстановления напряжения в трёхфазной, сети и заряда конденсатора С-фильтра ЗПН до значения $U_{DC \text{ ном}}$. Время подготовки к повторному включению ЧРП $t_{п.в}$ зависит от времени заряда конденсатора, определяемого параметрами токоограничительной цепи t_{RC} и быстродействием системы шунтирования токоограничительной цепи $t_{с.ш.}$, $t_{п.в} = t_{RC} + t_{с.ш.}$. После восстановления напряжения в питающей сети время подготовки к повторному включению, как правило, превышает длительность провала напряжения в системе электроснабжения. Рассмотрим основные соотношения определяющие скорость разряда конденсатора С-фильтра ЗПН.

Мощность потребляемая АИН от ЗПН:

$$P_{вх.АИН} = U_{DC} \cdot I_{вх.АИН}, \text{ Вт} \quad (1)$$

Где: $I_{вх.АИН}$ – входной ток автономного инвертора, А.

Мощность, потребляемая АД от АИН:

$$P_{дв} = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi, \text{ Вт} \quad (2)$$

Где: U_1 – действующее значение линейного напряжения первой гармоники на выходе АИН, В;

I_1 – действующее значение тока первой гармоники на выходе АИН, А.

В установившемся режиме работы ЧРП $P_{вх.АИН} = P_{дв}$. Действующее значение напряжения на выходе АИН с ШИМ:

$$U_1 = \frac{m \cdot U_{DC}}{\sqrt{2}}, \text{ В} \quad (3)$$

Где: m – коэффициент модуляции АИН.

Входной ток АИН зависящий от активной составляющей тока АД определяется соотношением:

$$I_{вх.АИН} = \frac{\sqrt{3} \cdot m \cdot i_1 \cdot \cos\varphi}{\sqrt{2}}, \text{ А} \quad (4)$$

Где: i_1 – амплитудное значение тока первой гармоники на выходе АИН, А.

Интервал времени разряда конденсатора С-фильтра ЗПН до значения напряжения звена постоянного напряжения $U_{DC} = 0$ определяется из уравнения энергетического баланса как:

$$T = \frac{U_{DC}^2 \cdot C}{2 \cdot P_{дв}}, \text{ с} \quad (5)$$

Где: C – ёмкость конденсатора С-фильтра ЗПН, Φ ;

Зависимость мощности АД от скорости $n_{дв}$ двигателя определяется выражением:

$$P_{дв} = \frac{M_{дв} \cdot n_{дв}}{9,55} \quad (6)$$

Где: $M_{дв}$ – номинальный момент АД.

Исходя из рассмотренных выражений, можно сделать вывод, что воздействовать на интенсивность разряда конденсатора С-фильтра ЗПН возможно за счёт управления $n_{дв}$ при изменении выходной частоты АИН пропорционально снижающемуся напряжению в ЗПН.

На рисунке 1 представлена функциональная схема ЧРП с предлагаемой системой управления АИН. Функциональная схема (рисунок 1) содержит: входную сеть ($U_{вх}$); входной выпрямитель (ВВ); конденсатор С-фильтра ЗПН (C_{Φ}); датчик напряжения (ДН); блок масштабирования (БМ); задатчик выходной частоты АИН ($F_{вых\ АИН}$); систему управления АИН (СУ); автономный инвертор напряжения (АИН); асинхронный двигатель (АД).

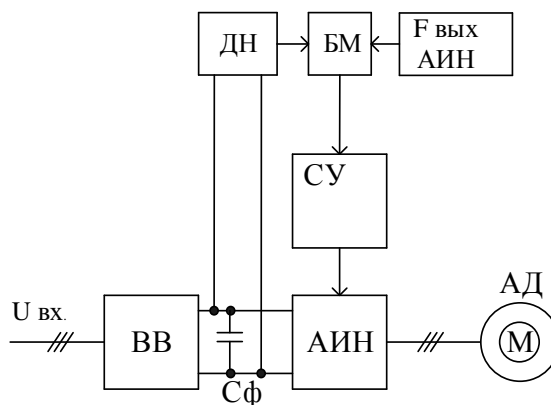


Рисунок 1 – Функциональная схема ЧРП с предлагаемой системой управления АИН

На рисунке 2 проиллюстрированы осциллограммы изменения напряжения в ЗПН при разряде конденсатора C_{Φ} для режима выбега АД (кривая 1) и режима управления выходной частотой АИН напряжением ЗПН в соответствии с предлагаемым способом (кривая 2).

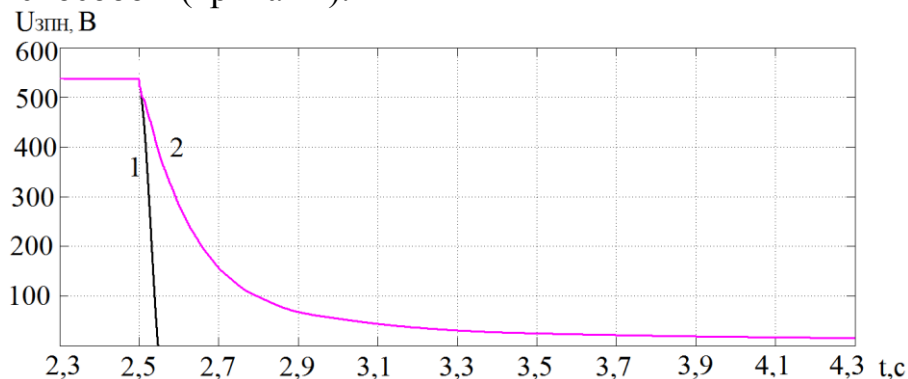


Рисунок 2– Кривая изменения напряжения на конденсаторе С-фильтра в штатном режиме управления (кривая 1) и с предложенной СУ (кривая 2) при провале напряжения в питающей сети

При управлении изменяющимся напряжением $U_{DC,ЗПН}$ выходной частотой АИН $f_{вых.АИН}$ увеличивается длительность разряда конденсатора за счёт рекуперации реактивной энергии из АД в ЗПН в процессе снижения скорости АД.

На рисунке 3 проиллюстрированы осциллограммы изменения тока статора АД $I_{СТ}$ и входного тока АИН $I_{Вх.АИН}$ при управлении выходной частотой АИН изменяющимся напряжением в ЗПН. Форма входного тока $I_{Вх.АИН}$ обусловлена равнопеременным характером длительности потребления энергии от ЗПН в двигательном режиме работы АД и возврата реактивной энергии в конденсатор C_{ϕ} в режиме генераторного торможения АД, что объясняет процесс замедления снижения напряжения при разряде конденсатора C_{ϕ} , (кривая 2, см.рис.2) после отключения ЗПН от питающей сети.

Искажение формы кривой тока статора АД $I_{СТ}$ связано с попеременной работой силовых ключей АИН и проводящего состояния диодов, шунтирующих силовые ключи АИН при рекуперации реактивного тока в конденсатор С-фильтра ЗПН.

Действующее значение напряжения в фазах на выходе трёхфазного АИН для выполнения закона частотного регулирования $\frac{U}{f} = const$ определяется выражениями:

$$U_{вых.АИН} = \frac{K \cdot \sin(2\pi f_{вых.АИН}) \cdot U_{DC,ЗПН.Ном}}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

Где: $U_{DC,ЗПН.Ном}$ – номинальное напряжение ЗПН;

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

$$K = \frac{f_{вых.АИН}}{f_{дв.ном}} \quad (8)$$

Где: $f_{дв.ном}$ – номинальная частота питающей сети АД.

В случае управления выходной частотой $f''_{вых.АИН}$ изменяющимся напряжением в ЗПН $U_{DC,ЗПН.var}$ в процессе разгона АД до номинальной скорости действующее напряжение трёхфазной системы на выходе трёхфазного АИН определится выражениями:

$$U_{вых.АИН} = \frac{K'' \cdot \sin(2\pi f_{вых.АИН}'') \cdot U_{DC,ЗПН.var}}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

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

$$K'' = \frac{f_{вых.АИН}''}{f_{дв.ном}}$$

$f_{вых.АИН}''$ – частота на выходе АИН в режиме управления заданием выходной частотой АИН изменяющимся напряжением в ЗПН:

$$f_{вых.АИН}'' = f_{вых.АИН} \cdot \frac{U_{DC,ЗПН.var}}{U_{DC,ЗПН.ном}} \quad (10)$$

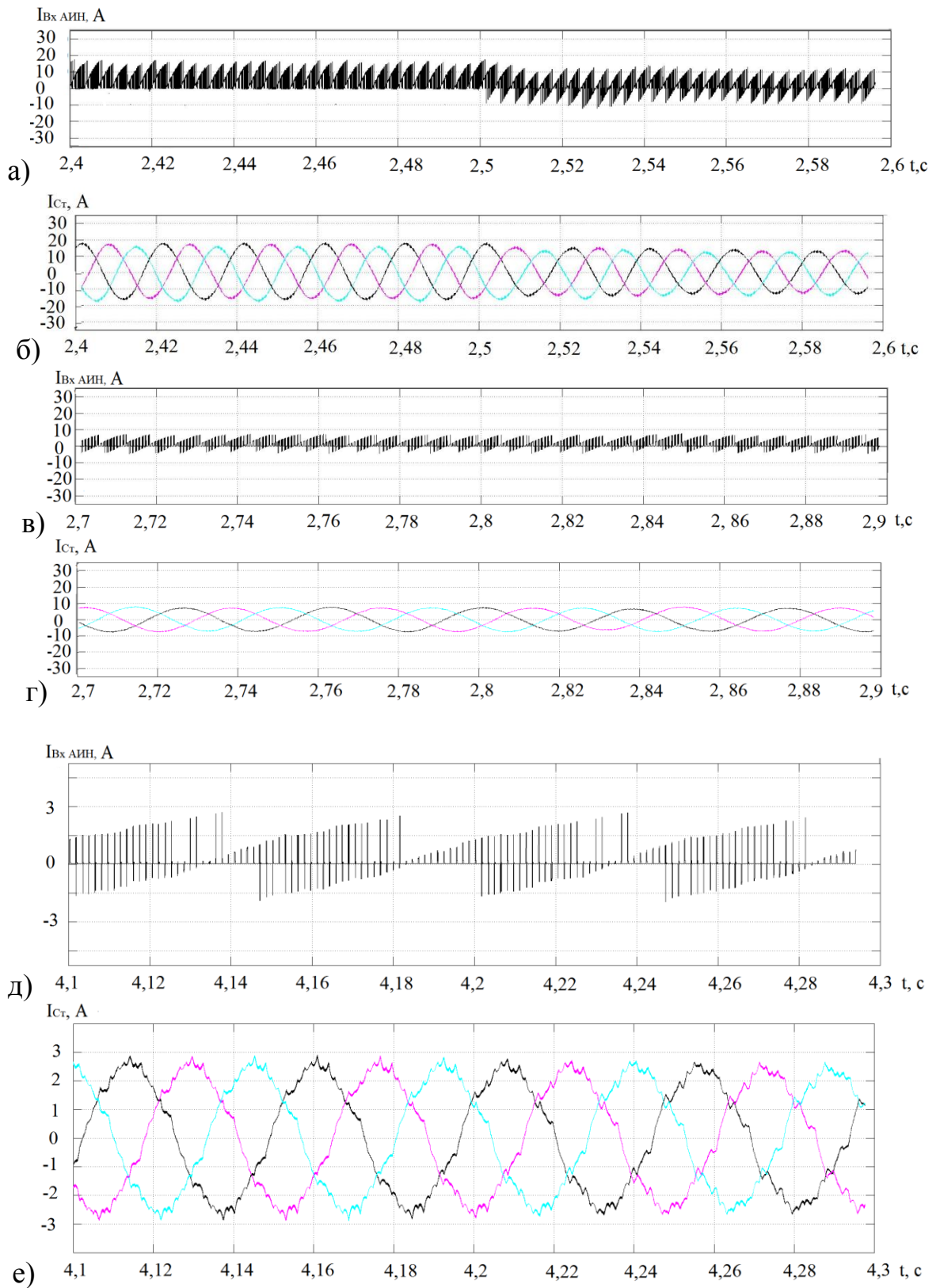


Рисунок 3 – Осциллограммы изменения: $I_{ст}$ - тока статора АД;
 $I_{вх.АИН}$ – входного тока АИН в процессе разряда конденсатора C_{ϕ} ; $U_{C\phi}$ –
напряжение на конденсаторе C_{ϕ} .
 $U_{C\phi}=0,9U_{DC.ЗПН.НОМ}$ (а, б), $U_{C\phi}=0,5U_{DC.ЗПН.НОМ}$ (в, г), $U_{C\phi}=0,1U_{DC.ЗПН.НОМ}$ (д, е)

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 изменении $U_{\text{ДС.ЗПН.Var}}$ в диапазоне $U_{\text{ДС.ЗПН.Var}} = 0 \div U_{\text{ДС ном}}$ для выражения (9) сохраняется закон частотного регулирования $\frac{U}{f} = \text{const}$.

В штатной СУ ЧРП при разряде конденсатора С-фильтра и снижении напряжения в ЗПН, срабатывает ЗМН, предотвращающая броски аварийного тока в транзисторных ключах АИН при резком восстановлении напряжения в ЗПН. Броски тока в транзисторных ключах АИН возникают по двум причинам.

При резком повышении напряжения на входе АИН $U_{\text{ДС.ЗПН.Var}} = U_{\text{ДС.ЗПН.ном}}$, действующее напряжение на выходе АИН $U_{\text{вых.АИН}}$ для каждой из фаз определяется в соответствии с выражением (9). При разряде конденсатора С-фильтра ЗПН во время провалов напряжения, $U_{\text{вых.АИН}}$ приложенное к статорной обмотке АД снижается до $U_{\text{вых.АИН пров}}$. В момент восстановления напряжения $U_{\text{вых.АИН пров}} < U_{\text{вых.АИН}}$, что приводит к броску тока в транзисторных ключах АИН и обмотках статора АД.

Вторая причина связана с нарушением синхронизации выходного тока $I_{\text{вых.Аин.m1}}$ частоты первой гармоники и тока статора $I_{\text{ст.АД.m1}}$ асинхронного двигателя. Нарушение синхронизации $I_{\text{вых.Аин.m1}}$ и $I_{\text{ст.АД.m1}}$ связано с снижением скорости АД в режиме выбега по отношению к заданию выходной частоты АИН $f_{\text{вых.АИН}}$.

Для преодоления провала напряжения в ЗПН с отсутствием бросков тока на входе АИН $I_{\text{вх.АИН}}$ и тока в статора АД $I_{\text{ст}}$ необходимо выполнить на момент восстановления напряжения на входе АИН следующие условия:

– равенство частот:

$$f_{\text{вых.АИН}} = \omega_{\text{с.в}}/2\pi \quad (11)$$

Где: $\omega_{\text{с.в}}$ – радиальная скорость вектора поля статора;

– равенство выходного напряжения формируемого на выходе АИН системой управления и остаточного напряжения на статорной обмотке АД $U_{\text{ст.АД.ост}}$ в момент восстановления напряжения на входе АИН:

$$U_{\text{вых.АИН}} = U_{\text{ст.АД.ост}} \quad (12)$$

Из анализа выражений (9), (10) следует, что сохранение равенства $f_{\text{вых.АИН}} = \omega_{\text{с.в}}/2\pi$ и $U_{\text{вых.АИН}} = U_{\text{ст.АД.ост}}$ можно достичь за счёт контроля значения $f_{\text{вых.АИН}}$ системой управления на момент начала восстановления напряжения в питающей сети с одновременной подстройкой коэффициента заполнения ШИМ K'' по закону нарастания напряжения на входе АИН. Включение АИН под нагрузку без нарушения синхронизации тока статора АД и выходного тока АИН при отсутствии бросков тока статора АД и входного тока АИН с разгоном АД до номинальной скорости после восстановления напряжения на входе АИН возможно за счёт одновременного изменения K'' и $f_{\text{вых.АИН}}$ в пропорции изменяющейся в соответствии с кривой разгона АД.

На рисунке 4 представлена функциональная схема комбинированной СУ, позволяющая выполнить условия (11) и (12).

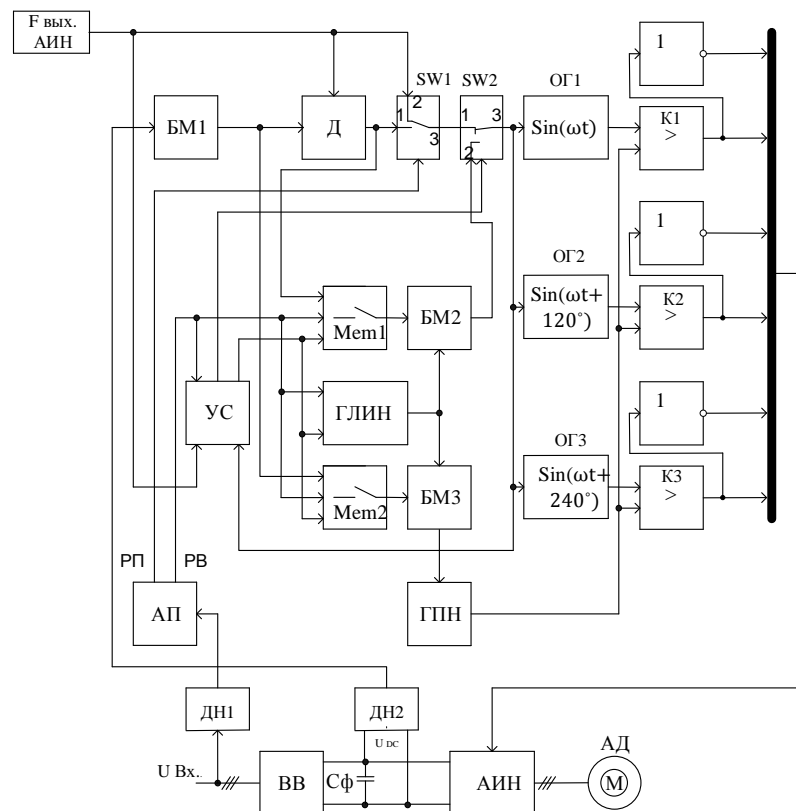


Рисунок 4 – Функциональная схема комбинированной системы управления АИН

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 (9) и (10), 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.

Для ограничения зарядного тока конденсатора С-фильтра ЗПН разработан диодно-реакторный ограничитель тока заряда (ДР-ОТЗ). Функциональная схема ГЧРП с ДР-ОТЗ представлена на рисунке 5. 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_{ϕ}); автономные инверторы напряжения (АИН); индивидуальные комбинированные системы управления (КСУ) АИН; асинхронные двигатели (АД).

При подаче напряжения из сети 0,4 кВ, восстановления напряжения после возникновения его провала в системе электроснабжения, происходит протекание тока заряда конденсаторов С-фильтра по цепи: РУ-0,4кВ, вторичная обмотка ТН, СВВ. В первичной и вторичной обмотке ТН, ДВ нагруженном Р происходит процесс плавного нарастания тока по экспоненциальному закону, в результате чего плавно нарастает ток заряда конденсатора С-фильтра ЗПН и амплитуда тока во всех фазах трёхфазной системы. По окончании переходных процессов ДВ, шунтируется по входу ШК.

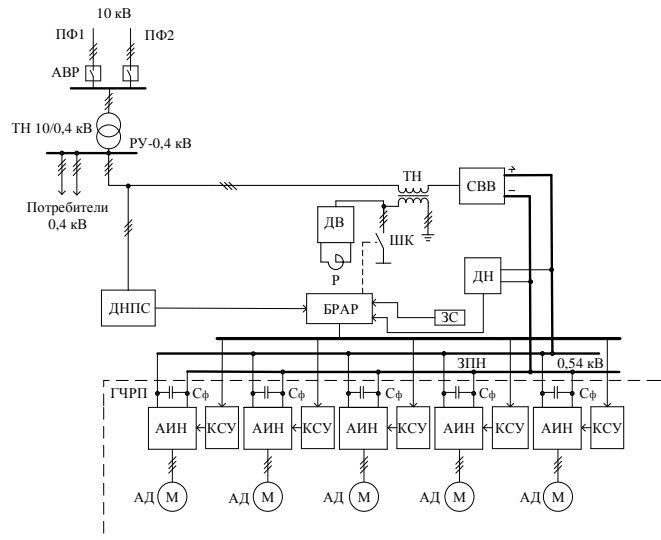


Рисунок 5 – Функциональная схема ГЧРП с ДР-ОТЗ

На разработанной имитационной модели ЭТК с ГЧРП в среде MatLab, представленной на рисунке 6, исследованы переходные процессы, протекающие в силовой части АИН при возникновении провала напряжения в системе электроснабжения.

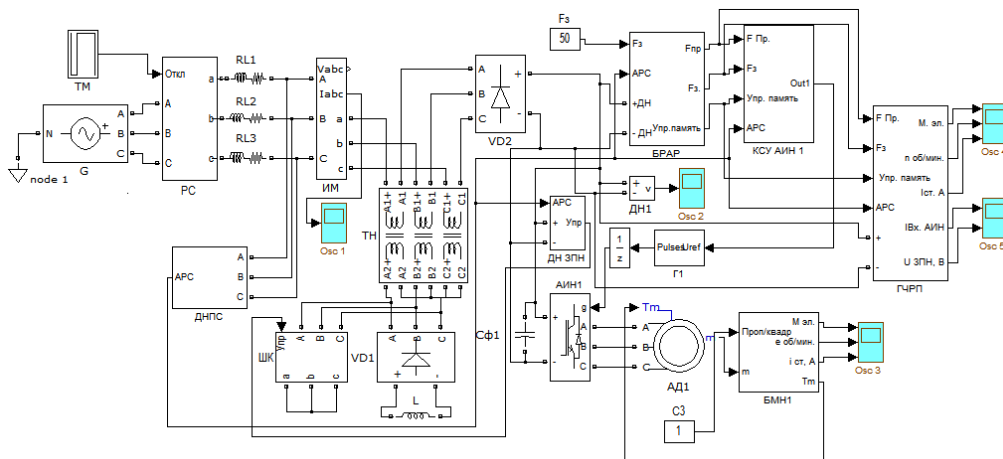


Рисунок 6– Имитационная модель ЭТК с ГЧРП

Проанализируем результаты экспериментов, полученные в среде MatLab с предложенной схемой СУ ГЧРП, с параметрами для асинхронного двигателя А280-М4 мощностью $P_n=160$ кВт входящими в состав ГЧРП с суммарной активной мощностью $\sum P_{ГЧРП} = 640$ кВт, механическая нагрузка на валу АД вентиляторная.

На рисунке 7 – представлены осциллограммы иллюстрирующие работу ЧРП при провале напряжения в системе электроснабжения во всех фазах на 100% в системе электроснабжения и снижении напряжения в ЗПН до $0,2U_{ном}$ при управлении выходной частотой АИН изменяющимся напряжением в ЗПН. В момент времени $t=2,1$ с напряжение в ЗПН повышается с $U_{DC} = 107$ В до значения $U_{DC ном.} = 537$ В, при этом в интервале времени $t=2,1-2,4$ с возникают

искажения формы тока статора АД связанные с подстройкой коэффициента заполнения K'' , согласно с выражению (9). Амплитуда выходного тока АИН на интервале времени $t=2,1-2,7$ с. составляет не более 80% от номинального значения тока статора АД. На интервале времени $t=2,1 - 6.3$ с. по завершению провала ЧРП находится в режиме разгона АД.

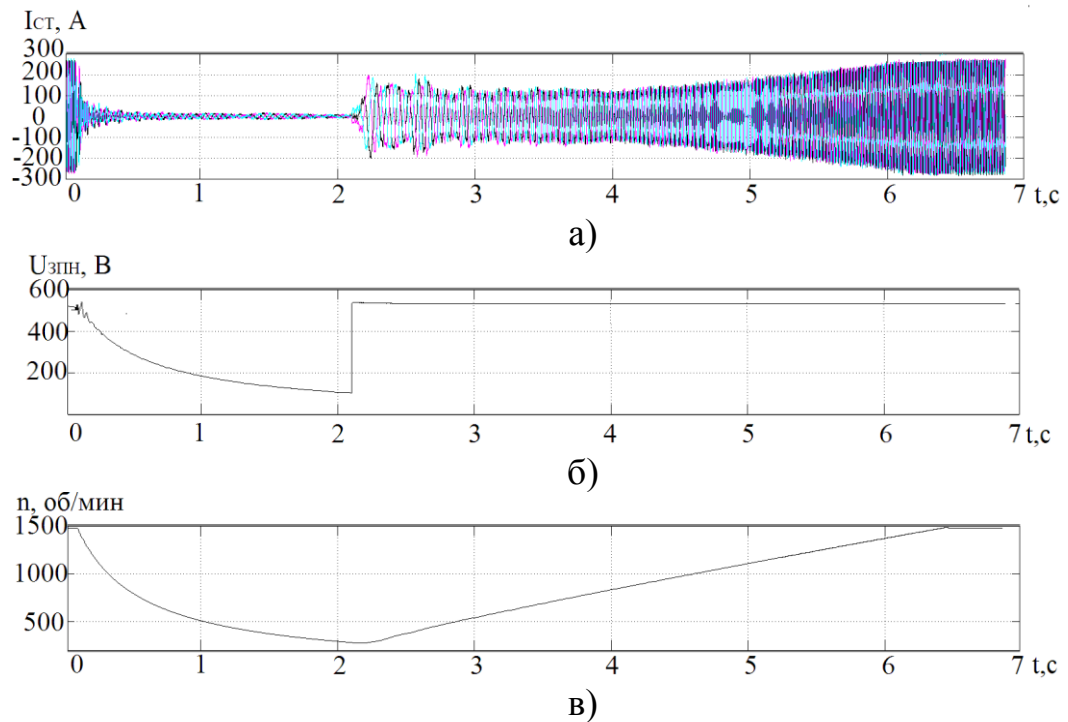


Рисунок 7 – Осциллограммы переходных процессов при возникновении провала напряжения питающей сети при разряде конденсатора С- фильтра на 80%: $I_{СТ}$ - ток статора АД (а); $U_{зпн}$. – напряжение на конденсаторе С- фильтра (б); n – скорость АД (в)

Интервал времени работы ЧРП после провала напряжения $T_{пр}$ до срабатывания ЗМН по штатной схеме определяется в соответствии с выражением:

$$T_{пр} = \frac{U_{DC.ном}^2 - (0,6 \cdot U_{DC.ном})^2 \cdot C_{Ф.ЗПН}}{2 \cdot P_{дв}} \quad (13)$$

и составляет $T_{пр} = 0,06$ с. Интервал времени $T_{р.упр}$ в течение которого сохраняется управление приводом после провала напряжения в системе электроснабжения в соответствии с осциллограммами рис. 7 составляет $T_{п.упр.Вент} = 2$ с при вентиляторной механической нагрузке. Из результатов исследования комбинированного способа управления АИН выяснилось, что его применение позволяет увеличить время ожидания восстановления напряжения на входе АИН после завершения переходных процессов вызванных аварийным режимом работы системы электроснабжения $T_{п.упр.Вент}/T_{пр}$ в 32 раза по отношению к интервалу времени ожидания напряжения в ЗПН до допустимого значения определяемого выражением (13) для штатной схемы.

Осциллограммы на рисунке 8 иллюстрируют процессы ограничения тока заряда $C_{\phi.ЗПН}$ для ГЧРП суммарной мощностью 640 кВт по штатным схемам индуктивностью сглаживающего дросселя L_{ϕ} осциллограмма (1), ДР-ОТЗ осциллограмма (2) и ограничительным резистором $R_{\text{огр.ЗПН}}$ осциллограмма (3).

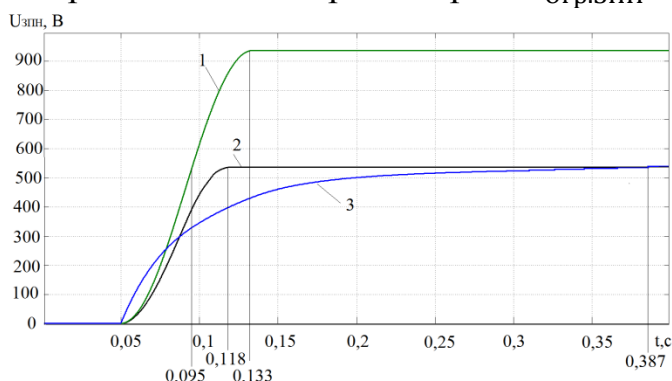


Рисунок 8 – Осциллограммы ограничения зарядного тока конденсатора С-фильтра сглаживающим дросселем (кривая 1), ДР-ОТЗ (кривая 2), ограничительным резистором (кривая 3)

В таблице 1 приведены результаты сравнительного анализа предлагаемого ДР-ОТЗ и существующих способов ограничения тока заряда $C_{\phi.ЗПН}$.

Таблица 1 Анализ результатов ограничения заряда конденсатора С-фильтра ЗПН

	Способы ограничения тока заряда конденсатора С-фильтра ЗПН.		
	Существующие способы		Предлагаемый способ
	Ограничение резистором	Ограничение индуктивностью	Ограничение ДР-ОТЗ
Амплитуда тока на входе общего 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

Применение предлагаемого способа ограничения тока заряда конденсаторов С-фильтра ЗПН не ухудшает показатели электромагнитной совместимости по сравнению с существующими техническими решениями.

Для подтверждения полученных результатов исследования ДР-ОТЗ проведённых в среде Matlab, разработан макет ГЧРП с ДР-ОТЗ, общим выпрямителем и ЗПН, функциональная схема макета показана на рисунке 11. В состав макета входят следующие элементы: блок входного контактора (БВК); маломощный источник бесперебойного питания собственных систем управления преобразователей частоты (ИБП ССУ); 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_{Φ}) входящие в состав ПЧ; автономные инверторы напряжения АИН.

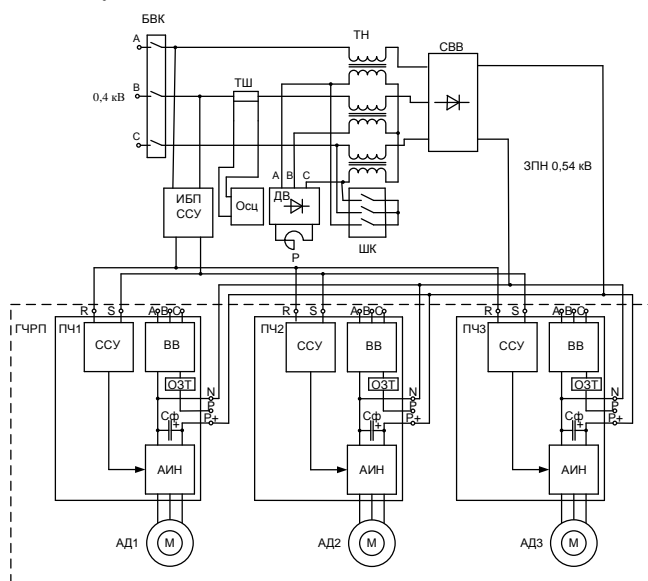


Рисунок 11 – Функциональная схема макета ГЧРП с ДР-ОТЗ

В физическом макете ГЧРП в качестве ПЧ1-ПЧ3 использованы ПЧ промышленного применения Mitsubishi A-800 мощностью 7,5 кВт.

АИН входами через штатные клеммы ПЧ “N” и “P+” подключены к общему ЗПН, штатные конденсаторы C_{Φ} через общее ЗПН соединены параллельно и образуют суммарную емкость конденсатора С-фильтра ЗПН, штатные блоки ОЗТ входящие в состав ПЧ1-ПЧ3 выведены из работы. БВК используется для моделирования провалов питающего трёхфазного напряжения, электропитание ССУ ПЧ осуществляется от ИБП малой мощности на интервале провалов напряжения в трёхфазной сети. Элементы ТН, ДВ, Р, ШК входят в состав ДР-ОТЗ, оценка изменения фазного тока

осуществляется измерительной схемой состоящей из элементов ТШ, Осц. На рисунке 12 (а) представлен внешний вид физического макета ГЧРП с ДР-ОЗТ. На рисунке 12 (б) показана осциллограмма изменения I_m в фазе «В» в момент подключения ГЧРП к питающей сети 0,4 кВ.



а)

б)

Рисунок 12 – Внешний вид макета ГЧРП с ДР-ОЗТ (а); осциллограммы входного тока в момент подключения физического макета ГЧРП к питающей сети (б)

На рисунке 13 представлена осциллограмма, полученная в среде имитационного моделирования MatLab в процессе исследования ДР-ОЗТ, с параметрами элементов имитационной модели соответствующими параметрам физического макета.

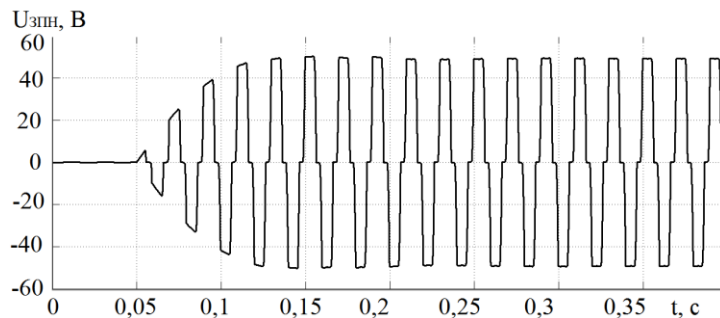


Рисунок 13 – Осциллограмма входного тока полученная в процессе исследования ДР-ОЗТ в среде имитационного моделирования MatLab

Пересчёт полученных в ходе эксперимента осциллограмм фазного тока выполнялся в соответствии:

$$I_m = \frac{K_0 \cdot n}{R_{ш.}} \quad (14)$$

Где: I_m – амплитудное значения фазного тока на входе ГЧРП;
 K_0 – коэффициент отклонения канала вертикального отклонения осциллографа, $K_0 = 5\text{В/дел}$;
 n – число делений масштабной сетки осциллографа $n=2$;
 $R_{ш.}$ – сопротивление измерительного шунта, $R_{ш.} = 0,2\text{ Ом}$.

Максимальное значение фазного тока I_m составило $I_m = 50\text{А}$. Сравнительный анализ осциллограмм фазного тока, представленных на рисунках 12 (б) и 13, подтверждает теоретические исследования и возможность практического применения ДР-ОТЗ для ограничения зарядного тока конденсаторов С-фильтра ЗПН ГЧРП.

Проведённые исследования предлагаемого способа управления АИН подтвердили возможность обеспечения работы ЧРП и ГЧРП без его остановки при провалах напряжения в системе электроснабжения на интервале времени установленном ГОСТ 32144-2013 без возникновения бросков тока, выходящих за пределы допустимой нормы в силовых модулях АИН. Применение в составе ГЧРП ДР-ОТЗ для ограничения зарядного тока конденсаторов С-фильтра ЗПН позволяет устранить электродинамические удары в электрооборудовании ГЧРП и системе электроснабжения системы электроснабжения, в частности в ГЧРП при подключении ЗПН к питающей сети.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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.

Работы, опубликованные по теме диссертации:

Публикации в перечне ВАК:

1. Климаш В.С., Петухов А.В. Исследование устойчивости электротехнического комплекса деревообрабатывающей линии к провалам напряжения в сети электроснабжения / В.С. Климаш, А.В. Петухов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки.- 2022.- № 3.- С. 184-190.

2. Климаш В.С., Петухов А.В. Электротехнический деревообрабатывающий комплекс с улучшенной энергоэффективностью и

производительностью / В.С. Климаш, А.В. Петухов // Электротехнические системы и комплексы.- 2021.- № 4 (53).- С. 19-27.

3. Климаш В.С., Петухов А.В. Электропривод с общим выпрямителем и индивидуальными инверторами для асинхронных электродвигателей деревообрабатывающей линии Амурского лесокombината / В.С. Климаш, А.В. Петухов // Омский научный вестник.- 2018.- №3 (159).-С. 22-26.

4.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.

5.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.

Статья в издании, входящем в международную систему цитирования

Scopus:

6.Klimash, V.S. Elektric Drive with Common Rectifier and Individual Inverters for Asynchronous Electric Motors of Wood worcing Line / V.S. Klimash, A.V. Petuhov //10.1109/FarEastCon.2019.8602876.

Авторские свидетельства и патенты:

7.Выпрямитель с активным фильтром: пат. 2713493 С1 Рос. Федерация, Н02J 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.

8. 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.

9.Способ управления электроприводом деревообрабатывающей линии во время автоматического включения резерва: пат. 2740813 Рос. Федерация, Н02Р 1/16, Н02Р 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.

10.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.

11.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.

Публикации в других изданиях:

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

13.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.

14.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.

15.Климаш, В.С. Практическая реализация электропривода автоматизированной линии по производству шпона с общим звеном постоянного напряжения / В.С. Климаш, А.В. Петухов // Материалы Международной научно-практической конференции: сб. науч. работ. - Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019. - С. 166 - 169.

16.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.

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

18.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.