

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ДУЛОВ ИЛЬЯ ВАДИМОВИЧ

**КОНТРОЛЬ УСПЕШНОСТИ ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ
В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

Специальность 2.4.3 – Электроэнергетика

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, профессор
Фишов Александр Георгиевич

Новосибирск - 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 ПУСКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ БЕСКОНЕЧНОЙ И КОНЕЧНОЙ МОЩНОСТЕЙ	11
1.1 Место локальных систем энергоснабжения в стратегии и тенденциях развития энергетики.....	11
1.2 Пуски двигателей в энергосистемах большой и малой мощности. Процессы и способы осуществления.....	18
1.3 Средства и способы контроля успешности прямых пусков асинхронных двигателей в энергосистемах малой мощности.....	41
Выводы по главе 1.....	44
ГЛАВА 2 МНОГОЭТАПНЫЙ ПРОГНОСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕШНОСТИ ПРЯМЫХ ПУСКОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ.....	46
2.1 Взаимосвязи параметров питающей сети и асинхронного двигателя, определяющие успешность его пуска в системах соизмеримой мощности	46
2.2 Локальный контроль факторов успешности пуска асинхронного двигателя в локальной системе энергоснабжения.....	52
2.3 Поэтапная декомпозиция условий и прогностический контроль успешности пуска асинхронного двигателя в локальной системе энергоснабжения	54
2.4 Моделирование и параметрическая идентификация элементов локальной системы энергоснабжения и условий успешности пуска асинхронного двигателя.....	64
2.4.1 Статическая и динамическая модели асинхронного двигателя.....	65
2.4.2 Модели разгона асинхронного двигателя	73
2.4.3 Модели питающей сети.....	81
2.4.4 Методы параметрической идентификации асинхронного двигателя	87
Выводы по главе 2.....	91

ГЛАВА 3 АЛГОРИТМЫ КОНТРОЛЯ УСПЕШНОСТИ ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И ИХ ВЕРИФИКАЦИЯ НА ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЯХ.....	93
3.1 Алгоритмы расчета критических параметров и поэтапного контроля успешности пуска двигателя.....	93
3.1.1 Алгоритм контроля и определения минимально допустимого напряжения для прочей нагрузки в локальной системе энергоснабжения	97
3.1.2 Алгоритм контроля и определения предельно допустимой минимальной частоты в локальной системе энергоснабжения	101
3.1.3 Алгоритм контроля и определения минимального напряжения для успешного пуска асинхронного двигателя.....	105
3.1.4 Алгоритм контроля и определения предельной частоты для успешного пуска асинхронного двигателя.....	108
3.1.5 Алгоритм контроля и определения предельной продолжительности пуска асинхронного двигателя	112
3.2 Алгоритм комплексного поэтапного контроля успешности пуска асинхронного двигателя	118
3.3 Верификация алгоритмов контроля успешности пуска асинхронного двигателя на цифровой модели локальной системы энергоснабжения	121
Выводы по главе 3.....	133
ГЛАВА 4 ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПА УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ УСПЕШНОСТИ ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ	134
4.1 Прототип устройства контроля успешности пуска асинхронного двигателя на базе Raptor.....	134
4.2 Программная реализация алгоритмов контроля успешности пуска асинхронного двигателя	140
4.3 Электродинамическая модель энергосистемы малой мощности с асинхронным двигателем.....	152

4.4 Программа и результаты испытаний прототипа автоматики контроля успешности пуска асинхронного двигателя на электродинамической модели	155
Выводы по главе 4.....	163
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	164
СПИСОК ТЕРМИНОВ	166
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	167
ПРИЛОЖЕНИЕ «А» Решение о выдаче патента.....	176
ПРИЛОЖЕНИЕ «Б» Акт внедрения	178

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время появляется все больше источников распределённой малой генерации, на базе которой формируются и развиваются активные энергорайоны электрических сетей, локальные интеллектуальную энергосистемы, локальные системы энергоснабжения, активные энергетические комплексы сопоставимой мощности единичных электроприемников и суммарной генерации, многие из которых постоянно или временно работают в автономном режиме. При этом единичные электроприемники высокой энергоемкости (асинхронные двигатели (АД)) оказывают значительное влияние на работу генерирующих агрегатов и прочей нагрузки.

Пуск крупных АД в таких системах способен приводить к нарушению балансов реактивной и активной мощности и создавая условия для возникновения аварийного режима с отключением генерирующих агрегатов и каскадной потере устойчивости прочих двигателей (лавина напряжения).

Негативное влияние пусков АД снижают рядом способов и дорогостоящих специализированных средств, в некоторых случаях, с изменением конструкции самого двигателя, что приводит к увеличению стоимости, снижению надежности. При этом, оперативная оценка способности питающей сети обеспечить успешность пуска АД при допустимых отклонениях параметров режима не производится, а прерывание процесса защитными устройствами осуществляется по факту превышения заранее заданных неактуальных уставок.

Для контроля успешности пуска АД в локальных системах энергоснабжения необходимы устройства, обеспечивающие прерывание процесса неуспешного пуска на малом безопасном временном интервале с предикативной оценкой его осуществимости при учете актуальных параметров и режимов АД и питающей сети.

Степень разработанности темы исследования.

Анализу условий успешности пуска АД и способам минимизации их негативного влияния на питающую сеть были посвящены работы ряда авторов: Веников В. А., Мелешкин Г.А., Вольдек А. И., Иванов-Смоленский А. В., Colleran P.J., Rogers W.E. За последние годы задачам минимизации влияния пусков асинхронных двигателей на питающую сеть были посвящены труды следующих авторов: Илюшин П.В., Фишов А.Г., Котин Д.А., Эрнст А.Д., Колесников Е.Б., Булычев А.В., Афанасьев А.Ю., Чершова В. О., Alankrita, Srivastava S.K., Travieso-Torres J.C., Yang H. и многие другие.

В литературе описано множество, в том числе новых, способов осуществления пусков АД с применением специализированных дорогостоящих устройств, однако, как правило, без оценки влияния процесса на прилегающую сеть, что является недопустимым для систем с соизмеримой мощностью суммарной генерации и единичного потребления, поэтому существует потребность в разработке способов и устройств, осуществляющих прогностический контроль успешности пуска АД на малом временном интервале с его противоаварийным прерыванием при выявлении условий неуспешности по актуальным данным о состоянии двигателя и ПС.

Объект исследования – локальные системы энергоснабжения с сопоставимыми мощностями суммарной генерации и крупных АД.

Предмет исследования – способы прогностического контроля успешности пуска АД.

Цель работы – разработка способа и прототипа устройства прогностического контроля успешности пуска АД, предотвращающих запуск или экстренно прекращающих процесс в априорных условиях неуспешности в локальных системах энергоснабжения.

Для достижения сформулированной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Анализ существующих способов обеспечения успешности пусков АД в крупных и малых энергосистемах.

2. Выявление факторов, определяющих успешность и допустимость пуска АД в системах соизмеримой мощности, и формирование условий успешности пуска.

3. Разработка модели по определению критических параметров режима пуска АД и валидация ее элементов.

4. Разработка способа контроля успешности пуска и методов параметрической идентификации АД.

5. Разработка и испытание на цифровой модели локальной системы энергоснабжения алгоритма контроля успешности пуска АД.

6. Разработка и испытание на физической модели локальной системы энергоснабжения прототипа автоматики контроля успешности пуска АД.

Методы исследования. В работе использованы: теории электроэнергетических систем, электрических машин, автоматического управления, переходных процессов в электроэнергетических системах, методы имитационного моделирования на цифровых и физических моделях, верификации моделей, идентификации параметров модели, объектно-ориентированного программирования, а также эксперименты на цифровой и физической моделях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Значительных запас обеспечения надежности локальных систем энергоснабжения с крупными АД содержится в применении автоматического контроля успешности их пуска с прогностическим прерыванием на ранних стадиях выявления неуспешности.

2. В системах прогностического контроля пусков АД допустимо применение статических моделей электрического режима двигателя при оценке его успешности.

3. Оценка успешности пусков АД с высокой степенью достоверности возможна без прямого контроля скорости вращения вала и механического момента сопротивления приводного механизма

Научная новизна диссертации:

1. Впервые разработан прототип автоматики контроля успешности пусков АД в локальных системах энергоснабжения соизмеримой мощности
2. Предложен способ многоэтапного прогностического контроля успешности прямого пуска АД в локальной системе энергоснабжения.
3. Предложены методы параметрической идентификации статической и динамической моделей АД в переходных режимах.

Практическая значимость результатов работы

Создан прототип автоматики многоэтапного контроля успешности пусков АД в локальных системах соизмеримой мощности, позволяющий прерывать пуск двигателя при прогностическом выявлении условий его неуспешности на ранних стадиях процесса при регистрации режимных параметров только на статорных обмотках.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Полученные соискателем основные научные результаты соответствуют пункту 11 «Разработка методов мониторинга и анализа режимных параметров основного оборудования электростанций, подстанций и электрических сетей энергосистем, мини- и микрогрид», пункту 14 «Разработка методов расчета и моделирования установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем и сетей, включая технико-экономическое обоснование технических решений, разработка методов управления режимами их работы» паспорта специальности 2.4.3 – «Электроэнергетика».

Достоверность результатов и выводов подтверждена корректным теоретическим обоснованием полученных результатов, работоспособностью автоматики контроля успешности пусков АД при цифровом и физическом испытаниях на моделях локальной системы энергоснабжения соизмеримой мощности.

Апробация работы

Основные результаты работы представлялись, докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ, всероссийской научной студенческой конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2018), всероссийской научной студенческой конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2019), международной научно-технической конференции "Электротехнические комплексы и системы" UralCon (г. Челябинск, 2019), всероссийской научной студенческой конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2020), всероссийской научной студенческой конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2021), международной научно-технической конференции "Электротехнические комплексы и системы" UralCon (г. Челябинск, 2021), всероссийской научной студенческой конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2022), международной конференции по инженерным, компьютерным и информационным наукам SIBIRCON (г. Новосибирск, 2022), всероссийской научной студенческой конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2024).

Публикации

По результатам исследования опубликовано 14 печатных работ, в том числе 4 научных статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, 10 публикаций в международных и российских изданиях, материалах международных и всероссийских конференций, из них 3 публикации в изданиях, индексируемых в наукометрической базе данных Scopus. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ и положительное решение о выдаче патента на изобретение (Приложение «А»).

Личный вклад соискателя

В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит формализация поставленных задач, разработка и исследование моделей по определению критических параметров режима для успешного пуска АД, разработка и программная реализация способа многоэтапного контроля успешности пуска АД, методов параметрической идентификации используемых моделей с испытанием на цифровой и физической моделях локальной системы энергоснабжения соизмеримой мощности, анализ и обобщение результатов.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, словаря терминов, списка литературы, состоящего из 74 наименований, и 2 приложений. Общий объем 178 страниц и включает 43 рисунка и 18 таблиц.

ГЛАВА 1 ПУСКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ БЕСКОНЕЧНОЙ И КОНЕЧНОЙ МОЩНОСТЕЙ

1.1 Место локальных систем энергоснабжения в стратегии и тенденциях развития энергетики

В настоящее время перед энергетической отраслью стоит задача повышения энергоэффективности генерации, распределения и преобразования тепловой и электрической энергии при минимальных затратах, сроках реализации и окупаемости в условиях минимизации углеродного следа и выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду. В связи с чем, современная отечественная энергетическая отрасль развивается по пути 3Д: декарбонизация, диджитализация (цифровизации или цифровая трансформация) и децентрализация [1]. Декарбонизация предполагает снижение доли углеродного топлива при производстве электроэнергии путем развития возобновляемой энергетики, полный переход к которой из-за территориальных и климатических особенностей не представляется возможным и целесообразным. Главными сдерживающими факторами являются: стохастический характер выработки электроэнергии; высокая стоимость единицы установленной мощности; отсутствие возможности работы в режимах когенерации и тригенерации; необходимость применения систем накопления; сложность утилизации; большие зоны отчуждения [2]. Как отмечается в [3], наибольший потенциал применения возобновляемой энергетики содержится в зонах крайнего севера, где топливная составляющая переменных издержек на выработку электроэнергии дизельных электростанций на порядок превышает себестоимость энергии на ветряных или солнечных электростанциях, и на морских побережьях.

Диджитализация предполагает переход к цифровым технологиям с новыми принципами и способами интеллектуального управления объектами. Цифровая трансформация, затронувшая большую область энергетических

предприятий и объединений, послужила толчком к изменению самих энергетических систем, а также правил их взаимодействия [4]. Получение информации о состоянии и режимах объекта управления с высокой дискретизацией, ее высокоскоростная обработка, создание и внедрение их цифровых двойников позволяют добиться самонастройки и самоорганизации средств управления энергосистемы, повышения компетенций персонала, внедрения концепции «интернет энергии» и т.п. [5].

Процесс диджитализации энергетической отрасли приводит к развитию и формированию новых технологий, в т.ч. распределенной малой генерации (РМГ) с переходом от централизованного управления режимами энергосистем с иерархической структурой к децентрализованному (локальному).

Под объектом с малой генерацией подразумевается максимально приближенная к узлам электропотребления электростанция, состоящая из одного или нескольких генерирующих установок, подключенная к распределительным сетям или сетям внутреннего электроснабжения потребителей на напряжении до 110 кВ включительно, работающая параллельно с электроэнергетической системой или автономно (островной режим), суммарной установленной мощностью до 25 МВт и использующая для производства энергии любые первичные источники энергии, в том числе возобновляемые [6]. РМГ в США и Европе представлена преимущественно энергообъектами на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ), подключаемых к распределительным сетям через связку выпрямителя и инвертора. В России же за счет климатических условий, а также развивающейся в больших масштабах газификации страны, как отмечается в [7], широкое распространение получила синхронная РМГ с когенерационными установками на базе газопоршневых (ГПУ), газотурбинных (ГТУ) и парогазовых (ПГУ) агрегатов на углеродном топливе.

По данным ИНЭИ РАН, прирост суммарной установленной мощности источников РМГ за последние 10 лет составил около 30 %, насчитывая на начало 2020 года в составе ЕЭС до 487 объектов общей мощностью 6 ГВт [8].

Тенденция массового ввода объектов РМГ, на фоне централизованной генерации приведена на рисунке 1.1 [9]. Из рисунка 1.1 видно, что на 2026 год по сравнению с 2017 годом прогнозируется увеличение мощности РМГ приблизительно в 3 раза, при снижении централизованной ориентировочно в 1,5 раза.

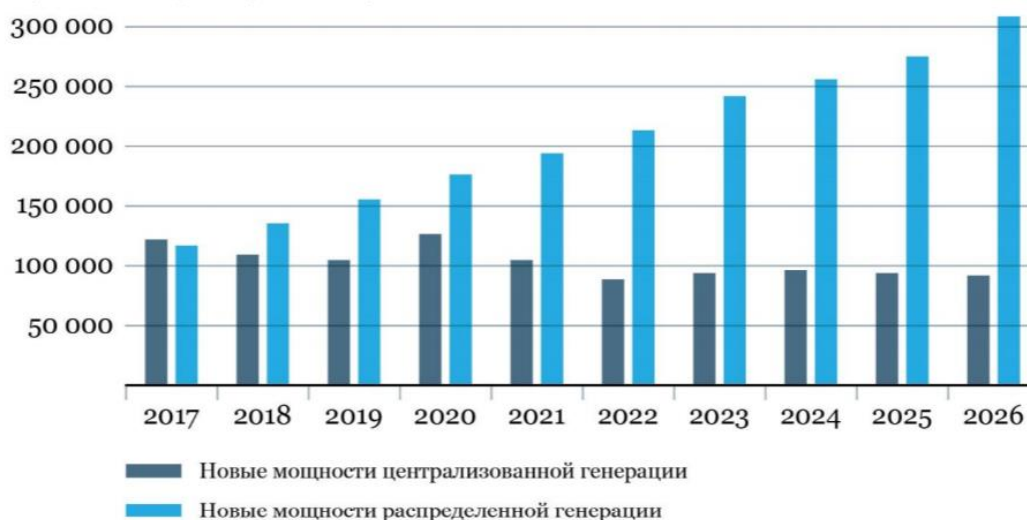


Рисунок 1.1 – Прогноз ввода новых мощностей централизованной и РМГ электроэнергии в мире, МВт

Прирост объектов РМГ в России происходит за счет:

- создания собственных источников энергии в удаленных населенных пунктах
- реконструкции существующих котельных в мини-ТЭЦ;
- создания новых электростанций для строящихся микрорайонов;
- частичного или полного перевода промышленных предприятий на собственные источники энергии

Объекты с РМГ могут быть нескольких видов: изолированные от внешней сети (автономные), работающие параллельно с внешней сетью и островные с возможностями как параллельной, так и автономной работы. Наиболее характерными представителями объектов являются: активные энергетические комплексы (АЭК), локальные системы энергоснабжения (ЛСЭ) и локальные интеллектуальные энергосистемы (ЛИЭС) [10, 11]. АЭК

функционируют параллельно с энергосистемой и создаются для снижения затрат на электрическую и тепловую энергию промышленных потребителей. Принцип построения таких систем основан на постоянной работе генерирующих агрегатов в режиме с наибольшим КПД с мощностью, соответствующей базовой составляющей графика нагрузки предприятия. Неравномерную (пиковую) часть графика нагрузки компенсирует внешняя энергосистема, к которой подключен АЭК. Подключение АЭК к внешней сети выполняют при помощи специального управляемого интеллектуального соединения с контролем допустимой величины перетока мощности для поддержания баланса между производимой и потребляемой электроэнергией.

ЛСЭ имеют в своем составе собственную генерацию, однако, как правило, не являются сбалансированными по мощности и энергии, поэтому их полноценная работа возможна только в режиме параллельной работы с внешней сетью [12].

ЛИЭС являются сбалансированными по мощности и энергии, обладают интеллектуальной системой управления, обеспечивающей возможность работы, как автономно, так и параллельно с внешней питающей сетью (ПС) [13]. Параллельный режим ЛСЭ с внешней электрической сетью, в качестве которой может выступать ЕЭС или группа других объектов с МГ, является наиболее выгодным как с экономической точки зрения (с выдачей свободной мощности в сеть), так и с технической (демпфирование резких набросов мощности и нерегулярных колебаний нагрузки в общей сети).

При этом, нередко возникают технические (отсутствие физической возможности объединения ввиду отсутствия электрической связности) или режимные (отсутствие возможности объединения ввиду наличия или потенциального развития аварийного режима в прилегающей сети) ограничения на параллельную работу ЛСЭ с внешней сетью. Автономный режим для ЛСЭ является вынужденным, т.к. не позволяет добиться системных эффектов от объединения с более мощной внешней ПС, что приводит к снижению надежности электроснабжения и качества электроэнергии. На

генераторные агрегаты ЛСЭ, сформировавшую автономный выделенный энергорайон, ложатся требования по обеспечению холодных и горячих резервов, а также необходимого режима по напряжению и частоте, что уменьшает использование установленной мощности и увеличивает срок окупаемости объекта. ЛСЭ, зачастую, обладают идентичной с Объединенной энергосистемой (ОЭС) структурой потребления, что, на фоне разукрупнения мощностей генерации, подразумевает наличие в сети электроприемников мощностью сопоставимой с суммарной генерируемой.

Характерной тенденцией XXI века является изменение структуры потребления электрической энергии в ЕЭС. На рисунках 1.2 и 1.3 приведена структура потребления в г. Москва для 1985 и 2004 годов соответственно [14], [15]. Из рисунков видно, что со временем значительно изменилось соотношение между промышленной и непромышленной нагрузками. Изменения в структуре потребления связаны: с увеличением числа электроприборов у потребителя; снижением производительных мощностей России; с формированием и созданием новых источников РГ и т.п. Также, в [16] отмечают, что в период с 2012 по 2016 года в г. Москва наибольший удельный вес в общем объеме потребления приходится на бытовое потребление, доля которого постепенно снижается (с 27,8 % до 19,4 %) с нарастанием промышленного потребителя (в частности, с 10,1% до 14,1% для обрабатывающих производств) на указанном промежутке времени. При этом, в северо-западных регионах страны наблюдается следующее их соотношение на 2019 -2020 гг. [17]:

- Республика Коми (ОАО «Коми энергосбытовая компания»), промышленность – 45%, бытовой сектор – 10 %;
- Архангельская область (ОАО «Архэнергосбыт»), промышленность – 39%, бытовой сектор – 19 %;
- Вологодская область (ОАО «Вологодская энергосбытовая компания»), промышленность – 70%, бытовой сектор – 4 %;

- Ленинградская область (ОАО «ПСК»), промышленность – 70%, бытовой сектор – 4 %;
- Ямало-Ненецкий округ, промышленность – 78%, бытовой сектор – 5 %;

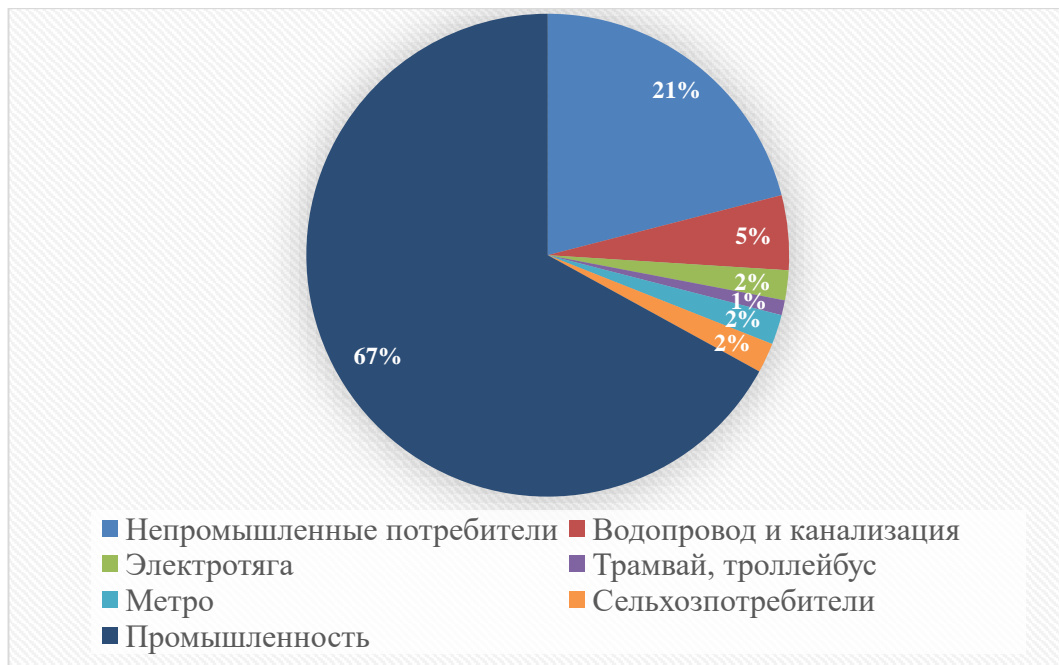


Рисунок 1.2 – Сравнение полезного отпуска электрической энергии в г. Москва в на 1985 г.

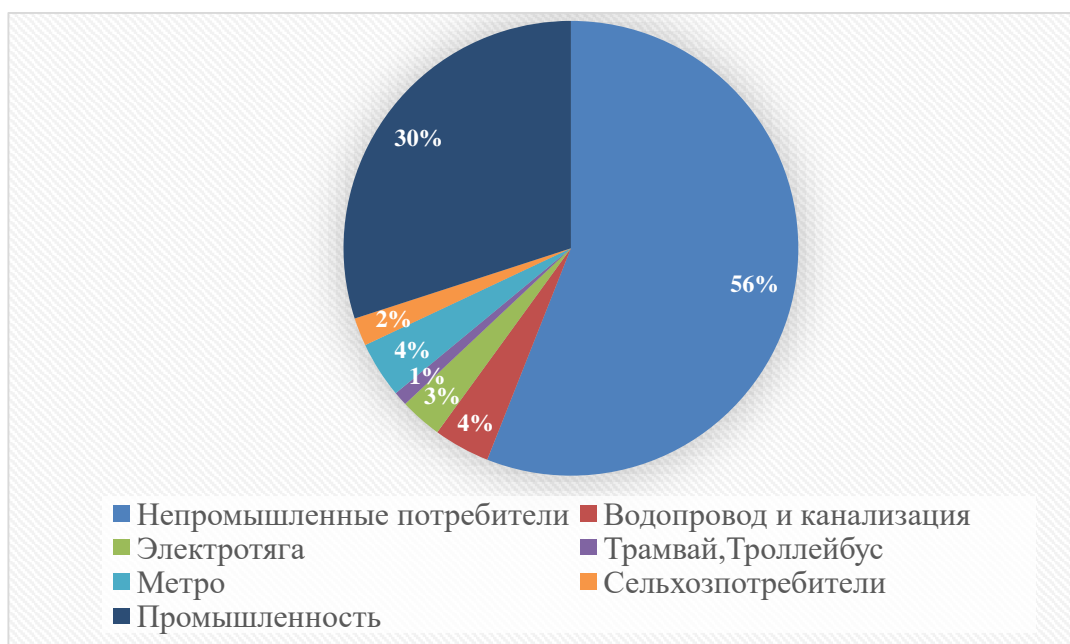


Рисунок 1.3 – Сравнение полезного отпуска электрической энергии в г. Москва на 2004 г.

В результате, лидирующая позиция в структуре потребления электроэнергии перемежается от региона к региону между промышленным и бытовым сектором и зависит от уровня их индустриализации.

Наиболее распространенными и энергоемкими электроприемниками в промышленности являются АД, единичная мощность которых, зависящая от вида, типа и режима работы приводного механизма, варьируется от единиц до тысяч кВт. В структуре промышленного потребления АД занимают лидирующую позицию, потребляя до 80 % мощности [18]. Массовое применение асинхронного электропривода в промышленности связано с рядом его преимуществ:

- простота конструкции;
- высокая надежность;
- низкая стоимость по отношению к другим видам электрических машин.

К недостаткам применения АД следует отнести:

- высокие пусковые токи (на порядок превышают номинальный);
- повышенное потребление реактивной мощности при пуске (снижение уровней напряжения при пуске в собственном и смежных узлах сети);
- скорость вращения зависит от механической нагрузки;
- невозможность регулирования скорости вращения без введения дополнительных устройств.

В результате, на фоне массового появления объектов с МГ все чаще начали появляться системы, в которых суммарная генерация сопоставима по мощности с единичными электроприемниками, в качестве которых, зачастую, выступают крупные АД. Сопоставимость мощностей генерации и крупных АД привела к значительному влиянию режимов работы двигателей на бесперебойность, надежность и качество электроэнергии в ЛСЭ, что особенно остро проявляется в процессах их пусков при автономной работе ПС. Процесс

пуска АД связан с созданием дефицита мощности в ПС, значительными изменениями частоты и напряжения в сети, в т.ч. на генераторных шинах, и возможным развитием аварийных режимов с каскадной потерей устойчивой работы прочей нагрузки и/или отключению генерирующих агрегатов с потерей электроснабжения всего энергорайона [19].

В режиме параллельной работы ЛСЭ значительную часть небаланса активной и реактивной мощности при пуске крупных АД забирает внешняя сеть, что при слабых электрических связях способно приводить к нарушению их устойчивой работы (снижение предела передаваемой мощности при увеличении перетока мощности) [20–22]. Нарушение динамической устойчивости параллельной работы ЛСЭ с внешней сетью приводит к развитию аварийных режимов с повреждением генераторных агрегатов ввиду появления разрушительных динамических моментов на их валах, вероятным пробоем изоляции синхронных генераторов (СГ) и потерей электроснабжения потребителей.

Требования к качеству, бесперебойности, экономичности, безопасности и надежности электроснабжения вынуждают адаптировать существующие и создавать новые принципы управления оборудованием и режимами электрической сети, в т.ч. контроля режимов мощных узлов нагрузки, реализующих концепцию SmartGrid применительно к энергообъектам на базе РМГ.

1.2 Пуски двигателей в энергосистемах большой и малой мощности.

Процессы и способы осуществления

В электроэнергетике применяют следующие виды электродвигателей с большой номинальной мощностью:

- Синхронные
- Асинхронные
- Постоянного тока

Двигатели постоянного тока (ДПТ) большой мощности не так широко распространены и применяются только в случаях, когда: отсутствует возможность применения прочих двигателей; требуется регулировать скорость вращения в большом диапазоне; имеется сеть постоянного тока или локальные устройства преобразования его рода. Снижение распространенности ДПТ большой мощности в настоящее время связано с рядом его недостатков (малое время работы на отказ, опасность появления кругового огня при высоком напряжении на коллекторе или резком изменении нагрузки и т.д.) и повсеместным развитием силовой электроники [23].

Синхронные двигатели применяются в случаях, когда необходимо поддерживать постоянную скорость вращения приводных механизмов, а также в сети требуется дополнительное устройство регулирования перетоков реактивной мощности (для машин на постоянных магнитах такая возможность исключается). Малая распространенность синхронных машин связана с высокой стоимостью и трудностью реализации процессов пуска. Возможны следующие варианты пуска синхронных двигателей: в асинхронном режиме (необходима дополнительная короткозамкнутая обмотка на роторе); при помощи вспомогательного разгонного устройства, который из-за сложности процедуры, зачастую, не используется.

Как отмечается в [24], АД на настоящий момент являются наиболее энергоемкими и распространенными видом электродвигателей, суммарное потребление которых составляет около 40% от генерируемой. АД подразделяются на два основных вида:

- с короткозамкнутым ротором
- с фазным ротором (двигатели с контактными кольцами)

Наибольшее распространение получили двигатели с короткозамкнутым ротором, т.к. являются наиболее дешевыми и простыми в эксплуатации.

Под *пуском АД* понимается процесс его перехода из состояния покоя в состояние с установившейся рабочей скоростью вращения или, при недопустимых для пуска режимных параметрах, его включение без выхода из

состояния покоя либо, в некоторых случаях, с переходом в устойчивую работу в зоне повышенных скольжений.

Прямой пуск АД является самым простым и распространённым, т.к. не требует дополнительных затрат на оснащение двигателя преобразующими устройствами, обладает высокой надежностью, обеспечивая малую длительность процесса разгона и высокий пусковой момент. Для его выполнения статор двигателя непосредственно соединяется с ПС на ее полное напряжение, двигатель разгоняется по естественной характеристике. При прямом подключении к ПС АД с короткозамкнутым ротором потребляет пусковой ток, который, превышая на порядок номинальный, оказывает негативное воздействие как на внешнюю сеть, так и на сам пускаемый двигатель. Его применение возможно при соблюдении следующих условий [25]:

- Мощность ПС на несколько порядков превышает номинальную мощность пускаемого двигателя, что ограничивает влияние бросков тока на прилегающую сеть.
- Для приводимого в движение двигателя допустимо резкое скачкообразное изменение ускорения ротора (соответствующие конструктивное исполнение или наличие демпфирующего устройства с применением плоских/ клиновидных ремней).
- Технологический процесс, в котором участвуют двигатель и приводной механизм, допускает или требует высокий толчкообразный момент при пуске.

Массовое внедрение и развитие РМГ с ее возможностями автономной и параллельной работы с внешней сетью привело к периодическому изменению схемно-режимных условий ПС для узлов нагрузки. Актуальное схемно-режимное состояние ПС в нагрузочном узле при отсутствии каналов связи между генерацией и потребителями, зачастую, неизвестно. В результате, ранее успешный пусковой процесс может оказаться неудачным, т.к. в любой момент

в системе может измениться состав генерирующего оборудования и мощность двигателя окажется сопоставимой с суммарной генерируемой.

Задача минимизации влияния пусков АД на режим сети и обеспечение их успешности в энергосистемах всегда являлась одной из приоритетных задач повышения надежности, бесперебойности и качества электроснабжения. При этом, степень и область влияния процессов пуска крупных двигателей разительно отличаются для систем малой и большой мощности.

В больших энергосистемах (ЕЭС, ОЭС или ЭС) суммарная установленная мощность генерирующего оборудования значительно превышает единичную мощность крупных АД. Их пуск при наличии сильной электрической связи, зачастую, приводит к безопасному и допустимому отклонению параметров режима (баланс активной и реактивной мощности практически сохраняется). Такая ПС для узла нагрузки обладает постоянством напряжения и частоты и при моделировании может быть представлена как шины бесконечной мощности (ШБМ) [26].

Пуск АД при наличии слабой электрической связи способен приводить к появлению локальных дефицитов реактивной мощности, что оказывает значительное влияние на уровни напряжения в прилегающей сети. Зачастую, в электрической сети имеется возможность выделения группы работающих АД, неразрывно связанных режимом по напряжения. Появление локальных небалансов реактивной мощности в процессе пуска крупного АД приводит к снижению электрических моментов прочей вращающейся нагрузки и, как следствие, потере их устойчивой работы (“опрокидыванию”). Каскадная потеря устойчивости двигательной нагрузки с нарастанием дефицита реактивной мощности приводит к развитию лавины напряжения [27], результатом которой может являться полный останов двигательной нагрузки с сопутствующей потерей электроснабжения потребителей.

Возникновение лавины напряжения особенно опасно для тепловых электрических станций, где в качестве электроприводов собственных нужд используются АД. Лавинообразный процесс опрокидывания двигательной

нагрузки приводит к нарушению процесса доставки, обработки и подготовки топлива для котлов и, как следствие, снижению объема рабочего тела (пара), поступающего на турбины генераторных агрегатов. В результате, полному отключению электрической станции или, в крайне редких случаях, развитию лавины частоты [28].

В АЭК и ЛСЭ, работающих параллельно с ЭС или группой источников РМГ, наибольший вклад в устранение небалансов мощности при пуске крупных АД берет на себя внешняя сеть. Сильная электрическая связь между отдельными элементами созданной энергосистемы обеспечивает малое допустимое отклонение параметров режима с сохранением балансов мощностей и, как следствие, позволяет эксплуатировать низко инерциальное маломощное генерирующее оборудование каждой ЛСЭ без резких изменений режимов его работы при смене состава нагрузочных узлов. При этом, процесс значительно утяжеляется при слабой электрической связи ЛСЭ с ПС. В представленных условиях, пуск крупного АД приводит к значительной просадке напряжения и, как следствие, снижению предела передаваемой мощности синхронной связи между ЛСЭ и внешней ПС. Увеличение перетока активной мощности из ПС при сниженном значении предела передаваемой мощности, изменение которого связано с низким уровнем напряжения, способно являться причиной потери динамической устойчивости синхронной связи с последующим возникновением асинхронного хода с повреждением генераторных агрегатов ввиду появления разрушительных динамических моментов на их валах, вероятным пробоем изоляции синхронных генераторов (СГ) и потерей электроснабжения потребителей в ЛСЭ.

ЛСЭ в автономном режиме является системой сопоставимой мощности единичных крупных АД и суммарной генерации. В автономном режиме генераторные агрегаты ЛСЭ вынуждены самостоятельно обеспечить режим по напряжению и частоте в условиях изменяющейся структуры потребления. Следует учитывать, что в качестве первичных двигателей генераторов в ЛСЭ часто применяются ГПУ или ГТУ совместно с дизельными генераторами (ДГ),

которые используются для резервирования, а также восстановления работы электрической станции после вынужденного отключения [29]. Особенностью эксплуатации ГПУ и ГТУ является высокая чувствительность к резким набросам/сбросам мощности (резким изменениям режима нагрузки). При резком изменении электрической нагрузки в первичных двигателях СГ возникает помпаж – срыв устойчивого режима газового двигателя, сопровождающийся микровзрывами в газозоудушном тракте из-за противотока газов с сильной вибрацией [30]. Технологическая автоматика с целью исключить появление разрушающего двигателя режима при возникновении большого скачка активной мощности заранее формирует сигнал на отключение генерирующего агрегата.

Также, особенностью ЛСЭ в автономном режиме является поддержание частоты и напряжений в узлах в допустимых диапазонах, которые регламентируются в соответствии с ГОСТ 32-144 [31]. Нормируемые значения отклонения частоты составляют не более ± 1 Гц в 95% времени интервала в одну неделю и не более ± 5 Гц в 100% времени интервала в одну неделю. Значительные отклонения частоты в ЛСЭ могут являться причиной возникновения вибраций первичных двигателей генераторных агрегатов, вызывающих ускоренный износ и/или повреждение ГТУ и ГПУ [32]. Особая чувствительность генераторных агрегатов к длительной работе на пониженной частоте накладывает дополнительные ограничения на допустимые режимы работы ЛСЭ.

Таким образом, в автономном режиме ЛСЭ, ввиду особых режимных и эксплуатационных условий, задача сохранения устойчивой работы нагрузки проявляется наиболее остро, т.к. ее нарушение сопряжено с серьезными последствиями: недоотпуском электрической и тепловой энергии (большая часть ЛСЭ работает в режиме когенерации); нарушением производственных процессов прочих потребителей; полной потерей энергоснабжения выделенного энергорайона.

Возможны следующие способы снижения влияния пусковых процессов АД на ПС:

- Замена двигателя с короткозамкнутым ротором на двигатель с улучшенными пусковыми характеристиками.
- Предварительная подготовка сети к пуску двигателя (изменение схемно-режимных условий).
- Применение различных способов пуска.

Существуют следующие варианты исполнения АД с улучшенными пусковыми характеристиками:

- Двигатель с глубокопазным ротором. Сопротивление данного типа двигателя изменяется в процессе пуска ввиду проявления скин-эффекта. В начальный момент времени весь ток ротора проходит по верхней части стержней, обладающих большим активным сопротивлением. В установившемся режиме ток проникает в нижнюю часть стержней, и машина ведет себя также, как и обычный АД с короткозамкнутым ротором. Двигатель с глубокопазным ротором характеризуется большим пусковым моментом и небольшим пусковым током;

- Двигатель с двойной «беличьей клеткой» на роторе. Ротор двигателя содержит две «беличьи клетки»: пусковую и рабочую. Активное сопротивление пусковой «беличьей клетки» много больше реактивного. В свою очередь, рабочая выполняется из стержней большего диаметра, что обеспечивает низкое активное сопротивление. В процессе пуска тока с увеличением скорости вращения постепенно заполняет тело ротора, частично переходя из пусковой части «беличья клетка» в рабочую. Снижение величины пускового тока достигается благодаря постепенному снижению активного сопротивления ротора АД ввиду проявления скин-эффекта.

Применение двигателей с улучшенными пусковыми характеристиками позволяет увеличить пусковой момент и снизить величину пускового тока, но требует реконструкции существующего электропривода, что приводит к

дополнительным затратам и продолжительному простоя оборудования. В большинстве случаев, внедрение подобных двигателей закладывается заранее при проектировании объекта.

АД с фазным ротором находят значительно меньшее применение и, зачастую, изготавливаются мощностью более 100 кВт. Ротор такого двигателя имеет трехфазную обмотку с щеточно-коллекторным узлом для подключения пусковых сопротивлений или, в некоторых случаях, внешнего источника питания. Процесс пуска АД с фазным ротором, ввиду опасности появления разрушающего действия пускового тока на обмотки двигателя при замыкании накоротко выводов щеточного узла, сопровождается постепенным шунтированием пусковых резисторов в цепи ротора с увеличением скорости вращения его вала. Введение дополнительных резисторов позволяет ограничить пусковой ток до допустимых значений (1,5 – 2,5 от номинального) и сделать пуск плавным (возможно постепенное увеличение момента АД путем изменения сопротивления ротора в соответствии с электрическими требованиями для ПС и двигателя и механическими требованиями приводного механизма).

К преимуществам применения АД с фазным ротором следует отнести:

- возможность регулировки скорости вращения ротора машины;
- высокий пусковой момент;
- сниженный пусковой ток;
- возможность работы в режиме двойного питания.

Малая распространённость АД с фазным ротором связана с рядом их недостатков:

- высокая стоимость;
- наличие щеточной системы;
- снижение КПД двигателя при снижении скорости вращения;

- увеличение сопротивления цепи ротора приводит к изменению механической характеристики двигателя, что приводит к большому изменению частоты вращения при резком изменении нагрузки на валу.

Зачастую, асинхронные машины с фазным ротором применяются в режиме двойного питания для решения специфических задач:

- На ветряных станциях производство активной мощности носит стохастический характер и регулировать подачу рабочего тела на лопасти не представляется возможным. В некоторых случаях, прибегают к установке асинхронных генераторов с фазным ротором [33]. На фазный ротор с вращающегося трансформатора через контактные кольца подается переменный ток, частота которого равна отклонению фактической частоты на статоре генератора от заданного (номинального) ее значения. Поддержание требуемой скорости вращения магнитного поля ротора позволяет добиться постоянства частоты ЭДС на статоре машины в нормальном режиме.

- В качестве механического фазоповоротного устройства, которое позволяет перераспределять потоки мощности в нормальных режимах или реализовывать фазовое управление для повышения динамической устойчивости системы.

- В качестве электромеханической вставки для связи систем с различными частотами. Скорость вращения ротора машины будет равна разности скоростей вращения магнитного поля статора и ротора.

Под предварительной подготовкой ЛСЭ к пуску АД понимается ряд мероприятий, направленных на: усиление электрической связи путем введения дополнительных (отключенных) линий электропередачи или изменение состава и режима работы генерирующего оборудования; введение доступных компенсирующих устройств (КУ) в сети; введение в работу накопителей электроэнергии с достаточным уровнем заряда. Как отмечается в [34], в корабельных энергосистемах, которые являются системами сопоставимой мощности, применяют предвозбуждение СГ, заключающееся в

подаче сигнала на повышение уставки автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) при пуске АД для обеспечения допустимого уровня напряжения в сети в его процессе. Сдерживающим фактором применения подобных способов в ЛСЭ являются юридические (заинтересованный потребитель и собственник генерации, зачастую, являются разными субъектами) и, как следствие, физические ограничения (отсутствие каналов связи с электрической станцией). В результате, большинство систем управления СГ реализованы по принципу обратной связи (по отклонению), а не компенсации (по возмущению) [35].

Тоже касается и введения дополнительных линий связи, которых в работе для снижения потерь мощности и так находится максимально возможное число (с учетом технических и режимных ограничений). Потребитель имеет возможность введения только тех линий, которые находятся в его юрисдикции, если таковые имеются.

Следует отметить, что накопители электрической энергии в ЛСЭ применяются только при наличии электроустановок на возобновляемых источниках энергии, в функции которых как раз входит обеспечение балансов мощности при недостаточной выработке энергии электрической станцией. Целенаправленная установка накопителя для снижения влияния пусковых процессов АД на ПС в узле нагрузки, являясь нерентабельной, как правило, не производится [36].

Наиболее вероятным видится введение в работу дополнительных компенсирующих устройств, установленных в узле нагрузки, которыми, как правило, являются батареи статических конденсаторов (БСК). При этом следует иметь в виду, что пуск АД сопряжен со снижением напряжения в ПС, что приводит к снижению влияния БСК на баланс реактивной мощности в электрической сети в процессе его разгона, ввиду отрицательного регулирующего эффекта по напряжению [37]. В результате, введение БСК не позволяет полностью нивелировать негативное влияние пуска АД на внешнюю ПС.

Для минимизации влияния пусков АД также используют ряд способов, направленных на снижение пускового тока. Применяемые способы пуска можно разделить на две группы [38]:

1. Классические:
 - Пуск переключением звезды на треугольник
 - Изменение конструкции АД (использование части обмоток)
 - Реостатный пуск
 - Пуск через автотрансформатор
2. На базе силовой электроники:
 - Плавный пуск
 - Частотный пуск

Способ пуска переключением «звезда–треугольник» заключается в подключении АД с короткозамкнутым ротором на полное напряжение сети со схемой соединения звезда с последующим переходом на схему соединения треугольник, напряжение на которой соответствует номинальному напряжению сети. Переключение производится при стабилизации скорости ротора, когда крутящий момент и момент сопротивления уравниваются. После переключения, двигатель выходит на естественную характеристику. Быстрое переключение на схему треугольник (30-50 мс) приводит к кратковременному броску тока, величина которого связана с текущими характеристиками остаточной ЭДС на статоре АД. Бросок тока можно значительно снизить путем введения дополнительной задержки (1-2 с) на переключение схем соединения (актуально только для электроприводов с большой инерцией).

Способ пуска переключением «звезда–треугольник» применяется для приводных механизмов с малым моментом сопротивления или для включения двигателей на холостом ходу (ХХ). Применение данного способа позволяет снизить пусковой ток АД, но требует наличия дополнительного оборудования, что влечет появление дополнительных затрат, а также приводит к снижению надежности.

Пуск двигателя основанный на применении части обмоток выполняется для двигателей специального исполнения, которые изготовлены с несколькими, зачастую с двумя, независимыми (разделенными) статорными обмотками с отдельными выводами. При пуске к ПС подключается только одна из статорных обмоток, что позволяет снизить значение пускового тока в два раза, но вызывает пропорциональное снижение пускового момента. После достижения установившейся скорости вращения в работу вводится вторая часть статорной обмотки и двигатель переходит в нормальный режим работы. Включение второй части обмотки статора, вызывающее непродолжительный бросок тока, не оказывает значительного воздействия как на двигатель, так и на ПС.

Реостатный пуск АД предполагает использование пусковых резисторов или реакторов, которые последовательно подключаются к обмоткам статора для снижения питающего напряжения и, следовательно, величины пускового тока. Продольные сопротивления отключают после стабилизации скорости двигателя. Напряжение, приложенное к статору двигателя, имеет минимальное значение при пуске и постепенно увеличивается по мере снижения тока двигателя в процессе разгона, что связано с уменьшением падения напряжения на последовательно подключённых резисторах. Такой способ пуска подходит для механизмов с моментом сопротивления нагрузки, который увеличивается с ростом скорости, например, для вентиляторов и центробежных насосов. Применение реостатного пуска приводит к: появлению относительно высокого пикового значения тока при пуске; увеличению стоимости системы пуска; снижению пускового момента и надежности. Пиковое значение тока при пуске снижают увеличением продольного сопротивления, что приводит к увеличению падения напряжения и, как следствие, к снижению пускового момента двигателя.

Пуска АД через автотрансформатор (АТ) заключается в подключении двигателя на пониженном напряжении к ПС (двигатель присоединен к обмотке низкого напряжения АТ) для снижения величины пускового тока. АТ

в процессе пуска уменьшает напряжение относительно номинального на 50-80%, обеспечивая плавный разгон и снижение потребляемого тока АД. Процесс пуска через автотрансформатор разделяется на следующие этапы:

1. Включение АД на пониженном напряжении. АТ, к обмоткам которого присоединен АД (по схеме “звезда”), подключается к ПС.
2. Двигатель разгоняется до установившейся скорости.
3. Размыкается одна из обмоток АТ, вторая – выполняет функцию продольный реактор для АД.
4. АТ шунтируется, АД выходит на естественную характеристику.

Способ пуска АД через АТ обычно используется в двигателях низкого напряжения и мощностью свыше 150 кВт. Недостатками данного способа являются: сниженный пусковой момент, высокая стоимость, наличие скачка тока при переходе на полное напряжение сети, низкая надежность.

Все представленные выше способы пуска относятся к “классическим” и основываются на снижении пускового тока путём снижения питающего напряжения. Для применения классических способов пуска необходимы специализированные схемы подключения и дополнительное оборудование, комбинация которых позволяет обеспечить его успешность путем создания подходящих условий для гарантированного пуска, зачастую, без механической нагрузки. При этом, основное внимание уделено только двигателю, оценка состояния ПС на момент пуска и в его процессе не производится. Представленные способы в изменяющейся структуре системы энергоснабжения не всегда позволяют обеспечить безопасное включение двигателя с минимальным влиянием на генерирующее оборудование и на прочую нагрузку сети.

Таким образом, к основным недостаткам классических способов пуска следует отнести:

- Снижение пускового момента
- Отсутствие возможности пуска под механической нагрузкой
- Увеличение времени разгона

- Отсутствует оценка состояния ПС
- Снижение надежности
- Требуется дополнительное оборудование

Все они были актуальны до развития силовой электроники. Широкое внедрение силовой электроники позволило разработать ряд устройств, которые являются более совершенной и компактной базой для создания аналогов классических способов пуска двигателя [39]. Одним из таких является устройство плавного пуска.

Устройство плавного пуска (УПП) – достаточно дешевая и эффективная система, состоящая из включенных встречно-параллельно силовых тиристоров, применяемая для пуска и остановки АД для снижения величины его пускового тока, регулирования крутящего момента, снижения ударного механического воздействия двигателя на приводной механизм. УПП, включаемый последовательно с АД, позволяет постепенно изменять уровень напряжения на статоре двигателя в соответствии с заданной характеристикой пуска (зависимости напряжения от времени). Пуск АД выполняется при напряжении 30-60 % от номинального с постепенным увеличением до уровня ПС по линейной/степенной или иной характеристике, что обеспечивает плавное сцепление двигателя с приводным механизмом с постепенным натяжением ремней привода. После разгона двигателя существует два варианта эксплуатации устройства: двигатель непрерывно работает через устройство плавного пуска; группа тиристоров шунтируется и не участвует в нормальной работе АД. Шунтирование позволяет обеспечить высокий срок службы УПП и снизить энергопотребление.

Ограничение величины пускового тока до 3-4 его номинальных значений достигается снижением питающего напряжения, что снижает крутящий момент АД. Способ подходит для механизмов с низким механическим сопротивлением при малой скорости вращения вала двигателя, допустим, вентиляторов и центробежных насосов и применяется с целью оптимизации величины режимных параметров двигателя в процессе пуска.

Для анализа гармонических искажений при прямом и плавном пусках АД в программном MATLAB/Simulink была создана цифровая модель, приведенная на рисунке 1.4. Цифровая модель рисунка 1.4 включает: ШБМ с номинальным напряжением 400 В; АД с короткозамкнутым ротором номинальной мощностью 75 кВт с изменяемым значением механического момента; коммутационный аппарат; блоки измерения режимных параметров.

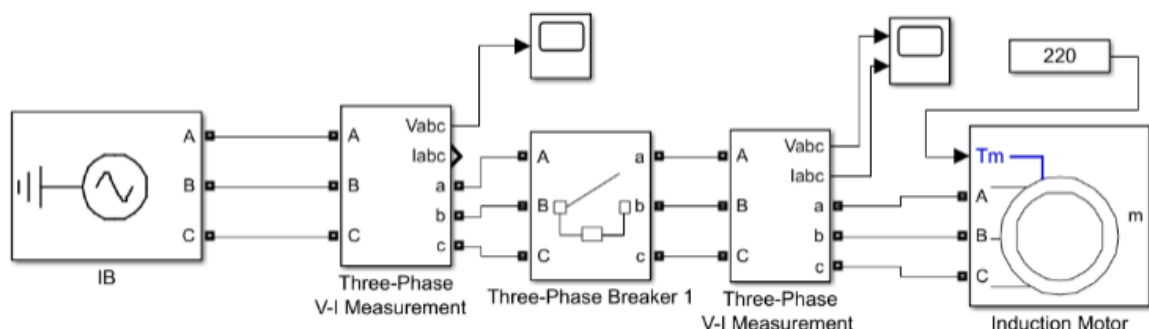


Рисунок 1.4 – Цифровая модель нагрузочного узла энергосистемы

На цифровой модели проведен расчет серии прямых и плавных пусков АД при вариации величины механического момента сопротивления приводного механизма при наличия/отсутствии насыщения магнитной системы. Анализ уровня гармонических искажений для каждого способа пуска АД в соответствии с [31] выполнялся по кривой напряжения, используя встроенный программный блок Simulink FFT Analysis. Исследования, проведенные на цифровой модели подключения АД к ПС, показали следующее:

- В процессе успешного прямого пуска АД не возникает существенных гармонических искажений. Их коэффициент уменьшается с увеличением механического момента сопротивления двигателя и лежит в диапазоне 0,15–1,5%. Результаты моделирования приведены на рисунке 1.5.
- В процессе плавного пуска АД наблюдались значительные гармонические искажения кривой напряжения, увеличивающиеся с ростом механической нагрузки двигателя, что связано со спецификой работы силовой

электроники [40]. Результаты моделирования приведены на рисунке 1.6. Максимальный коэффициент гармонических искажений составил 54,7%.

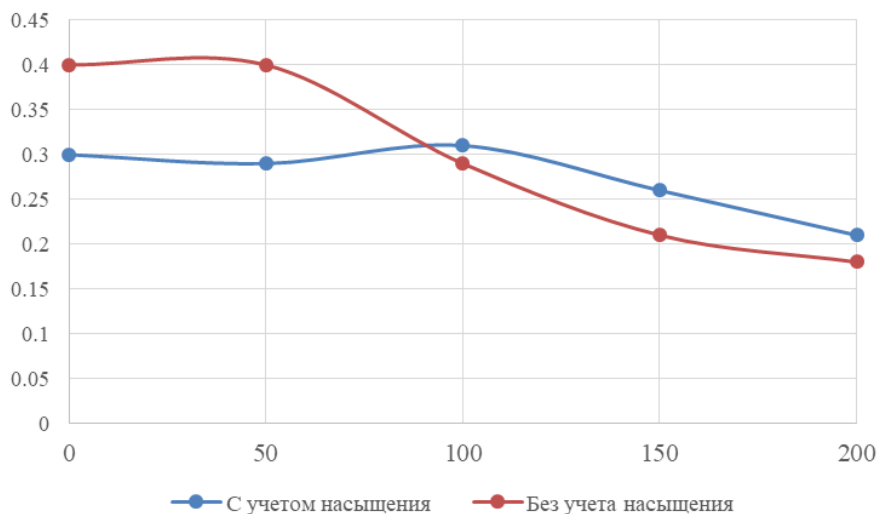


Рисунок 1.5 – Зависимость коэффициента искажения напряжения от механической нагрузки АД при прямого пуске

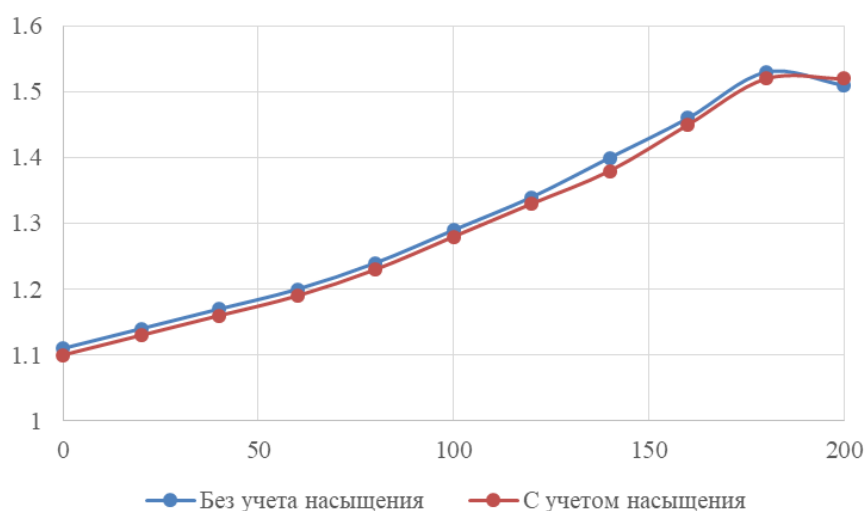


Рисунок 1.6 – Зависимость коэффициента искажения напряжения от механической нагрузки АД при плавном пуске

В результате, к недостаткам способа плавного пуска следует отнести:

- Увеличенная продолжительность пуска ввиду длительной работы двигателя со сниженным пусковым моментом.
- Значительная стоимость при высоких уровнях номинального напряжения.

- Исполнительное устройство является источником высших гармоник тока, что оказывает влияние на срок эксплуатации двигателя, а также служит причиной изменения моментно-скоростных характеристик двигательной нагрузки в смежных узлах ПС [41].

В настоящее время наиболее продвинутой и популярной технологией является частотный пуск АД. Частотный пуск – эффективная система пуска, используемая для контроля и регулирования скорости вращения ротора двигателя. Для его выполнения необходим частотный преобразователь, который включает в себя последовательно подключенные выпрямитель и инвертор. Выпрямитель, состоящий из силовых диодов, преобразует переменный ток в постоянный. Далее, инвертором, состоящего из силовых транзисторов, путем широтно-импульсной модуляции (ШИМ) формируется требуемая синусоида напряжения с заданной частотой и амплитудой, которая поступает на статор АД. Способ пуска в простейшем случае основан на снижении частоты пропорционально снижению напряжения. т.е. соблюдается следующее условие [42]:

$$\frac{U}{f} = const$$

В результате, при низком напряжении ток, потребляемый двигателем, снижается при сохранении величины электромагнитного момента, что позволяет производить пуск АД с меньшим воздействием на ПС. Применение частотно-регулируемого электропривода позволяет: регулировать скорость АД в широком диапазоне; выполнять пуск двигателя под нагрузкой при высокой инерции приводного механизма; производить пуск крупного двигателя в системе малой (конечной) мощности.

На практике частотные преобразователи, как правило, используются именно для плавного регулирования скорости вращения двигателя, снижение влияния пусков на ПС является побочным, но очень полезным эффектом.

К недостаткам применения частотного пуска следует отнести:

- Высокая стоимость;

- Искажение статической характеристики АД, что исключает регулирующий эффект нагрузки (снижение потребляемой мощности при снижении напряжения);
- Исполнительное устройство является источником высших гармоник тока, что оказывает влияние как на двигатель, так и на оборудование ПС;
- Требуется применения специально усиленных двигателей, устойчивых к воздействию высших гармоник тока, снижающих срок службы двигателей стандартного исполнения.

Способы пуска на основе силовой электроники также, как и классические, основываются на снижении пускового тока путём снижения питающего напряжения, но с более гибким управлением его амплитудой, а также частотой. При этом, для их применения необходимо дополнительное, изменяющее статические характеристики двигателя, дорогостоящее оборудование, которое позволяет: наиболее эффективно осуществлять пуск двигателей под механической нагрузкой; снижать динамическое воздействие на приводные механизмы в момент пуска; регулировать скорость вращения двигателя (при работе через частотный преобразователь). Также, как и у классических способов, оценка состояния ПС и ее способности принять новую нагрузку на момент пуска и в его процессе не производится, при этом, применение указанных способов в ПС сопоставимой мощности не всегда гарантирует безопасное включение двигателя с допустимым влиянием на генерирующее оборудование и на прочую нагрузку сети.

В таблице 1.1 приведено сравнение способов пуска АД, а в таблице 1.2 приведены их преимущества и недостатки.

Следует отметить, что наряду со способами на базе силовой электроники в настоящее время, по-прежнему, применяются и классические способы пуска, в т.ч. прямой (наиболее распространённый). Из таблиц 1.1 и 1.2 видно, что каждый из представленных способов пуска является компромиссным

решением со своими ограничениями и подходит для конкретного приводного механизма, режима электропривода, особенностей ПС.

Таблица 1.1 – Сравнение способов пуска АД

	Прямой пуск (DOL)	Звезда-треугольник	Часть обмотки	Фазный ротор	Резисторы	Автотрансформатор	Плавный пуск	Частотный пуск
Двигатель	Стандартный		Специальный		Стандартный			Усиленный
Стоимость	+	++		+++				+++
Пусковой ток	5-10 $I_{ном}$	2-3 $I_{ном}$	$\approx 2 I_{ном}$		$\approx 4,5 I_{ном}$	1,7-4 $I_{ном}$	4-5 $I_{ном}$	$I_{ном}$
Просадка напряжения	Высокая		Низкая					
Гармонические составляющие тока	Умеренные			Низкие	Умеренные		Высокие	
cosφ	Низкий		Умеренный			Низкий		Высокий
Кол-во запусков	Ограниченное	2-3 раза больше DOL	3-4 раза больше DOL	2-3 раза больше DOL	3-4 раза больше, чем DOL		Ограниченное	Высокое
Возможный крутящий момент	$\approx 2,5 M_{ном}$	0,2-0,5 $M_{ном}$	$\approx 2 M_{ном}$		$M_{ном}$	$\approx 0,5 M_{ном}$		1,5-2 $M_{ном}$
Температурное напряжение	Очень высокое	Высокое	Умеренное		Высокое	Умеренное		Низкое
Механический удар	Очень высокое	Умеренный		Низкий	Умеренный			Низкий
Нагрузка	Любая	Нет	Возрастающий момент	Любая	Насосы и вентиляторы			Небольшой ток

В соответствии с ГОСТ 183-74 и МЭК 60034-1-2007 систематизированы следующие режимы электродвигателей [43]:

- S1 – Продолжительный режим. Длительная работа с постоянной нагрузкой до равномерного установившегося нагревания.
- S2 – кратковременный режим. Цикл включает: работу с постоянной нагрузкой; остановку; охлаждение до температуры окружающей среды.
- S3 – Повторно-кратковременный режим. Цикл аналогичен S2, но без полного охлаждения до температуры окружающей среды.
- S4 – Повторно-кратковременный режим с влиянием пусковых процессов. Цикл включает: продолжительный пуск; работу с постоянной нагрузкой; остановку.
- S5 – Повторно-кратковременный режим с влиянием пусковых процессов и электрическим торможением. Цикл включает: продолжительный пуск; работа с постоянной нагрузкой; электрическое торможение.
- S6 – Перемежающийся режим. Цикл включает: работу с постоянной нагрузкой; работа без нагрузки.
- S7 – Перемежающийся режим с влиянием пусковых процессов и электрическим торможением. Цикл включает (без пауз): продолжительный пуск; электрическое торможение.
- S8 – Перемежающийся режим с периодически изменяющейся частотой вращения. Цикл включает (без пауз, для двигателей с возможностью изменения скорости вращения): работа с постоянной нагрузкой; работа с иной постоянной нагрузкой с измененной скоростью вращения.
- S9 – режим с неперiodическими изменениями нагрузки и частоты вращения.
- S10 – режим с дискретными постоянными нагрузками.

Режим механизмов определяется характером технологического процесса, в котором он участвует. Ориентировочно все процессы можно

разделить на следующие группы: транспортировки, обработки и преобразования энергии. В таблице 1.3 приведены типовые режимы, мощность, периодичность включения, кратность пускового и максимального момента по отношению к статическому моменту для наиболее распространенных механизмов [44]. В таблице приняты следующие обозначения двигателей: А – базового ряда, В – встроенные, Р – с повышенным пусковым моментом, С – с повышенным скольжением.

Таблица 1.2 – Преимущества и недостатки различных способов пуска асинхронного двигателя

Способ пуска	Преимущества	Недостатки
Прямой пуск	Простой, быстрый, экономичный, надежный	Высокий пусковой ток, значительные температурные напряжения
Изменение конструкции	Сниженный пусковой ток, возможность регулирования скорости, повышенный пусковой момент	Высокая стоимость, сложность конструкции
Пуск «звезда-треугольник»	Снижение пускового тока	Пониженный пусковой момент, наличие скачков тока при переключении, низкая надежность
Автотрансформаторный	Снижение пускового тока	Высокая стоимость, пониженный пусковой момент, наличие скачков тока, низкая надежность
Реостатный	Снижение пускового тока	Высокая стоимость, пониженный пусковой момент, низкая надежность
Плавный	Плавное сцепление с приводным механизмом, снижение пускового тока	Пониженный пусковой момент, наличие высших гармоник
Частотный	Значительное снижение пускового тока, плавное сцепление с приводным механизмом, возможность плавного регулирования скорости вращения двигателя в широком диапазоне	Высокая стоимость, наличие высших гармоник, длительная работа только при использовании специализированного оборудования, искажение статической характеристики двигателя

Из таблицы 1.3 видно, что для большинства приводных механизмов АД в момент коммутации требуется преодолеть высокий механический момент, что приводит к необходимости выбора подходящего способа пуска, не препятствующего их нормальной работе и частоте включения (использование систем размыкания двигателя и приводного механизма для его пуска на ХХ недопустимо).

Таблица 1.3– Параметры наиболее распространенных механизмов

Механизмы	Кратность момента по отношению к статическому моменту механизма		Реж. раб.	Частота вкл., 1/ч	Р, кВт	Модиф. двигателя
	Пускового	Максимального				
Насосы:						
центробежные, осевые	0,3	1,5	S1-S3	1-30	0,1-360	A
вакуум-насосы	0,3	1,4				A
поршневые	1-1,5	2				P, C
Вентиляторы:						
центробежные, осевые	0,3	1,1-1,3	S1	1-6	0,1-100	A
дымососы	0,5	1,75				A
Шнеки	1-1,5	2-2,5	S1	1-6	0,1-300	A, P
	2-3	2,5-3				
Манипуляторы, толкатели, кантователи	2,5-3	2,5-3	S1-S5	1-6	0,1-30	A, C
Задвижки	3-3,5	3-3,5	S1-S3	6-30	0,1-10	A, C
Центрифуги, сепараторы	2,25	2,25	S1	1-6	0,1-300	A, C
Машины барабанного типа	1,25	2,5	S1-S5	1-6	0,1-100	A, C
Компрессоры:						
лопаточные	0,3	1,5	S1	1-6	0,1-300	A, C
объемные	2-2,5	2-2,5				

Классические способы пуска и плавный пуск, зачастую, подходят только для двигателей, механический момент которых возрастает прямо пропорционально или квадратично от частоты вращения двигателя, т.е.

начальный момент приводного механизма значительно меньше пускового. В результате, для преодоления высокого механического момента приводного механизма существует необходимость применения прямого пуска АД базового ряда или с улучшенными пусковыми характеристиками. В таком случае двигатель и приводной механизм соединяют плоскими или клиновидными ремнями, что позволяет снизить воздействие на механизм рывков и ударов, возникающих при пуске. К наиболее благоприятным режимам нагрузки для прямого пуска можно отнести те, которые предполагают, как можно меньше включений АД: S1, S2, S6, а также S3, S4 и S5 при низкой частоте включения. Оставшиеся же режимы предполагают работу без пауз с периодическим электрическим торможением, повторным разгоном двигателя и изменением скорости его вращения. В таких случаях, для снижения пускового тока и регулирования скорости вращения двигателя следует применять частотный пуск. Следует отметить, что повсеместное применение частотного пуска нецелесообразно ввиду высокой стоимости (особенно высоких классов напряжения двигателя) и значительного искажения статических характеристик (может являться причиной развития аварийного режима).

Основным сдерживающим фактором широкого применения прямого пуска АД, особенно в изменяющейся структуре энергоснабжения, является негативное воздействие пускового тока на элементы ПС, что наиболее остро проявляется при работе двигателя в ЛСЭ сопоставимой мощности. В результате, необходим ряд устройств, которые ограничивают влияние пускового процесса, как на сам двигатель, так и на электрическую сеть путем его отключения при недопустимых отклонениях параметров режима для обеспечения нормальной работы ПС в условиях неудачного прямого пуска АД.

1.3 Средства и способы контроля успешности прямых пусков асинхронных двигателей в энергосистемах малой мощности

Под успешным пуском АД понимается процесс перехода двигателя из статического состояния в установившееся с рабочей скоростью вращения. При этом, параметры режима сети в процессе пуска с после него должны оставаться в допустимом диапазоне, безопасном как для двигателя, так и для прилегающей сети.

В ЛСЭ остро стоит задача поддержания напряжения и частоты в допустимых диапазонах, т.к. эту функцию берут на себя генерирующие агрегаты, мощность которых сопоставима с потребляемой крупными АД при их малой электрической удалённости от генераторных шин. В результате, большинство способов пуска АД попросту неприменимы в ЛСЭ вследствие их неэффективности. Исключение составляют лишь устройства, созданные на базе силовой электроники, которые требуют значительных затрат, а также являются источниками высших гармоник.

Для обеспечения бесперебойной работы ЛСЭ и защиты АД устанавливают ряд противоаварийных устройств [45]:

- реле минимального напряжения;
- тепловое реле;
- устройства защиты от короткого замыкания (КЗ).

Реле минимального напряжения, функцию которого для двигателей низкого напряжения может выполнять магнитный пускатель, подает команду отключения на коммутационный аппарат АД при снижении напряжения ниже заданного допустимого значения в процессе пуска, установившейся работы или при обрыве одной или нескольких фаз. Применение реле минимального напряжения позволяет исключить опрокидывание АД и, как следствие, его работу в режиме КЗ с потреблением пускового тока, что в большинстве случаев препятствует возникновению и развитию лавины напряжения в ПС. При этом минимально допустимое напряжение определяется на основе

паспортных данных с некоторыми поправочными коэффициентами, весьма приблизительно учитывающими ограниченность мощности, влияние электрической удаленности АД от источников в ПС, что приводит к получению завышенного значения критического напряжения двигателя и, соответственно, неэффективности защиты АД и ПС от неуспешных пусков крупных двигателей.

Тепловое реле, установленное последовательно с двигателем, или (при больших значениях тока) через трансформатор тока (ТТ), при превышении допустимого потребляемого тока АД спустя время на нагревание биметаллической пластины размыкает контакты, отключая двигатель от ПС. Тепловое реле предназначено для защиты АД от перегрева, который может быть вызван перегрузкой в процессе пуска и, в некоторых случаях, потерей фазы. Тепловое реле надежно защищает АД от перегрузок при работе в режиме S1 (продолжительный режим), в противном случае, при повторно-кратковременных режимах возможны ложные срабатывания, для избавления от которых необходимо закрутить уставку устройства. Значительным недостатком является длительность срабатывания, которая напрямую связана с инерционностью защиты.

Защита двигателя от КЗ выполняет свою функцию только в аварийных режимах АД и предназначена для его отключения при внутренних или внешних (между коммутационным аппаратом и двигателем) замыканиях фаз или фаз на землю в сетях с заземлённой нейтралью. Защита может быть реализована с использованием предохранителей или токовых реле. Применение предохранителей позволяет снизить воздействие КЗ на ПС ввиду высокого быстродействия, но требует замены отработавших элементов вручную в отличие от токовых реле, выдающих команду отключения на коммутационный аппарат.

Контроль успешности пуска АД осуществляется либо элементами управления преобразовательных устройств (происходит опосредованно, например, при превышении уставки по предельному потребляемому току

преобразовательное устройство отключается), либо при помощи визуального контроля (непосредственного наблюдения за процессом при пуске двигателя). При этом, отключение АД от ПС производится только по факту отклонения подконтрольных напряжения и тока от допустимых значений без учета: состояния ПС (параллельный или автономный режим работы ЛСЭ); изменения частоты при пуске; влияния частоты на процесс пуска; продолжительности пускового процесса. Иными словами, существующие устройства пуска и защиты осуществляют контроль успешности пуска двигателя только с точки зрения безопасности режима для объекта управления (АД), плохо учитывают влияния процесса пуска на ПС и не выполняют прогноз изменения режимных параметров в процессе пуска (отключение происходит по факту превышения заранее заданных уставок), что, являясь значительным недостатком, приводит к неэффективности их применения в ЛСЭ [46].

Малозатратным средством обеспечения эффективности применения прямого пуска АД в ЛСЭ может служить специальная автоматика контроля его успешности с противоаварийным прерыванием на ранних стадиях развития неуспешности. Ее применение, не требуя изменения конструкции АД, позволит снизить негативное влияние процессов неуспешных прямых пусков на сам двигатель и ПС за счет прогностической оценки их осуществимости на ранних этапах и автоматического отключения при выявлении критических условий, минимизируя продолжительность существования аварийного режима.

Априорный контроль успешности пуска АД в ЛСЭ способствует:

1. Увеличению числа двигателей АД, для которых возможно применение прямого пуска;
2. Повышению уровня интеллектуализации нагрузки в электрической сети, при котором устройства управления способны оценивать текущее состояние ПС и делать выводы о возможности включения АД и обеспечения его безопасности;

3. Предотвращению отключения генераторных агрегатов ввиду возникновения недопустимых небалансов активной, реактивной мощностей в сети и опрокидывания двигателей смежных узлов в процессах неуспешных пусков подконтрольного АД путем их прерывания на ранней стадии;

4. Возможности частичной диагностики АД в процессе эксплуатации.

Выводы по главе 1

1. В рамках концепции развития современной энергетики создание активно-адаптивных электрических сетей на базе РМГ на углеродном топливе ЛСЭ, способных работать, как автономно, так и параллельно с внешней сетью с возможностью выдачи свободной мощности, является приоритетным направлением развития электроэнергетики на уровне распределительных электрических сетей.

2. Массовое внедрение РМГ, способной работать в режиме острова (автономно или параллельно с внешней ПС) с формированием выделенного энергорайона в электрическую сеть привело к разукрупнению генерирующих мощностей в ПС и электрическому сближению генерирующего оборудования и нагрузочных узлов и, как следствие, появлению множества ЛСЭ соизмеримой мощности генерации и крупных АД, в которых задача обеспечения устойчивой работы ЛСЭ и нагрузки проявляется наиболее остро.

3. Существующие способы контроля успешности пуска АД, используемые в больших энергосистемах, в ЛСЭ соизмеримой мощности не применимы, т.к. не учитывают степень влияния процесса пуска на ПС в ее актуальном (текущем) состоянии и не осуществляют прогноз изменения режимных параметров в процессе пуска для его заблаговременного прерывания в условиях неуспешности.

4. Неэффективность применения существующих способов контроля успешности пуска АД в ЛСЭ служит основанием для разработки специальной автоматики, предназначенной для снижения негативного влияния процессов неуспешных прямых пусков на двигатель и ПС за счет прогностической оценки их осуществимости на ранних этапах путем автоматического отключения при выявлении критических условий.

ГЛАВА 2 МНОГОЭТАПНЫЙ ПРОГНОСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕШНОСТИ ПРЯМЫХ ПУСКОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

2.1 Взаимосвязи параметров питающей сети и асинхронного двигателя, определяющие успешность его пуска в системах соизмеримой мощности

Пуск крупного АД в ЛСЭ оказывает значительное влияние на режимные параметры ПС с возможностями возникновения и развития аварийных режимов, что в свою очередь также оказывает влияние на успешность пуска двигателя. Оценить влияние и взаимосвязи режимных параметров и характеристик ПС и АД на его пуск, можно путем анализа изменений моментно-скоростной характеристики АД при пуске в системах бесконечной и соизмеримой мощностей ПС и АД. Моментно-скоростная характеристика представляет зависимость момента АД от скольжения, который определяется в соответствие с общеизвестным выражением:

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{\omega_{\text{С}}}, \quad (1)$$

где: $P_{\text{ЭМ}}$ – электромагнитная мощность, передаваемая из статора в ротор посредством вращающегося магнитного поля, $\omega_{\text{С}}$ – угловая скорость магнитного поля статора, $M_{\text{ЭМ}}$ – электромагнитный момент АД. На рисунке 2.1. приведены моментно-скоростные характеристики АД при вариации постоянных напряжений на его шинах. Из рисунка 2.1. видно, что за снижением напряжения на шинах АД следует снижение электромагнитного момента, который приводит во вращение ротор двигателя и приводной механизм. Снижение электромагнитного момента при включении АД может стать причиной невозможности пуска или значительного увеличения его продолжительности и, как следствие: перегрева двигателя; длительного воздействия пускового тока на ПС, пониженного напряжения в сети с

вероятным «опрокидыванием» (нарушением устойчивости режима) других двигателей в ПС.

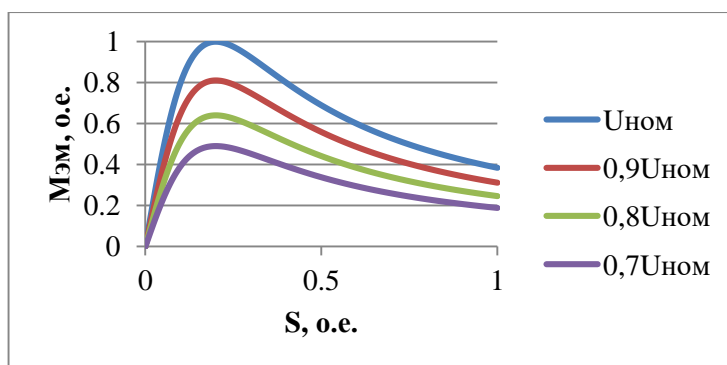


Рисунок 2.1 – Моментно-скоростная характеристика АД при различных установившихся напряжениях ПС

В ЛСЭ в соответствии с ГОСТ [31] частота может отклоняться, в т.ч. при пуске АД, в широком диапазоне, составляющем ± 5 Гц. Данная особенность несвойственна большим энергосистемам, что требует оценки степени влияния частоты на устойчивость и процесс пуска АД. На рисунке 2.2 приведены моментно-скоростные характеристики АД при вариации частоты ПС и постоянстве напряжения на его шинах. Из рисунка видно, что снижение частоты ПС приводит к увеличению электромагнитного момента, критического скольжения и снижению рабочего скольжения АД, что является благоприятным фактором с точки зрения процесса пуска и устойчивой работы двигателя. Однако, следует отметить, что положительное влияние снижения частоты сохраняется только при малом отклонении частоты от номинальной в зоне, где потери на рассеивание в роторе и статоре превышают потери на намагничивание. Соотношение между этими составляющими в обычных АД таково, что характер изменения результирующей реактивной мощности определяется потерями на рассеивание в роторе и статоре при малых отклонениях частоты и потерями на намагничивание при значительных. В результате, положительное влияние снижения частоты может смениться на отрицательное ввиду появления роста потребления реактивной мощности,

которое может приводить к уменьшению напряжения ПС и способствовать развитию аварийного процесса.

Прямой пуск АД в ЛСЭ связан как со снижением напряжения, так и с изменением частоты в ПС, влияние которых на его процесс различно и требует совместного учета. В [47] указывается, что максимальный (критический) момент двигателя остается постоянным, если $U / f = const$ (при одновременном изменении частоты и напряжения). В таком случае, для максимального момента будет справедливо:

$$M_{mf} = M_{m0} \left(\frac{U}{f} \right)^2, \quad (2)$$

где: M_{m0} – максимальный момент АД; M_{mf} – максимальный момент с учетом одновременного изменения напряжения и частоты. Однако, при пуске АД в ЛСЭ условие 2 не выполняется, т.к. изменения напряжения и частоты ПС в общем случае слабо коррелированы между собой. Возможность его использования в частных и общем случае требует проведения дополнительных исследований.

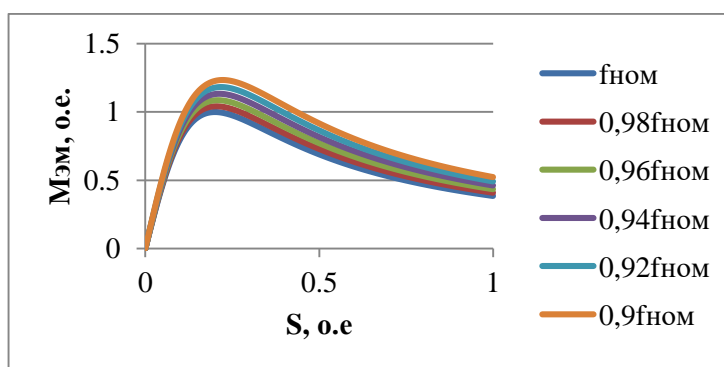


Рисунок 2.2 – Моментно-скоростная характеристика АД при вариации постоянной частоты ПС

На процесс пуска АД значительное влияние оказывает также вид приводного механизма, определяющий момент сопротивления и инерцию вращающихся масс механизма в целом, что очевидно из уравнения движения ротора АД:

$$T_j \frac{dS}{dt} = M_{\text{сопрт}} - M_{\text{эм}}, \quad (3)$$

где: $M_{\text{сопрт}}$ – момент сопротивления приводного механизма на валу АД; T_j – механическая постоянная инерции вращающихся масс нагруженного двигателя; S – скольжение АД, равное относительной разности скоростей вращения магнитного поля статора и механического вращения ротора.

Выражением (3) определяется динамика разгона ротора АД в соответствие с разницей фактических значений электромагнитного и механического моментов двигателя в заданный момент времени, определяющей ускорение нагруженного ротора. Величина механического момента на рассматриваемом интервале определяется производственным процессом исполнительного механизма и видом его механической характеристики, множество которых принято разделять на следующие основные группы:

1. Вращающий момент не зависит от частоты вращения (постоянный механический момент). К механизмам, имеющим такую характеристику, можно отнести: поршневые насосы и компрессоры, создающие постоянное давление; подъемные механизмы; транспортеры; прокатные станы; мельницы; станки с неизменным усилием нарезания;

2. Вращающий момент возрастает пропорционально частоте вращения. Зависимость характерна для генератора постоянного тока с независимым возбуждением;

3. Момент сопротивления изменяется обратно пропорционально частоте вращения (обратный вентиляторный механический момент). К механизмам, имеющим такую характеристику, можно отнести: металлорежущие станки, мельницы, бетономешалки;

4. Момент сопротивления возрастает пропорционально квадрату частоты вращения (вентиляторный механический момент). К механизмам, имеющим такую характеристику, можно отнести: центробежные насосы, вентиляторы и воздуходувки.

На рисунке 2.3 приведены моментно-скоростные характеристики АД и приводных механизмов, нумерация которых соответствует списку, приведенному выше. Из рисунка 2.3 видно, что наиболее тяжелыми с точки зрения обеспечения успешности пуска являются механизмы с обратной вентиляторной и постоянной характеристикой сопротивления, т.к. на начальном этапе пуска они имеют малую разницу ускоряющего и тормозящего моментов и, как следствие, связаны с наибольшими термическими перегрузками и длительностями пускового процесса АД.

При пуске АД под механической нагрузкой с вентиляторной или возрастающей пропорционально частоте вращения характеристикой наиболее опасным является режим, в котором ускорение ротора в процессе пуска снижается до нуля и двигатель переходит в устойчивый режим работы в зоне высоких скольжений. В зоне высоких скольжений АД потребляет пусковой ток с большой реактивной составляющей, что вызывает длительные просадки напряжения в ПС.

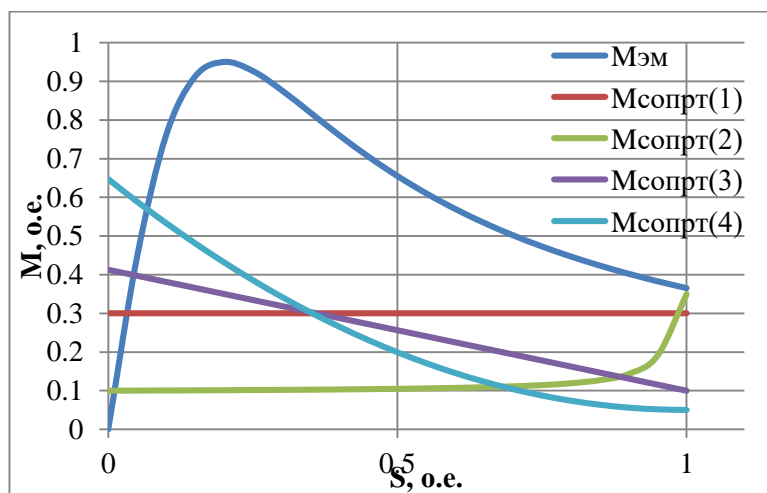


Рисунок 2.3 – Моментно-скоростные характеристики АД с разными видами приводных механизмов

На реальном производстве, зачастую, отсутствует классификация и учет механических характеристик нагрузки, что затрудняет учет их влияния на процесс пуска АД. При этом, АД стандартной конструкции не оснащены датчиками скорости вращения ротора, измерения потоков в магнитном зазоре,

также отсутствует возможность прямого измерения режимных параметров роторной обмотки (короткозамкнутого контура), измерение которых позволило бы восстановить механическую характеристику приводного механизма. Управление режимом и контроль работы АД, как правило, производится только по режимным параметрам статора с косвенным учетом параметров ротора и механической части исполнительного механизма.

В результате, основными факторами, определяющими успешность пуска двигателя в ЛСЭ, являются:

- Механическая инерционность ротора АД с его нагрузкой.
- Частотная характеристика и величина механического момента на валу АД.
- Наличие других работающих АД в сети.
- Сила электрической связанности источников и двигателей.
- Соотношение мощностей эквивалентного генерирующего источника и АД
- Частота и напряжение в точке подключения в момент пуска двигателя
- Эффективность поддержания частоты и напряжения в генераторных узлах.

Учитывая все значимое оборудование ЛСЭ и влияющие факторы, принципиальная схема для моделирования и исследования пусков АД в ЛСЭ с учетом влияния и взаимодействия значимых факторов будет иметь вид, представленный на рисунке 2.4.

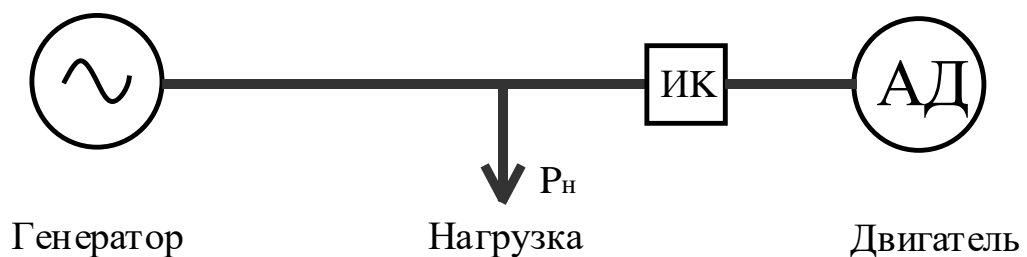


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема ЛСЭ с АД

ЛСЭ состоит из эквивалентного генератора с АРС и АРВ, промежуточной нагрузки, крупного АД с приводным механизмом и измерительного комплекта (ИК), включенного в цепи питания двигателя. При этом устройства управления в нагрузочных узлах контролируют только локальные электрические режимные параметров при помощи ИК двигателя.

2.2 Локальный контроль факторов успешности пуска асинхронного двигателя в локальной системе энергоснабжения

Для контроля автоматикой успешности пуска АД необходимо определять:

- значимые для процесса электрические и механические параметры АД;
- эквивалентные параметры, характеризующие схемно-режимное состояние ПС на момент пуска;
- статические и динамические критические условия успешности пуска АД;
- продолжительность пуска АД.

Под критическими условиями пуска АД понимаются предельные значения параметров режима и их сочетаний на отдельных этапах процесса, определяющие переход двигателя из статического состояния в установившееся с рабочей скоростью вращения за допустимое время при допустимом их отклонении.

До включения АД в сеть невозможно определить эквивалентные параметры текущего схемно-режимного состояния ЛСЭ по результатам контроля только режимных параметров двигателя. Такая возможность возникает при регистрации динамических параметров АД на некотором интервале времени (порядка 0.3 с) непосредственно после его включения в сеть. Этот относительно короткий минимальный интервал времени,

достаточный для оценки эквивалентных параметров схемно-режимного состояния ПС и АД назовем *зондирующим интервалом*.

Рассмотрим возможности определения эквивалентных параметров текущего схемно-режимного состояния ЛСЭ и АД и проявления части факторов успешности его пуска по измерениям напряжения и тока внутри зондирующего интервала:

- Сила электрической связанности эквивалентного источника и двигателя может быть определена по величине снижения напряжения в точке подключения и пускового тока АД.
- Соотношение номинальных мощностей АД и эквивалентного генерирующего источника принципиально может быть определено по реакции частоты сети на наброс активной мощности при включении двигателя в сеть (по производной частоты сети).
- Наличие других работающих АД в ПС может косвенно учитываться в составе обобщенной нагрузки ЛСЭ, при этом оно особо значимо только при отсутствии экспресс прерывания неуспешных пусков АД, т.к. для возникновения лавинообразного процесса опрокидывания АД необходимо достаточно длительное время (2-5 с) [48].
- Эффективность поддержания частоты и напряжения регуляторами может быть определена только с задержкой 0.5-1.0 с, превышающей длительность зондирующего интервала, ввиду инерционности регулятора и обмотки возбуждения [19].
- Механический момент двигателя и его частотная характеристика могут быть определены только при наличии информации о скорости вращения ротора и потребляемой активной мощности, что связано с его конструктивной доработкой и является крайне нежелательным. Интерес представляет контроль обычных двигателей, и тут все зависит от конкретных условий их применения:

- Для двигателей, работающих с регулярными механическими условиями пуска, возможно их использование из ретроспективных данных.
- Для двигателей с циклическими механическими режимами следует принимать наиболее неблагоприятные условия.
- Для двигателей без возможностей получения, либо при отсутствии ретроспективных данных возможно принятие в качестве пускового момента его значения в момент последнего отключения

2.3 Поэтапная декомпозиция условий и прогностический контроль успешности пуска асинхронного двигателя в локальной системе энергоснабжения

Различие в характере и скорости изменения режимных параметров вынуждает производить оценку возможности пуска АД в его процессе поэтапно. Задачей многоэтапного прогностического контроля успешности пуска АД в ЛСЭ является прерывание процесса пуска двигателя в условиях его неуспешности на заданных этапах проверки до возникновения опасных режимов в ПС, как для нагрузки, так и для генераторных агрегатов при измерении режимных параметров только в цепях питания статорных обмоток двигателя. Применение соответствующей автоматики позволит повысить надежность электроснабжения потребителей, избежать возникновения аварийных режимов и снизить расход ресурса оборудования энергоблоков и двигателей в ЛСЭ.

Для создания автоматики контроля пуска АД в ЛСЭ необходимы: условия успешности; корректные модели элементов ЛСЭ для определения критических параметров режима и методы их параметрической идентификации; поэтапный алгоритм контроля успешности на базе модели прогностической оценки осуществимости пуска двигателя.

В таблице 2.1 приведена сводка факторов, определяющих успешность пуска АД, с их разделением на системные (определяемые параметрами системы энергоснабжения) и объектные (определяемые параметрами пускаемого двигателя). Обобщенно приведенные факторы могут быть представлены группой необходимых и достаточных условий успешности пуска АД:

1) *Допустимость частоты в ЛСЭ.* Частота в ЛСЭ не должна снижаться ниже заданного технического минимума, при прохождении которого происходит отключение генерирующих агрегатов, при этом, она должна быть достаточна для успешного пуска АД:

$$f_{кр} > f_c > f_{\min}, \quad (4)$$

где: $f_{кр}$ – предельное значение частоты в сети для успешного пуска АД;

f_c – значение частоты при пуске двигателя;

f_{\min} – предельно допустимое минимальное значение частоты в ЛСЭ.

2) *Допустимость снижения напряжения в сети и его продолжительности для контролируемого двигателя и прочей двигательной нагрузки.* При пуске АД возникает дополнительное падение напряжения в элементах сети, снижающее узловые напряжения потребителей. Работа на пониженном напряжении приводит к увеличению длительности разворота нагруженного двигателя и, как следствие, увеличению продолжительности воздействия пускового тока на тело статора и ротора. Причем, чем продолжительнее процесс пуска, тем выше вероятность потери устойчивости смежных двигателей с последующим возникновением аварийного режима в ЛСЭ. В результате, напряжение в процессе пуска должно быть выше критического, а также достаточным для обеспечения допустимой его продолжительности:

$$U_{д} > U_{кр} \quad (5)$$

$$t_{доп} > t_{пуск}, \quad (6)$$

где: U_d – напряжение на шинах АД; $t_{доп}$ – максимально допустимое время пуска АД по условию допустимости снижения напряжения в смежных нагрузочных узлах или по условию предельного термического воздействия; $U_{кр}$ – минимальное напряжение для успешного пуска АД, $t_{пуск}$ – расчётное время пуска.

Таблица 2.1 – Факторы, оказывающие влияние на успешность пуска АД

№	Наименование	Критическое значение	Физические или технологические последствия	Примечание
Системные				
1.1	Снижение питающего напряжения при пуске АД	$U_{дв} > U_{кр}$	Снижение пускового момента двигателя	В нормативном документе по расчету устойчивости энергосистем [49] регламентируется принимать критическое напряжение в узлах нагрузки равное $0.7 U_{ном}$ при отсутствии специальных исследований
1.2	Повышение частоты ($f > f_{ном}$)	$f < f_{кр}$	Снижение пускового момента двигателя	Определяется связанностью момента с угловой скоростью $M = P/\omega$
1.3	Снижение частоты ПС ($f < f_{ном}$)	$f_{min} < f$	Отключение генерирующего оборудования	Технологическое ограничение генерирующего оборудования
1.4	Длительный характер процесса пуска	$t_{пуск} < t_{пуск.кр}$	Малая разность электромагнитного и механического моментов	Ограниченность термического воздействия
1.5	Возникновение условий опрокидывания других двигателей в сети	$U_{двi} > U_{кри} \Delta t > \Delta t$	Работа с нагрузкой выше максимального электромагнитного момента при снижении напряжения ниже критического	Вероятность возникновения лавины напряжения
Объектные (двигатель)				
2.1	Высокая инерционность приводного механизма	$J > J_{кр}$	Длительный разгон двигателя до рабочей скорости	Непредсказуемость механической нагрузки

Продолжение Таблицы 2.1

2.2	Низкий пусковой момент	$M_{\text{пуск}} > M_{\text{сопрот}}$	Длительный разгон двигателя до рабочей скорости	Работа при сниженном напряжении питания вследствие протекания пускового тока по элементам сети с высоким сопротивлением
2.3	Высокое значение пускового тока	$t_{\text{пуск}} < t_{\text{доп}}$	Просадка напряжения в сети	Ограниченность допустимого термического воздействия
2.4	Величина механического момента при пуске	$M_{\text{пуск}} > M_{\text{сопрот}}$	Динамика пуска	Непредсказуемость механической нагрузки

Необходимыми являются условия, соблюдение которых гарантирует разгон двигателя до рабочей скорости с точки зрения объектных факторов. Достаточными являются условия, соблюдение которых гарантирует допустимое отклонение параметров режима в процессе пуска (системный фактор) и безопасную с точки зрения термической стойкости его продолжительность (объектный фактор).

При помощи неравенств (4-6) имеется возможность определить допустимость текущих режимных параметров относительно их критических значений. Под *критическими параметрами* ЛСЭ при пуске АД понимается предельная величина параметров режима, достаточная для перехода двигателя из статического состояния в установившееся с рабочей скоростью вращения за допустимое время при допустимом их отклонении. Критическими параметрами режима для успешного пуска АД по необходимым условиям являются: критическое напряжение на шинах двигателя (условие (5)); критическая частота питающего напряжения ($f_{кр}$) (левая часть двойного неравенства условия (3)). К критическим параметрам режима для успешного пуска АД по достаточным условиям следует отнести: предельное время пуска (условие (6)); минимальное значение частоты в ЛСЭ (правая часть двойного неравенства условия (3)).

Анализ работ по пускам двигателей показал, что на данный момент не существует конкретного временного ограничения на допустимую продолжительность процесса пуска АД, сопровождающегося значительными отклонениями режимных параметров в системах соизмеримой мощности, до его прерывания, которая бы могла соответствовать предельному времени зондирующего интервала. В литературе упоминается только допустимая длительность глубокого снижения напряжения для узлов двигательной нагрузки, которая не должна превышать 0.11 с для ее возвращения в устойчивый режим работы без опасных схемных и режимных последствий для ПС [19]. Принимая во внимание допустимую продолжительность глубокого снижения напряжения, для реализации априорного контроля успешности необходимо определить предельную длительность зондирующего интервала прямого пуска АД, не приводящую к формированию аварийных режимов в ЛСЭ на раннем этапе процесса.

Для определения допустимой продолжительности зондирующего интервала прямого пуска в программном пакете MATLAB/Simulink был смоделирован ряд отключений АД от ЛСЭ с последующим включением через заданный промежуток времени (эквивалент глубокого снижения напряжения на шинах прочей нагрузки при пуске мощного двигателя). Предельной продолжительностью зондирующего интервала являлось время, за которое двигатель с заданным моментом торможения и инерцией замедлится до величины критического скольжения (в момент восстановления напряжения находится на границе линейной области моментно-скоростной характеристики), выше которого его включение при потреблении пускового тока создаст опасность наступления лавины напряжения в ПС. Данный вид возмущения создает наиболее тяжелые условия для восстановления нормальной устойчивой работы двигательной нагрузки, т.к. электромагнитный момент равен 0 (исключение составляет только режим подпитки КЗ со стороны АД, который при анализе нормальных переходных процессов рассматривать не имеет смысла).

В созданных условиях время выбега АД зависит от величины механического момента торможения и величины суммарной инерции двигателя и приводного механизма. По процессам выбега при вариации момента сопротивления приводного механизма и суммарной инерции двигателя была определена допустимая продолжительность зондирующего интервала прямого пуска в зависимости от заданных механических параметрах электропривода.

Зависимости времени выбега двигателя от постоянной механической нагрузки и инерции АД мощностью 75 кВт приведены на рисунке 2.5. Из рисунка 2.5 видно, что чем больше инерция ротора АД, тем продолжительнее выбег. В технической литературе отсутствует информация о степени влияния конкретных приводных механизмов на суммарную инерцию АД. Как результат: минимальный момент инерции двигателя был принят равным паспортному, учитывающему только массогабаритные параметры ротора; максимальный – инерции двигателя той же мощности, но с двумя парами полюсов.

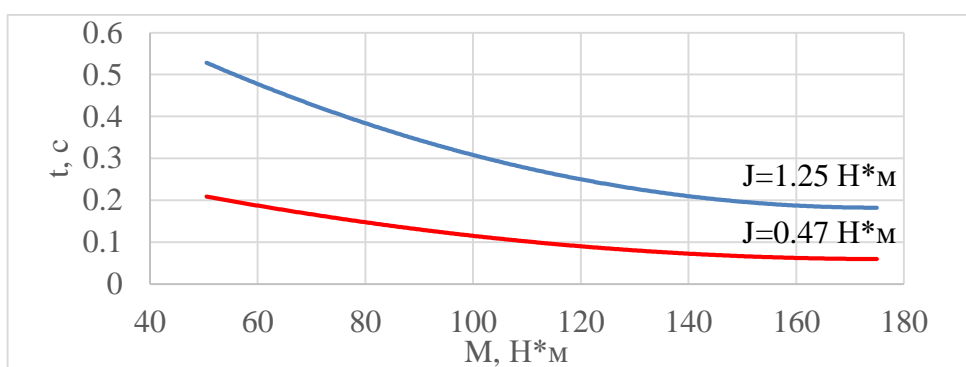


Рисунок 2.5 – Зависимости времени выбега АД от механической нагрузки и инерции

При работе с номинальной нагрузкой (рисунок 2.5), равной для рассматриваемого двигателя 101 Н*м , диапазон времени выбега составляет от 0.1 до 0.3 с. Полученный диапазон может быть принят в качестве предельного времени зондирующего интервала прямого пуска АД, т.к. не противоречит [19], а лишь его дополняет.

В результате, принимая во внимание условия успешности пуска, инерционность изменения режимных параметров и скорости вращения ротора двигателя, была разработана обобщенная структура процесса контроля успешности пуска АД, представленная на рисунке 2.6.

В процессе контроля успешности пуска АД выделено пять этапов:

1. Блокировка пуска
2. Экспресс оценка допустимости по необходимым условиям
3. Экспресс оценка допустимости по вторичным нарушениям
4. Оценка допустимости длительности пуска
5. Запрет повторного включения

В первый момент времени (А) автоматика контроля АД находится в режиме ожидания команды на включение двигателя. После ее получения, на этапе 1 до момента В производится оценка возможности пуска АД по текущим значениям напряжения в узле нагрузки и частоты ПС. При отсутствии достоверной информации об электрических параметрах двигателя (идентификация его параметров еще не проведена) решение принимается в соответствии с нормативным документом [49], в котором регламентируется значение критического напряжения в узлах нагрузки.

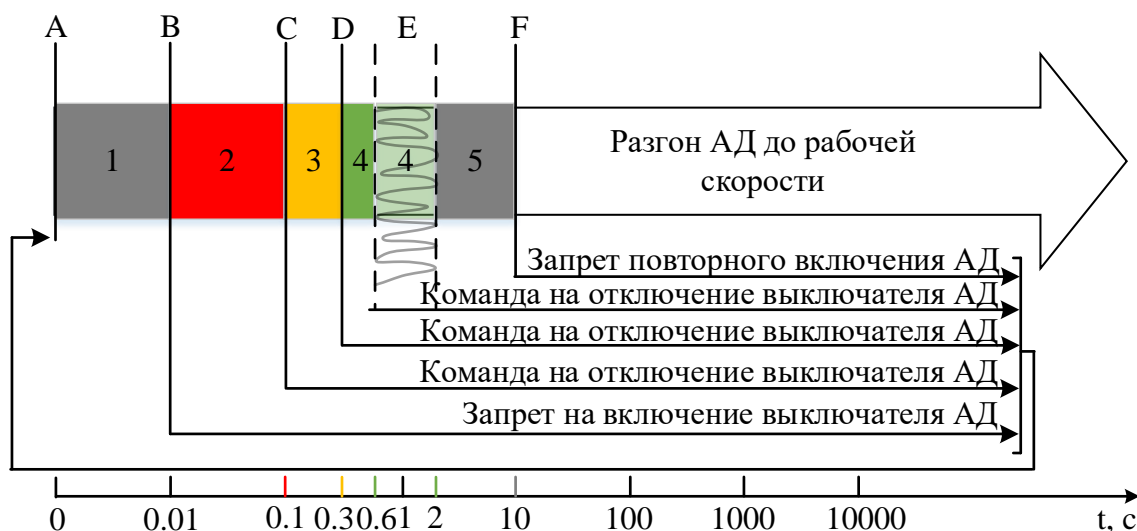


Рисунок 2.6 – Обобщенная структура процесса контроля успешности пуска АД в ЛСЭ

Далее, при соблюдении условий априорной успешности пуска, выдается команда на включение выключателя АД. На этапе 2 производится параметрическая идентификация АД, оценивается предельное отклонение режимных параметров при прямом пуске (за время 0.1 с регуляторы, генерирующего оборудования, еще не окажут существенного влияния на режимные параметры питающей сети). В момент С выполняется проверка соблюдения необходимых условий для успешного пуска АД.

На этапе 3 производится оценка влияния регуляторов на режимные параметры питающей сети на интервале 0.3 с (учет влияния регуляторов осуществляется путем экстраполяции зависимостей режимных параметров от времени). В момент D выполняется проверка соблюдения допустимых условий совместно с необходимыми для успешного пуска АД с учетом влияния регуляторов.

На этапе 4 производится оценка продолжительности пуска АД. В момент E выполняется проверка допустимости длительности пуска АД.

Этап 4 имеет нечеткий временной интервал. Связно это с тем, что на приведенном интервале значительное влияние на режимные параметры оказывает быстроедействие и характер влияния регуляторов. Исследование показало, что при апериодическом характере регулирования при варьировании загрузки АД в широком диапазоне интервал составляет 0.6-1.7 с, при периодическом – 1-2 с. За представленные промежутки времени имеется возможность определить скорость изменения активной мощности АД, позволяющую оценить вероятную продолжительность пуска АД.

На этапе 5 до момента времени F автоматика АД находится в режиме запрета прохождения внешней команды повторного пуска двигателя для предотвращения бесконечности циклов пуска АД или исключения его включения сразу после принудительного основа.

Все относительные моменты времени контроля успешности пуска АД приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Границы этапов контроля успешности пуска АД

Этап	Содержание	Критерий	Физическое обоснование
A	Команда на включение АД	-	-
B	Проверка соблюдения необходимых условий до пуска, пуск АД	$U > U_{кр}$ $f > f_{кр}$	Снижение напряжения в нагрузочном узле при пуске
C	Проверкой соблюдения необходимых условий	$U > U_{кр}$ $f < f_{кр}$	Снижение напряжения в нагрузочном узле при пуске
D	Проверка соблюдения необходимых и достаточных условий для пуска с учетом влияния регуляторов СГ	$U > U_{кр}$ $f < f_{кр}$ $f > f_{min}$	Изменение частоты в ПС при изменении баланса активной мощности при поддержании баланса по реактивной
E	Проверка допустимости длительности пуска	$t < t_{max}$	Для успешного пуска АД необходимо: $dP/dt > 0$
F	Команда на запрет включения АД	-	-

При несоблюдении условий успешности пуска АД в представленные моменты, автоматика выдает команду на отключение двигателя с последующим контролем допустимости пуска, но уже с новыми параметрами объекта и ПС.

Важной особенностью является инвариантность представленной обобщенной структуры контроля пуска АД. Добавление дополнительных измерений, допустим скорости вращения ротора двигателя, не приведёт к изменению последовательности этапов, а также объединяющих их моментов времени контроля соблюдения условий успешности пуска.

Представленная обобщенная структура контроля успешности пуска сформирована при условии наличия информации о виде механической нагрузки АД. При этом, характер зависимости момента сопротивления от скорости вращения ротора при изменении режимных параметров только на статорных обмотках двигателя может быть определен только введением *наблюдателя* в контур управления. Под *наблюдателем* понимается математическая модель объекта (в частности АД), встроенная в контур его управления, на вход которой подаются сигналы такие же, как и на объект-

оригинал, а внутренние неизмеряемые величины (вектор состояний) подбираются при помощи методов оптимизации таким образом, чтобы “совпадали” выходные сигналы оригинала и модели.

Наблюдатель позволяет определять параметры режима объекта, измерение которых не представляется возможным, но требует информации об электрических параметрах двигателя хотя бы в первом приближении [50]. Причем, чем ближе величина заданных или идентифицированных электрические параметры АД к реальным, тем быстрее сходимость расчета [51], [52].

Учитывая необходимость параметрической идентификации пускаемого АД, параметры которого, зачастую, неизвестны, продолжительности “безопасного” зондирующего интервала прямого пуска при экспресс контроле его успешности будет недостаточно для взаимозависимого определения электрических параметров и вектора состояния двигателя с возможностями итерационного повторения процесса их определения. Как отмечалось ранее, одним из основных требований к автоматике прогностического контроля успешности пуска АД является ее быстрдействие. Выявление необходимости прерывания пуска и его реализация в пределе должны происходить за доли секунды, поэтому применяемая в автоматике модель и методы определения ее параметров должны обеспечивать выполнение данного требования.

Отсутствие возможности определения характера изменения механического момента от скорости вращения ротора двигателя на малом интервале времени приводит к необходимости введения дополнительных допущений. При пуске АД осуществимость разгона определяется величиной и знаком разницы между пусковым электромагнитным моментом и моментом сопротивления приводного механизма. О возможности пуска свидетельствует положительная их разница, динамика же будет зависеть и от характера изменения последней. Как отмечается в [47], любой вид механической характеристики двигателя может быть заменен эквивалентной с наиболее тяжелыми условиями для пуска – с постоянным моментом сопротивления.

Определяя в указанных условиях пусковой момент нагрузки при пуске по величине его установившегося значения, имеется возможность оценки на малом интервале времени успешности пуска с точки зрения необходимых условий. Определение электромагнитного момента при пуске определяется по математической модели АД, которая также должна отвечать требованиям быстродействия автоматики.

В результате, для создания автоматики необходима модель по определению критических параметров режима, включающая в себя модели АД и ПС, на основе которых за малый промежуток времени имеется возможность оценить по условиям успешности осуществимость и допустимость пуска двигателя в заданный момент времени и, при необходимости, произвести его противоаварийное прерывание

2.4 Моделирование и параметрическая идентификация элементов локальной системы энергоснабжения и условий успешности пуска асинхронного двигателя

Для предиктивного определения успешности пуска АД в соответствии с приведенной на рисунке 2.6 обобщенной структурой поэтапного контроля на зондирующем интервале необходимы быстродействующие модели элементов сети рисунка 2.4. Укрупнённо они могут быть разделены на:

- Модель двигателя. В соответствие с условиями успешности (4-6), должна описывать электромагнитный и электромеханический процесс при пуске двигателя для определения его продолжительности и осуществимости с точки зрения объектных факторов.
- Модель ПС. В соответствие с условиями успешности (4) и (5), которые определяются относительно прочей нагрузки сети, должна описывать электромагнитный и электромеханический переходной процесс при изменении баланса мощностей в ЛСЭ для определения допустимости

величины отклонений частоты и напряжения в ПС с точки зрения системных факторов.

Параметры моделей элементов ЛСЭ должны определяться только по локальным измерениям на шинах АД.

2.4.1 Статическая и динамическая модели асинхронного двигателя

Моделирование АД может быть выполнено при помощи дифференциальных уравнений (динамическая модель) с возможностями детального описания и исследования переходных процессов или алгебраических/трансцендентных уравнений (статическая модель) для описания установившихся и квазистационарных режимов работы.

Статическая модель, представленная упрощенной Г-образной схемой замещения (рисунок 2.7), может быть использована для определения параметров квазидинамического переходного процесса АД [53]. При этом, на малом временном интервале появляется возможность приближенной оценки качества динамического перехода АД.

Г-образная схема замещения АД рисунка 2.7 включает [53]: X_1, X_2' – индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора, R_1, R_2' – активные сопротивления обмоток статора и ротора, S – относительная разность скорости вращения магнитного поля статора и механической скорости вращения ротора (скольжение), Z_m – общее сопротивление цепи намагничивания, $R_2' \frac{1-S}{S}$ – активное сопротивление моделирующее полезную работу двигателя (без учета механических и добавочных потерь); U_1, I_1 – напряжение и ток обмотки статора; I_2 – ток обмотки ротора; I_0 – ток цепи намагничивания.

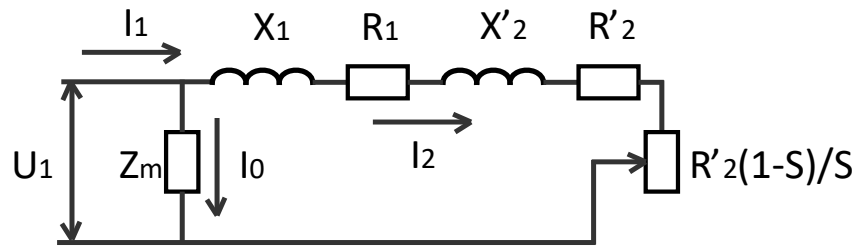


Рисунок 2.7– Упрощенная Г-образная схема замещения АД

Выражения для определения потребляемой мощности АД по Г-образной схеме замещения выглядят следующим образом:

$$P = I_0^2 R_m + I_2^2 (R_1 + R'_2) + I_2^2 R'_2 \frac{1-s}{s},$$

$$Q = I_2^2 (X_1 + X'_2) + I_0^2 X_m,$$

где:

$$I_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left((R_1 + R'_2) + R'_2 \frac{1-s}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}$$

Г-образная схема замещения справедлива при наличии следующих допущений:

- полная проводимость ветви намагничивания принимается неизменной, а ток намагничивания, независимо от нагрузки, пропорционален приложенному напряжению;
- активное сопротивление ротора не зависит от частоты тока, насыщение не влияет на реактивное сопротивление статорных и роторных обмоток;
- добавочные потери не учитываются;
- паразитные моменты, создаваемые высшими гармониками МДС, не учитываются.

Как отмечается в [54], погрешность определения параметров установившегося режима АД по упрощенной Г-образной схеме замещения не превышает 5%. Для более точного определения режимных параметров и

реализации управления работой в установившемся и переходном режимах АД, зачастую, применяется его полная схема замещения. На рисунке 2.8 приведена полная Т-образная схема замещения АД в осях q и d, которая описывается системой уравнений Парка-Горева [55]:

$$\begin{aligned}
 V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + w\psi_{ds} \\
 V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - w\psi_{qs} \\
 V_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (w - w_r)\psi_{dr} \\
 V_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} + (w - w_r)\psi_{qr}
 \end{aligned}$$

в которую входят потокосцепления:

$$\begin{aligned}
 \psi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\
 \psi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\
 \psi_{qr} &= L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \\
 \psi_{dr} &= L_r i_{dr} + L_m i_{ds}
 \end{aligned}$$

где:

$$\begin{aligned}
 L_r &= L_{Ir} + L_m \\
 L_s &= L_{Is} + L_m
 \end{aligned}$$

В представленных уравнениях: V_{qs}, V_{ds} – напряжения статора по осям q и d; V_{qr}, V_{dr} – напряжения ротора по осям q и d; ψ_{qs}, ψ_{ds} – потокосцепления статора по осям q и d; ψ_{qr}, ψ_{dr} – потокосцепления ротора по осям q и d; i_{qs}, i_{ds} – токи статора по осям q и d, i_{qr}, i_{dr} – токи ротора по осям q и d; L_s, L_r – индуктивности статора и ротора; L_{Ir}, L_{Is} – индуктивности рассеяния ротора и статора, L_m – индуктивность намагничивания, R_s, R_r – активные сопротивления статора и ротора, w – угловая скорость вращения магнитного поля статора, w_r – угловая скорость вращения ротора.

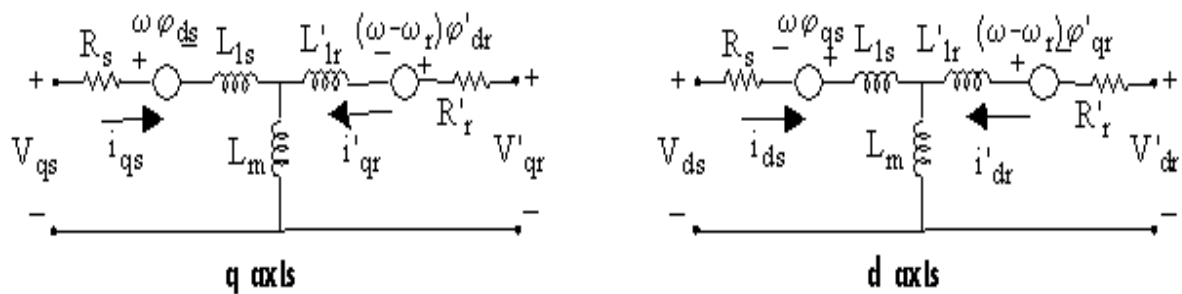


Рисунок 2.8 – Полная Т-образная схема замещения АД

Уравнения Парка-Горева, описывающие идеализированную машину, базируются на следующих основных допущениях [56]:

- Магнитная проницаемость стали машины принимается равной бесконечности.
- Распределение магнитных полей самоиндукции трехфазных обмоток и взаимной индукции обмоток статора и ротора вдоль окружности двигателя считается синусоидальным с пространственным полупериодом, равным полюсному делению (принимается в расчет только первая гармоника полей, не учитывается влияние зубцовых полей и участие высших гармоник в образовании электромагнитного момента).
- Магнитопровод и обмотки двигателя симметричны.
- Обмотка ротора замещается двумя эквивалентными контурами, расположенными по оси d и q, с постоянными параметрами.
- В продольной и поперечной осях машины кроме потоков рассеяния существуют единые потоки взаимной индукции, пронизывающие все контуры, которые располагаются по соответствующим осям машины.

Второе, третье и пятое допущения для электрических машин являются общепринятыми и практически не влияют на точность модели. Первое и четвертое допущение налагают ограничения на использование классической модели Парка-Горева для математического моделирования многомашинных электрических схем. Использование данной модели в описанных условиях приводит к возникновению недопустимых погрешностей.

Применение полной схемы замещения для моделирования работы АД требует наличия информации о большом числе режимных параметров, в т.ч. токов и напряжений ротора, что в условиях отсутствия возможности их непосредственного измерения приводит к необходимости оценки состояния двигателя в процессе пуска с введением наблюдателя в контур управления.

Как отмечалось ранее, для корректной работы наблюдателя требуется введение идентификатора параметров в контур управления, для взаимозависимой работы которых требуется длительное время, превышающее зондирующий интервал.

Для снижения продолжительности оценки успешности пуска в качестве модели АД может быть рассмотрена упрощённая схема замещения. В некоторых случаях, статическая модель может быть использована для определения параметров квазидинамического переходного процесса, что, упрощая расчет, позволяет проводить экспресс оценку качества динамического перехода.

Для валидации использования упрощенной Г-образной схемы замещения для контроля успешности пуска двигателя в программном пакете MATLAB/Simulink была создана цифровая модель, представленная на рисунке 2.9.

В используемом программном пакете математическая модель АД представлена уравнениями Парка-Горева и, соответственно, Т-образной полной схемой замещения в осях q и d . Механическая часть АД представлена уравнением движения ротора (3), определяющим зависимость скорости изменения скорости вращения ротора двигателя от разницы тормозящего и ускоряющего моментов, а также длительность электромеханического переходного процесса.

В таблице 2.3 приведены параметры элементов цифровой модели, прямого пуска АД под нагрузкой, составляющей 213 Н*м.

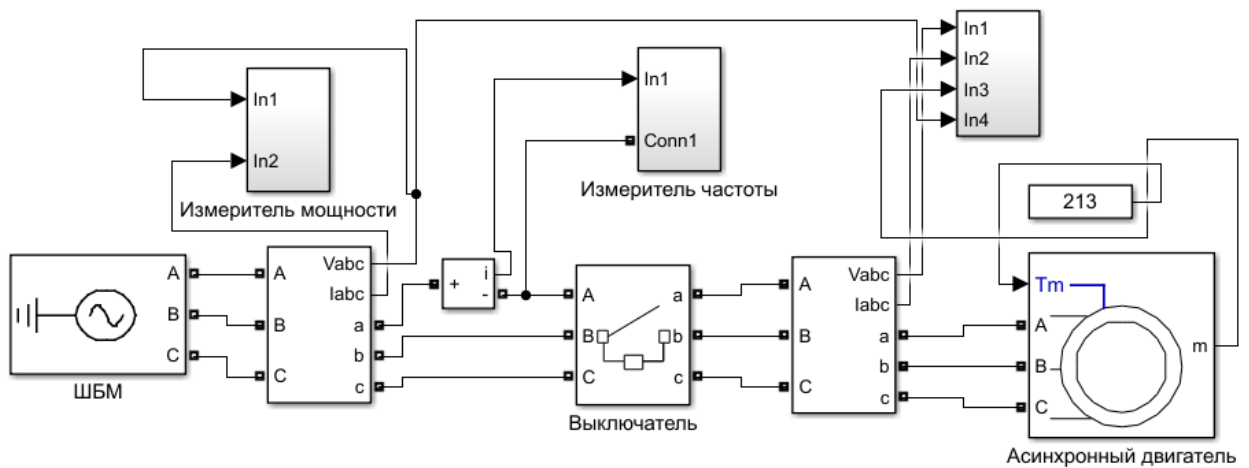


Рисунок 2.9 – Цифровая модель (MATLAB/Simulink) включения АД на шины бесконечной мощности (ШБМ)

Определяющим параметром при оценке возможности пуска АД и ускорения в его процессе является величина создаваемого электромагнитного момента, которая должна превышать момент сопротивления приводного механизма:

$$M_{эм} > M_{сопрт}$$

На первом этапе пуска достаточным для оценки его успешности является сравнение величин представленных моментов при изменении режимных параметров ПС. Валидация упрощенной модели для контроля успешности пуска может быть произведена путем сравнения электромагнитных моментов, полученных по Г-образной и полной Т-образной схемам замещения двигателя. Для этого в цифровой модели рисунка 2.9 производился прямой пуск АД под механической нагрузкой с записью режимных параметров. В процессе пуска, в соответствии с электрическими параметрами таблицы 2.3, была получена моментно-скоростная характеристика АД по Г-образной схеме замещения без ветви намагничивания, используя общеизвестное выражение:

$$M_{эм} = \frac{U_1^2 R_2' S}{((X_1 + X_2')^2 S^2 + (R_1 S + R_2')^2) \omega_c}$$

Величина электромагнитного момента по полной Т-образной схеме замещения получена непосредственно с измерительного блока АД цифровой модели.

Таблица 2.3 – Параметры элементов цифровой модели

Параметры АД	
Номинальная мощность, S (кВА)	75
Номинальное напряжение, U (В)	400
Номинальная частота, f (Гц)	50
Активное сопротивление статора, R1 (Ом)	0,03552
Активное сопротивление ротора, R2 (Ом)	0,02092
Индуктивность рассеяния статора, L1 (Гн)	0,000335
Индуктивность рассеяния ротора, L2 (Гн)	0,000335
Индуктивность ветви намагничивания, Lm (Гн)	0,0151
Инерция, J кг*м ²	1,25
Число пар полюсов, p	1
Параметры ШБМ	
Линейное напряжение, U (В)	400
Угол сдвига фазы А,φ (град.)	0
Частота, f (Гц)	50
Параметры выключателя	
Время включения (с)	0
Сопротивление, R (Ом)	0,01

На рисунке 2.10 представлено сравнение моментно-скоростных характеристик, полученных по полной и упрощенной схемам замещения АД.

При скольжениях, близких к 1, при расчете по Т-образной схеме замещения наблюдается динамический момент, возникающий из-за электромагнитного переходного процесса в АД. Как отмечается в [47], динамическая характеристика АД тем ближе к статической чем больше его мощность и тяжелее ротор (больше маховый момент). Для двигателей мощность более 25 кВт средние значения динамической и статической характеристики электромагнитного момента, определяющие движение ротора, практически совпадают, расходясь лишь в зоне больших скольжений, что и наблюдается на рисунке 2.10 (при скольжении близком к 1).

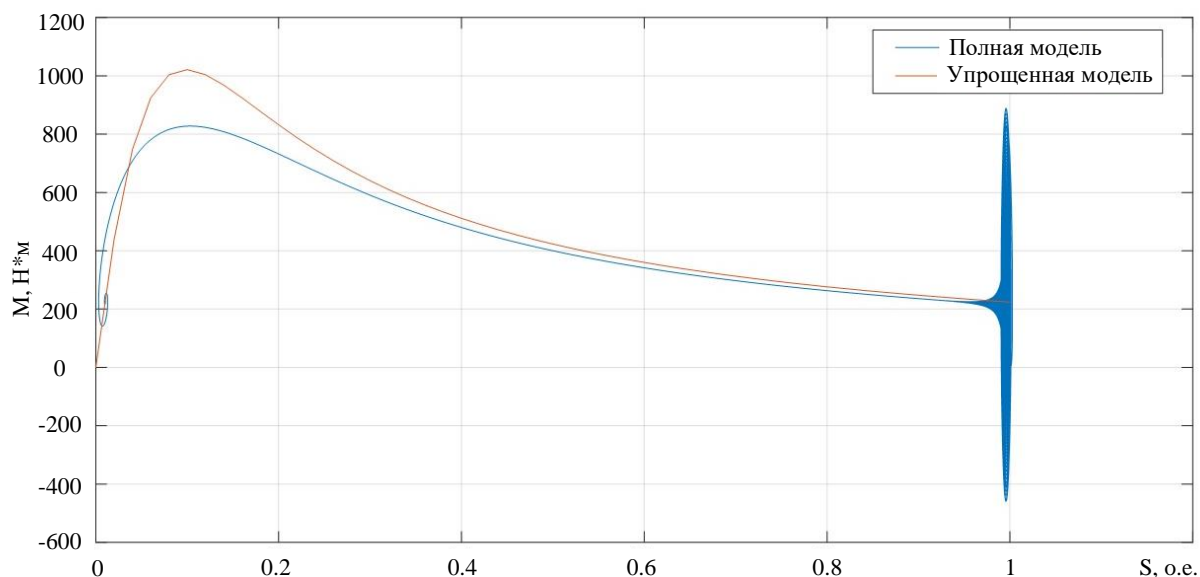


Рисунок 2.10 – Моментно-скоростные характеристики АД, полученные по статической и динамической моделям

Усреднённое значение пускового момента по динамической модели составляет 213,1 Н*м. Пусковой момент по статической модели определится:

$$M_{\text{пуск}} = \frac{3U_1^2 R_2'}{((X_1 + X_2')^2 S^2 + (R_1 + R_2')^2) w_c} = \frac{3 \cdot 227,69^2 \cdot 0,021}{((0,1 + 0,1)^2 + (0,0021 + 0,0036)^2) \cdot 314,16} = 218,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Из рисунка 2.10 видно, что погрешность определения электромагнитного момента по статической модели увеличивается с ростом скорости вращения вала двигателя, достигая максимального значения в точке критического скольжения (25%). Минимальная погрешность зафиксирована в пусковом режиме работы двигателя и составляет 2,3%.

По результатам проведенных испытаний на цифровой модели можно заключить, что статическая модель АД вполне применима для экспресс контроля успешности пуска АД по необходимым условиям на малом временном интервале, т.к. имеет малую погрешность определения электромагнитного момента на начальном этапе процесса.

Для контроля пуска АД в соответствие с достаточными условиями успешности необходимо осуществлять проверку допустимости

продолжительности его пускового процесса. Необходима модель разгона АД с возможностью предиктивной оценки его продолжительности.

2.4.2 Модели разгона асинхронного двигателя

Продолжительность разгона определяется суммарной инерцией исполнительного механизма и ускорением ротора АД в процессе пуска, которое зависит от разницы электромагнитного и тормозящего моментов в соответствии с уравнением движения ротора (3). Чем их положительная разница больше, тем быстрее процесс разгона АД.

В ряде источников [47], [57] продолжительность пуска АД с постоянной механической нагрузкой определяется путем аппроксимации моментно-скоростной характеристики степенными функциями, вводимыми в (3). В результате, время пуска определяется в соответствии со следующим выражением:

$$t_{\text{пуск}} = \frac{Tj}{M_{\text{сопрт}}} \left(\frac{b_c}{\sqrt{b_c^2 - 1}} \left(S_{\phi} \left(\ln \frac{S_{\phi} - S_{\text{уст}} - 0,01}{S_{\phi} - 0,01} \right) + \ln 100(1 - S_{\text{уст}}) \right) + (S_2 - S_1) \right),$$

где:

$$b = \frac{M_{\text{max}} U^2 f_0^2}{M_{\text{ном}} U_0^2 f^2},$$

$$b_c = \frac{b}{M_{\text{сопрт}}},$$

$$S_{\text{уст}} = \frac{S_{\text{кр}}}{(b_c + \sqrt{b_c^2 - 1})},$$

$$S_2 = S_{\text{уст}} + 0,01,$$

$$S_{\text{кр}} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 - (X_1 + X_2')^2}},$$

$$S_{\phi} = S_{\text{кр}} (b_c + \sqrt{b_c^2 - 1}),$$

$S_{уст}$ – установившееся скольжение при работе в режиме нормальной установившейся работы; M_{max} – максимальный электромагнитный момент АД; $S_{кр}$ – скольжение, при котором двигатель развивает максимальный электромагнитный момент; $M_{ном}$ – значение номинального электромагнитного момента АД; f_0 – номинальная частота АД; U_0 – номинальное напряжение АД.

При этом, дополнительно отмечается, что, в ряде случаев, имеется возможность линейной аппроксимации моментно-скоростной характеристики, но выражение для определения продолжительности пуска АД не приводится. На рисунке 2.11 приведена моментно-скоростная характеристика с реализацией линейной аппроксимации. Полученная моментно-скоростная характеристика состоит из двух частей: прямая при низком значении скольжения – получена по уравнению Клосса [58]; прямая соответствующая значениям скольжения выше критического – соединяет ключевые точки пускового процесса (максимальный и пусковой моменты). В результате введения аппроксимирующих кривых в (3) получено следующее выражения для определения времени пуска АД:

$$t_{пуск} = \frac{M_{ном} T j^{w_{дв}}}{A(0,95 - 0,45B) + 0,95C + \frac{2M_{max}}{S_{кр}}(0,05 - 0,049B) - M_{сопрт}}$$

при

$$A = \frac{M_{max} - M_{пуск}}{S_{кр} - 1}$$

$$B = \frac{w_{дв}}{w_c}$$

$$C = \frac{M_{пуск} S_{кр} - M_{max}}{(S_{кр} - 1)},$$

где: $w_{дв}$ – значение скорости вращения ротора АД в установившемся режиме при заданном моменте механического сопротивления.

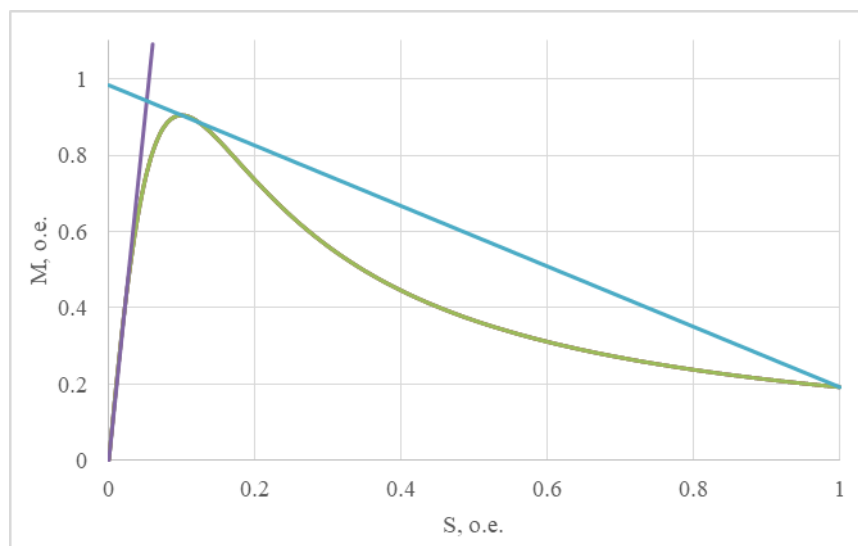


Рисунок 2.11– Аппроксимация моментно-скоростной характеристики

Необходимо проверить применимость приведенных моделей разгона АД для предиктивного определения продолжительности его пуска на начальном этапе процесса. Для этого на цифровой модели рисунка 2.9 была проведена валидация моделей разгона АД. Оценка погрешности определения времени пуска АД производилась при вариации рабочего напряжения в широком диапазоне (в соответствии с ГОСТ 32-144) и механическом моменте нагрузки на валу двигателя равным номинальному. Как отмечается в [59], двигатели аналогичной мощности и конструкции имеют следующее соотношение моментов:

$$M_{\text{ном}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{2,1} \quad (7)$$

Исходя из (7), $M_{\text{ном}} = 101,43 \text{ Н*м}$. Значения времени пуска АД по приведенным моделям, а также полученные погрешности при различных значениях напряжения приведены в таблице 2.4.

Из таблицы 2.4 следует, что выражение на базе аппроксимации моментно-скоростной характеристики степенными функциями имеет решение не во всем диапазоне изменения напряжения ПС. Представленное выражение для определения продолжительности пуска АД не имеет решения при моменте сопротивления приводного механизма выше номинального, а также при

напряжении ниже $0,88U_{ном}$, когда выражение под логарифмом принимает отрицательное значение. Погрешность определения времени пуска АД при аппроксимации моментно-скоростной характеристики степенными функциями лежит в диапазоне от 42% до 11 %, уменьшаясь со снижением напряжения.

Таблица 2.4 – Погрешность определения времени пуска в зависимости от напряжения на зажимах АД и от используемой модели

ΔU , о.е.	Реальное время пуска, с	Расчет времени пуска при аппроксимации степенными функциями, с		Расчетное время пуска при линеаризации процессов, с	
0	1,5	0,87	42%	0,329	78,07%
0,03	1,71	1	41,52%	0,3526	79,38%
0,06	1,97	1,192	39,49%	0,3784	80,79%
0,09	2,274	1,543	32,15%	0,4084	82,04%
0,12	2,66	2,36	11,28%	0,4417	83,39%
0,15	3,164	-	-	0,48	84,83%
0,18	3,883	-	-	0,526	86,45%
0,21	4,985	-	-	0,579	88,39%
0,24	6,96	-	-	0,645	90,73%
0,27	13,29	-	-	0,724	94,55%

В таблице 2.4 также представлены результаты определения времени пуска АД при линейной аппроксимации его моментно-скоростной характеристики. Из таблицы видно, что погрешность определения продолжительности пуска по линейной модели значительна, а сама модель не может быть напрямую использована для априорного контроля его успешности. При этом, линейная модель при увеличенной погрешности определения времени пуска позволяет получить результат при любой механической нагрузке двигателя и при низких значениях питающего напряжения, ко всему прочему, прослеживается корреляция между значениями режимных параметров и расчетной продолжительностью пускового процесса. Для снижения погрешности полученных результатов в линейную модель был введен поправочный коэффициент, зависящий от напряжения (рисунок 2.12).

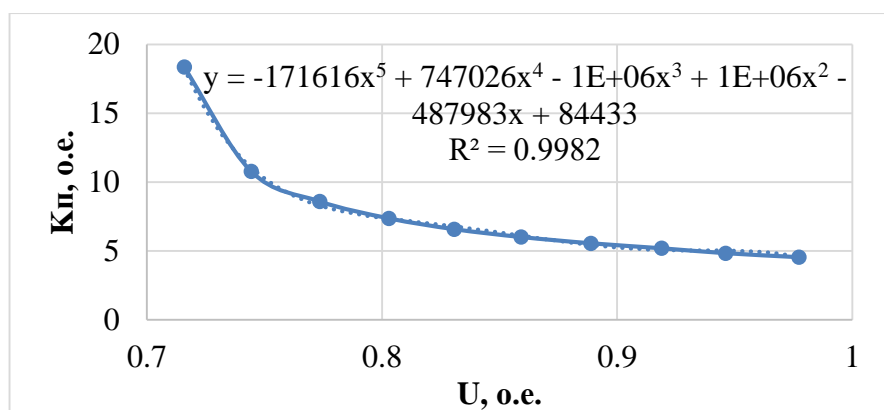


Рисунок 2.12– Значения поправочного коэффициента в зависимости от напряжения на зажимах АД

Поправочный коэффициент определяется исходя из полиномиальной аппроксимации характеристики зависимости фактического и расчетного времени пуска от напряжения на шинах двигателя. В таблице 2.5 приведены результаты определения продолжительности пуска АД по линейной модели, полученные на цифровой модели рисунка 2.9. С введением поправочного коэффициента, удалось добиться погрешности менее 7 %. Следует отметить, что величина значения поправочного коэффициента зависит от электрических и механических параметров конкретного двигателя и не может быть универсальной в условиях изменения режимов ПС.

Таблица 2.5 – Погрешность определения времени пуска в зависимости от напряжения на зажимах АД

$\Delta U, \text{о.е.}$	Фактическое время пуска, с	Расчётное время пуска, с	Поправочный коэффициент	Результирующее время пуска, с	Погрешность, %
0	1.5	0.329	4.72	1.55	3.46
0.03	1.71	0.3526	4.53	1.60	6.57
0.06	1.97	0.3784	5.13	1.94	1.54
0.09	2.274	0.4084	5.82	2.38	4.60
0.12	2.66	0.4417	6.30	2.78	4.56
0.15	3.164	0.48	6.56	3.15	0.45
0.18	3.883	0.526	6.99	3.68	5.36
0.21	4.985	0.579	8.28	4.80	3.78
0.24	6.96	0.645	11.52	7.43	6.71
0.27	13.29	0.724	18.09	13.10	1.45

Валидация приведённых моделей разгона проводилась при питании АД от ШБМ, что исключает изменение частоты питающего напряжения. Изменение частоты в процессе пуска, свойственная системам сопоставимой мощности, может стать причиной неверной оценки продолжительности пуска двигателя с возможностями его повреждения, снижения ресурса или ложной фиксации условий его неуспешности. В результате, требуется универсальная модель, по которой имеется возможность прогностически определять продолжительность пуска АД на раннем этапе процесса в условиях изменения режимных параметров ЛСЭ.

Продолжительность пуска АД может быть определена путем прогнозирования времени изменения режимных или механических параметров в его процессе до значений, соответствующих работе двигателя с установившейся скоростью вращения. На рисунке 2.13 приведена зависимость потребляемой активной мощности АД от времени. Как видно из рисунка 2.13, часть моментно-скоростной характеристики от пускового до максимального момента может быть аппроксимирована экспоненциальной функцией, в соответствии с которой активная мощность АД будет изменяться в процессе пуска. Определив величину пусковой и максимальной мощности по параметрам Г-образной упрощенной модели двигателя при помощи метода наименьших квадратов, имеется возможность определить коэффициенты в аппроксимирующей экспоненциальной функции по величине фактической потребляемой мощности АД в процессе пуска. Время пуска определится:

$$t_{\text{пуск}} = 1.3 \frac{\ln\left(\frac{P_{\text{max}}}{P_0}\right) \sum t^2}{\sum \ln(P)t - \ln(P_0) \sum t}$$

где: P_{max} – максимальная мощность АД, t – относительное время пускового процесса двигателя, P_0 – начальное (пусковое) значение потребляемой активной мощности АД.

Представленное выражение подходит только для пусков с малой длительностью, когда потребляемая активная мощность АД резко изменяется до максимального значения. В противном случае, в силу малого ускорения ротора двигателя (ускоряющий момент незначительно превышает тормозящий) зависимость активной мощности от времени будет иметь вначале длительный пологий характер, а затем, быстрое изменение крутизны при стремлении к критическому скольжению, что препятствует корректной оценке продолжительности процесса на раннем этапе, приводя к значительным погрешностям.

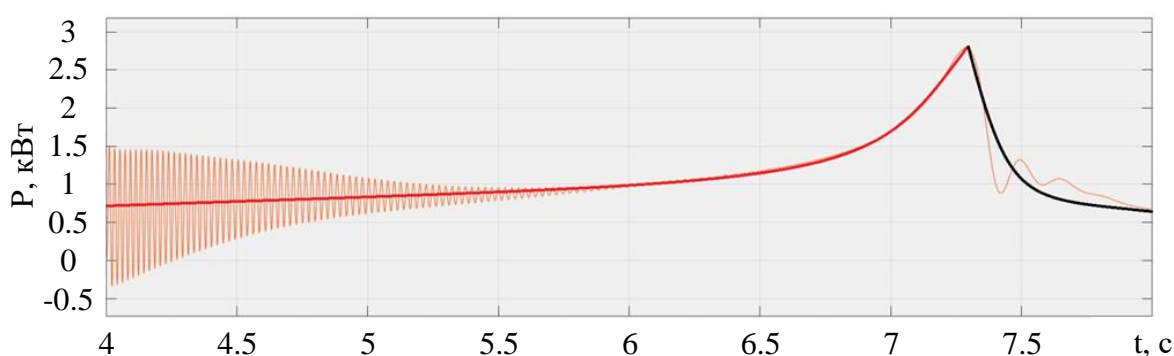


Рисунок 2.13 – Зависимость активной мощности АД от времени

Преодолеть сложившуюся проблему возможно путем оценки продолжительности пуска по более инерционному параметру – скорости вращения ротора АД. Скорость вращения ротора АД может быть определена в условиях отсутствия возможности ее непосредственного измерения любым методом численного интегрирования, в котором на каждом шаге дискретизации оценивается разница между ускоряющим и тормозящим моментом и, с учетом величины постоянной инерции, определяется приращение скорости АД относительно текущего значения (отсчет ведется с нулевого значения). В результате, угловая скорость вращения ротора АД определяется из уравнения движения ротора (3) следующим образом:

$$\omega_2 = \sum_{i=0}^n \frac{(M_{эмi} - M_{сопрti})w_{ном}}{M_{ном} \cdot T_j} \Delta t_i,$$

где: ω_2 – текущая угловая скорость ротора, определяемая исходя из величины небаланса моментов двигателя, Δt_i – i -й шаг дискретизации, $M_{эмi}$ – значение электромагнитного момента на i -ом шаге, $M_{сопрmi}$ – значение тормозящего момента на i -ом шаге.

Продолжительность пуска АД определится путем прогнозирования времени изменения скорости от начального нулевого значения до установившейся, определяемой по параметрам Г-образной упрощенной схемы замещения и величине механического момента в установившемся режиме. На рисунке 2.14 приведена зависимость угловой скорости ротора от времени при пуске под механической нагрузкой.

Из рисунка 2.14 видно, что аппроксимирующей функцией для угловой скорости при пуске АД также может являться экспоненциальная зависимость. В результате, время пуска определится:

$$t_{\text{пуск}} = \frac{\ln\left(\frac{\omega_{уст}}{\omega_0}\right) \sum t^2}{\sum \ln(\omega_2)t - \ln(\omega_0) \sum t},$$

где:

$$\omega_{уст} = 2\pi f_c \left(1 - \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}\right),$$

в котором

$$a = P_{сопрm}(X_2' + X_1')^2 + P_{сопрm}(R_2')^2,$$

$$b = 2P_{сопрm}R_2'R_1 - 3U_1^2R_2',$$

$$c = P_{сопрm}(R_2')^2$$

В представленных уравнениях: ω_0 – значение угловой скорости ротора на момент выявления устойчивого разгона двигателя, $\omega_{уст}$ – значение угловой скорости ротора двигателя, соответствующее установившемуся режиму при заданном моменте сопротивления, $P_{сопрm}$ – механическая

мощность приводного механизма в нормальном установившемся режиме работы АД.

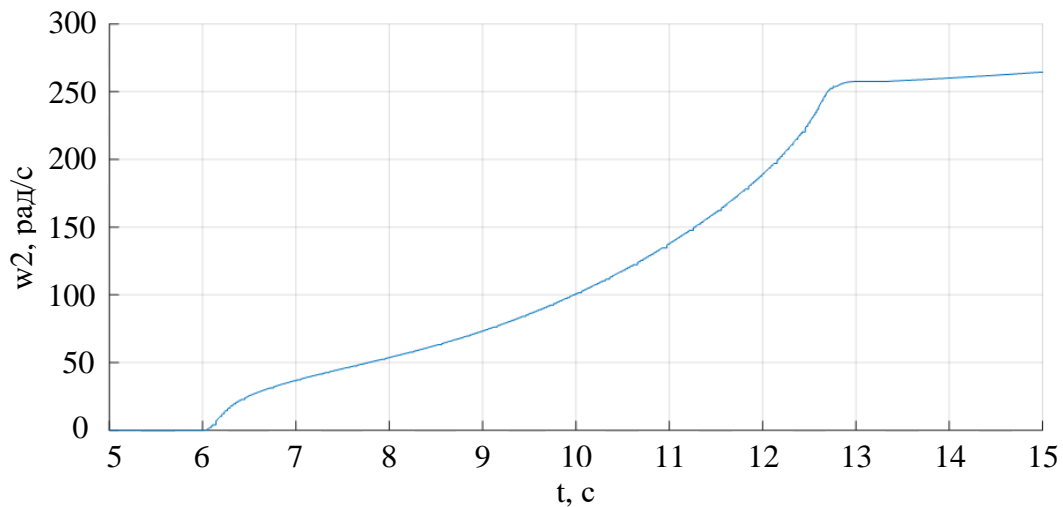


Рисунок 2.14 – Зависимость угловой скорости ротора АД от времени при пуске под механической нагрузкой

Используя полученное выражение для определения продолжительности пуска АД имеется возможность осуществлять контроль процесса с прогностическим выявлением его неуспешности ввиду недопустимой длительности. Модель определения продолжительности пуска требует наличия информации о механических параметрах АД, которые в условиях отсутствия возможности прямого измерения скорости вращения ротора могут быть идентифицированы в специально выбранных режимах работы двигателя.

2.4.3 Модели питающей сети

Модель ПС для контроля успешности пуска АД должна позволять на раннем этапе процесса оценить степень и критичность изменения режимных параметров для оборудования ЛСЭ.

Пуск АД вызывает скачкообразное снижение напряжения во всей ЛСЭ, величина которого сразу же может быть зафиксирована на шинах подконтрольного двигателя.

Восстановление напряжения после подключения новой нагрузки осуществляется АРВ генераторов электростанции, работающих совместно с групповым регулятором напряжения (ГРН). ГРН отслеживает уровень напряжения на генераторных шинах и, при фиксации его значительного снижения, обеспечивает повышение уставок АРВ. Процесс регулирования напряжения носит монотонный характер с плавным повышением его значения с большой постоянной времени, определяемой конструкцией и параметрами СГ и прилегающей сети. Скачкообразный характер снижения напряжения с достаточно медленным его восстановлением позволяет на раннем этапе процесса пуска оценивать его фактическое значение относительно заданного регламентированного в соответствии с ГОСТ 32-144 и осуществлять противоаварийное отключение АД при его достижении в соответствие с условием:

$$U > U_{дон} \quad (8)$$

где: $U_{дон}$ – минимально допустимое напряжение для прочей вращающейся нагрузки в ЛСЭ. Введение дополнительной задержки на отключение АД при фактическом несоблюдении условия по величине напряжения для прогнозирования его уровня после действия регуляторов при контроле успешности пуска АД на ранней стадии процесса недопустимо, т.к. может являться причиной создания аварийного режима в ЛСЭ.

Как отмечалось ранее, подключение мощного потребителя активной мощности приводит также и к снижению частоты в ЛСЭ. СГ в ЛСЭ оснащены АРС, выполняющими ОПРЧ с заданным значением статизма [60]. Коэффициент статизма характеризует влияние изменения электрической нагрузки на частоту вращения роторов генерирующего оборудования [61]. Статическое изменение частоты сети при включении двигателя определится:

$$\Delta f = \frac{P_d}{P_2} \cdot K_c \cdot f_0,$$

где: f_0 – частота в ЛСЭ до пуска двигателя, P_0 – активная мощность при пуске двигателя, P_2 – активная мощность, генерируемая в ЛСЭ до пуска двигателя, K_C – коэффициент статизма регулятора скорости.

В результате, частота в ЛСЭ определится:

$$f_{рез} = f_0 - \Delta f$$

Для определения результирующей частоты сети необходимо наличие актуальной информации о генерируемой активной мощности, которая может быть получена путем непосредственного или косвенного измерения. Непосредственное измерение генерируемой мощности СГ в ЛСЭ не представляется возможным, т.к. отсутствуют каналы связи и обмен информацией между генерацией и нагрузкой. Для косвенного определения генерируемой активной мощности до пуска АД рассмотрим схему замещения обобщенной структуры ЛСЭ, приведенной на рисунке 2.15.

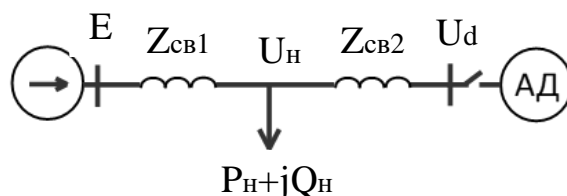


Рисунок 2.15– Схема замещения ЛСЭ с АД

Для нее справедлива следующая система уравнений:

$$\begin{cases} U_d^- = U_n \\ E = U_n + \Delta U_n \\ E = U_d^+ + \Delta U_{нд1} + \Delta U_{нд2} \end{cases},$$

где: U_d^- – напряжение на шинах двигателя до его включения; U_d^+ – напряжение на шинах двигателя на момент пуска; U_n – напряжение в смежном нагрузочном узле; E – ЭДС эквивалентного генератора; ΔU_n – падение напряжения, обусловленное протеканием тока нагрузки; $\Delta U_{нд1}$ – падение напряжения, обусловленное протеканием тока нагрузки и пускового

тока двигателя по сопротивлению связи $Z_{св1}$; $\Delta U_{нд2}$ – падение напряжения, обусловленное протеканием пускового тока двигателя по сопротивлению связи $Z_{св2}$.

Сопротивление связи определяется исходя из разницы напряжения до и после пуска двигателя:

$$Z_{\text{ЭКВ}} = (Z_{св1} + Z_{св2}) = \frac{(U_d^+ - U_d^-)}{I_{\text{пуск}}}$$

Проведя некоторые преобразования приведенной системы уравнений, получим следующее выражение:

$$S_H = \frac{(E^2 - EU_d^-)}{Z_{св1}},$$

где

$$E = \frac{S_d (Z_{св1} + Z_{св2})}{U_d^- - U_d^+}$$

Выражения, приведенные выше, справедливы при следующих допущениях: $E = const$ (СГ без АРВ); при определении $\Delta U_{нд2}$ напряжение U_H принимается равным E . Их введение в модель ПС позволит определять минимальное значение частоты в процессе пуска АД по заданной величине коэффициента и измеренным режимным параметрам на шинах двигателя.

Испытания показали, что определение минимального значения частоты в процессе пуска АД по представленной модели связано с рядом недостатков:

1) Величина коэффициента статизма АРС, зачастую, неизвестна и может изменяться в зависимости от схемно-режимных условий ЛСЭ.

2) Производится оценка не минимального значения частоты в процессе пуска, а ее величины в установившемся режиме после регулирования.

3) Низкая точность модели по определению загрузки генераторных агрегатов, оказывающей значительное влияние на оценку снижения частоты при пуске АД.

Указанные недостатки не позволяют использовать представленную модель для контроля успешности пуска АД в ЛСЭ. Необходима иная модель ПС, учитывающая влияние регуляторов с различными законами управления, которые восстанавливают значение частоты сети после возмущающего воздействия со статической ошибкой или астатически.

В общем случае, при коммутации дополнительной нагрузки в энергосистемах малой мощности происходит изменение частоты сети, величина которого зависит от текущей загрузки генераторов и мощности подключаемого электроприемника. При этом, характер изменения, зачастую, одинаков и зависит от параметров настройки регуляторов и инерции генераторных агрегатов. Сперва происходит снижение частоты до некоторого минимального значения, затем, ее восстановление до прежнего значения (астатическое регулирование) или до нового установившегося с некоторой статической ошибкой (статическое регулирование). На рисунке 2.16 приведен переходный процесс (зависимость частоты от времени) в реальной ЛСЭ при повышении мощности нагрузки на 11 % относительно текущей загрузки генераторов [62]. Из рисунка 2.16 видно, что процесс может быть разделен, как и было отмечено ранее, на две стадии: частота снижается до значения 47,9 Гц; частота восстанавливается до величины 49,05 Гц (статическая ошибка составляет 0,1 Гц). Для контроля успешности пуска АД важным является оценка по локальным измерениям минимального значения частоты (первая стадия рисунка 2.16), которая может быть получена путем прогнозирования ее изменения на раннем этапе процесса.

Предельно отклонение частоты в ЛСЭ при пуске АД по локальным измерениям режимных параметров может быть определено путем экстраполяции зависимости частоты ПС от времени в условиях известного характера ее изменения. Как видно из рисунка 2.16, частота в ЛСЭ на начальном этапе изменяется аperiодически в соответствии с выражением:

$$f = f_{рез} + (f_0 - f_{рез})e^{\alpha t} \quad (9)$$

где: f – фактическая частота ЛСЭ; f_0 – начальное значение частоты; α – декремент затухания, $f_{рез}$ – минимальная частота; t – относительное время начала снижения частоты.

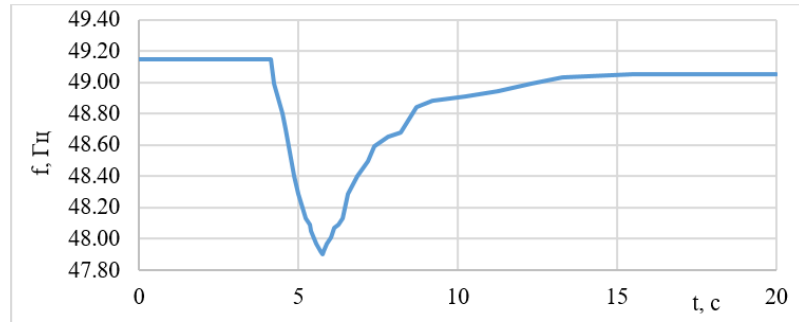


Рисунок 2.16 – Изменение частоты в ЛСЭ при увеличении мощности нагрузки на 11 %

Представленное выражение позволяет спрогнозировать результирующее значение частоты, соответствующее выходу АД на нормальный режим работы. Для нахождения неизвестных коэффициентов в выражении (9), которыми являются $f_{рез}$ и α , необходимо создать переопределённую систему уравнений, далее, воспользоваться любым математическим методом, позволяющим определить значения неизменных искомых параметров, при которых невязка будет минимальна. Для удобного применения математических методов, экспонента в выражении (9) была представлена в виде первых трех членов ряда Тейлора:

$$f = f_{рез} + (f_0 - f_{рез}) \left(1 + \alpha t + \frac{(\alpha t)^2}{2} \right)$$

Методом наименьших квадратов, было получено выражение для определения минимального значения частоты в ЛСЭ при пуске АД:

$$f_{рез} = \frac{\frac{1}{4} \alpha^4 f_0 (\sum t^4) + \alpha^3 f_0 (\sum t^3) + \alpha^2 \left(\frac{3}{2} f_0 (\sum t^2) - \frac{1}{2} (\sum f \cdot t^2) \right) + \alpha (f_0 (\sum t) - (\sum f \cdot t))}{\frac{1}{4} \alpha^4 (\sum t^4) + \alpha^3 (\sum t^3) + \alpha^2 (\sum t^2)},$$

где

$$\alpha = -\frac{\frac{1}{2}(\sum t^3)(f_0(\sum t) - (\sum f \cdot t)) + \frac{1}{2}(\sum t^2)((\sum f \cdot t^2) - f_0(\sum t^2))}{\frac{1}{4}((\sum t^4)(f_0(\sum t) - (\sum f \cdot t)) + (\sum t^3)((\sum f \cdot t^2) - f_0(\sum t^2)))}$$

Моделирование снижения частоты апериодическим звеном позволяет на малом временном интервале по характеру ее изменения, измеренной на шинах АД, определить минимальное значение частоты в ЛСЭ в процессе пуска. Представленная модель вполне применима для прогностического контроля успешности пуска АД в ЛСЭ на раннем этапе, т.к., зачастую, коэффициенты АРС специально стремятся подобрать таким образом, чтобы обеспечить его работу в зоне апериодической устойчивости.

2.4.4 Методы параметрической идентификации асинхронного двигателя

Для определения продолжительности пуска и критических параметров режима для его успешности необходимы электрические и механические параметры АД. Их величина может быть определена:

- По паспортным данным.
- Из опытов КЗ и холостого хода (ХХ) с применением методов крутильных, маятниковых колебаний, падающего груза или свободного выбега для определения постоянной инерции двигателя.
- Методами параметрической идентификации.

Расчет электрических и механических параметров АД по паспортным данным связан с появлением дополнительной погрешности ввиду:

- Использования усредненных параметров всей серии, а не конкретной единицы оборудования.
- Приближенного разделения суммарных активных и реактивных сопротивлений между ротором и статором двигателя (зачастую, суммарное сопротивление разделяется поровну).

- Отсутствия фактического учета суммарной постоянной инерции двигателя и приводного механизма.

Причем, важным является то, что данные, указанные в паспорте АД, определяются из опытов КЗ и ХХ с применением методов определения постоянной инерции двигателя. Их применение, позволяя получить параметры АД, требует полного вывода из работы оборудования с нарушением производственного процесса, а также: наличия диагностической площадки, специализированного оборудования и компетентного персонала. Данные мероприятия в условиях эксплуатации и необходимости адаптивного управления АД в ЛСЭ для контроля успешности его пуска трудоемки и неприменимы.

Наибольший интерес представляет реализация параметрической идентификации АД в процессе пуска в условиях отсутствия возможности выдачи искусственных управляющих воздействий на подконтрольный двигатель до его включения на полное напряжение ПС. Для выполнения пассивной идентификации АД необходимо создать специальные режимы его работы, в которых имеется возможность определения необходимых электрических и механических параметров в используемых схемах замещения.

При включении с механической нагрузкой АД некоторое время работает в режиме КЗ, потребляя пусковой ток, при практически неизменной скорости вращения. На этом интервале времени можно считать, что скольжение равно 1 и суммарная потребляемая мощность двигателя складывается из потерь на нагрев и рассеивание магнитного поля в обмотках статора и ротора. Используя измеренные значения режимных параметров на этом промежутке, имеется возможность определить электрические параметры АД в процессе пуска. Причем, для минимизации влияния свободных составляющих тока на определение электрических параметров двигателя, окно идентификации может быть сдвинуто на несколько периодов промышленной частоты.

Принимая на момент пуска скольжение равное 1, суммарное активное и реактивное сопротивление АД по Г-образной упрощенной схеме замещения определится:

$$R_{\partial\vartheta} = \frac{P}{I^2 \frac{\partial\vartheta}{\partial\vartheta}}$$

$$X_{\partial\vartheta} = \frac{Q}{I^2 \frac{\partial\vartheta}{\partial\vartheta}}$$

Для нахождения единственно верного решения был использован метод наименьших квадратов, основанный на минимизации суммы квадратов отклонений функций от искомым переменных. Выражение, полученное в соответствии с методом наименьших квадратов, принимает следующий вид:

$$R_1 = R_2' = \frac{\sum(P \cdot I^2)}{6 \sum I^4}$$

$$X_1 = X_2' = \frac{\sum(Q \cdot I^2)}{6 \sum I^4}$$

По представленным выражениям было определено суммарное активное сопротивление двигателя АОК2-51-6 УЗ с закороченным фазным ротором по осциллограмме рисунка 2.17, которое составило 2,835 Ом.

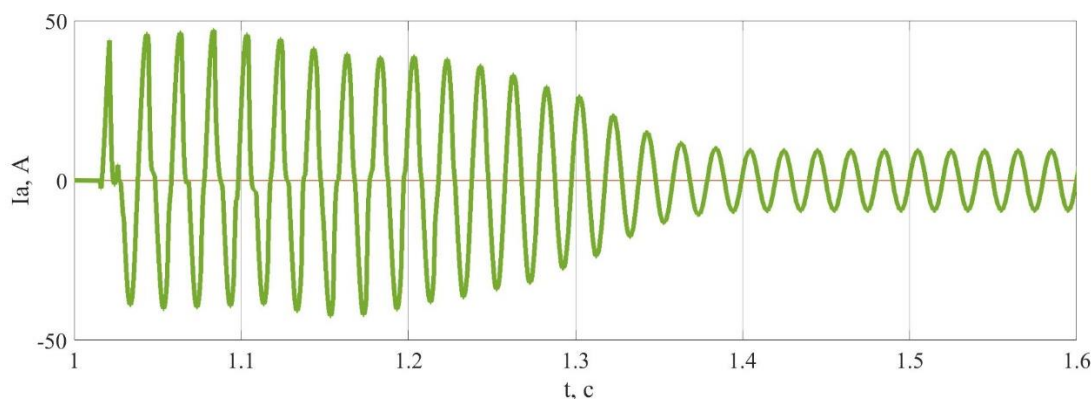


Рисунок 2.17– Ток фазы А статора в процессе пуска и в установившемся режиме работы двигателя

В соответствие с паспортными данными [59], [63] активное сопротивление статора исследуемого двигателя составляет 1,3 Ом. Как отмечается в [53] полученное из опыта КЗ суммарное активное сопротивление двигателя поровну распределяется между статором и ротором. При таком распределении, погрешность определения активного сопротивления статора АД методом параметрической идентификации составило 9%.

Механические параметры АД при отсутствии измерения скорости вращения ротора могут быть определены из режима работы с возможностями ее косвенного определения. Таким режимом является выбег АД при его отключении от ПС, который может быть зарегистрирован в любом ранее приведенном режиме работы двигателя. Для режима выбега справедливо следующее выражение:

$$T j \frac{dS}{dt} = M_{\text{сопрт}}$$

Временной интервал остановки двигателя зависит от величины тормозящего момента и суммарной инерции привода. При этом, в момент отключения АД от ПС ток в беличьей клетке не меняется скачком, а плавно затухает до нулевого значения с некоторой постоянной времени, значительно меньшей, чем суммарная постоянная инерции двигателя. В результате, ток роторной обмотки наводит ЭДС на обмотках статора, фиксируя частоту которого, имеется возможность косвенно определить скорость вращения ротора АД. Величина суммарной постоянной инерции АД определится:

$$T j = M_{\text{сопрт}} / \frac{dS}{dt}$$

Для нахождения решения был использован метод наименьших квадратов, основанный на минимизации суммы квадратов отклонений функций от искомым переменных. Выражение, полученное в соответствие с методом наименьших квадратов для постоянной инерции в именованных единицах, имеет следующий вид:

$$T_j = \frac{\sum \frac{(-M_{\text{сопр}ti})^{w_{\text{ном}}}}{M_{\text{ном}} \cdot \Delta\omega_{2i}} \Delta t_i}{n}$$

На цифровой модели рисунка 2.9 была проведена верификация предложенного метода идентификации суммарной постоянной инерции АД. На рисунке 2.18 приведена осциллограмма напряжения фазы А при выбеге АД. На интервале от 2 до 2.2 с производилась идентификация суммарной постоянной инерции двигателя, величина которой составила 1,75 с (фактическое значение – 1,76 с). Погрешность определения составила менее 1 %.

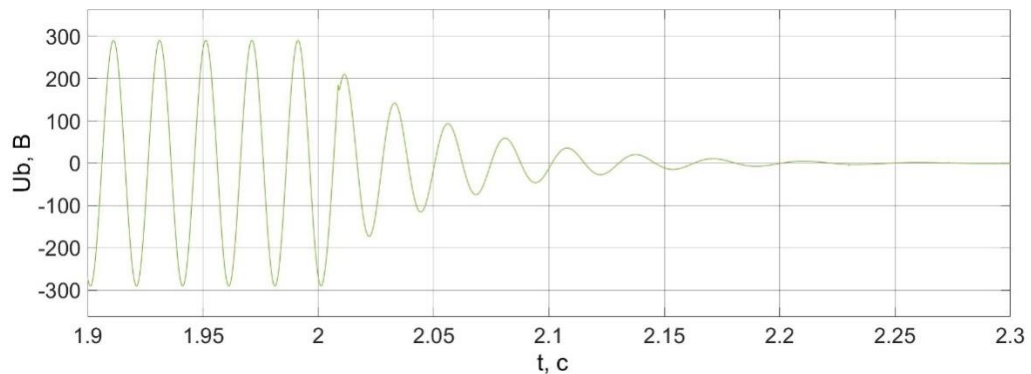


Рисунок 2.18– Напряжение статора фазы А до и в процессе выбега АД

Предложенные и приведенные методы параметрической идентификации АД позволяют с допустимой погрешностью определять его механические и электрические параметры в условиях ограниченных измерений и возможностей формирования управляющих воздействий с последующим определением критических параметров для контроля успешности пуска АД.

Выводы по главе 2

1. Основными значащими параметрами при контроле успешности пуска АД являются напряжение и частота ПС, изменение которых в процессе пуска приводит к изменению статической моментно-скоростной характеристики двигателя и возможности возникновения аварийных режимов

в прилегающей сети с отключением генераторных агрегатов и/или потерей устойчивой работы прочей вращающейся нагрузки.

2. Предиктивный контроль успешности пуска АД возможен благодаря разделению его процесса на ряд последовательных этапов, на каждом из которых производится определение необходимых электрических, критических, механических параметров, с моментами времени проверки соблюдения условий успешности.

3. Упрощенная модель АД, имеющая погрешность определения пускового момента менее 5%, вполне применима для контроля успешности пуска АД на раннем этапе процесса, т.к. для крупных двигателей с большим маховым моментом влияние электромагнитного момента, определенного по динамической модели, несущественно отличается от влияния, полученного по статической модели.

4. При наличии актуальных данных о величине и характере изменения режимных параметров АД на раннем этапе процесса пуска возможна прогностическая оценка минимального значения частоты в ПС.

5. В условиях необходимости экспресс перекрытия процессов неуспешных пусков и отсутствия возможности непосредственного измерения скорости вращения и токов ротора АД с допустимой погрешностью возможна пассивная идентификация электрических и механических параметров двигателя.

ГЛАВА 3 АЛГОРИТМЫ КОНТРОЛЯ УСПЕШНОСТИ ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И ИХ ВЕРИФИКАЦИЯ НА ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЯХ

3.1 Алгоритмы расчета критических параметров и поэтапного контроля успешности пуска двигателя

Контроль успешности пуска АД должен выполняться в соответствие со строго заданными алгоритмами, по которым, согласно обобщенной структуре поэтапного контроля рисунка 12, осуществляется проверка соблюдения условий его выполнимости на ранней стадии процесса. Для выполнения контроля на ранней стадии процесса алгоритмы в соответствие с особенностями функционирования ЛСЭ сопоставимой мощности должны отвечать следующим требованиям:

- Однозначность (определенность). Последовательные операции алгоритмов должны приводить к конкретному результату (разрешению пуска или его прерыванию в условиях неуспешности) с привязкой к заданным величинам (относительному времени или другим специально введенным переменным).
- Конечность. Полный цикл алгоритма контроля (пуск, прерывание процесса в условиях неуспешности, ожидание нормальности режимных параметров ЛСЭ, включение через определенный промежуток времени без улучшения условий пуска с последующим отключением двигателя) должен выполняться заданное число раз, по завершению которых производится его деинициализация.
- Инвариантность. Алгоритмы должны обеспечивать возможность контроля успешности пуска АД вне зависимости от схемно-режимных условий ЛСЭ, электрических и механических параметров двигателя, а также его оснащения (наличие датчиков скорости, магнитного потока и т.п.).
- Достаточное быстродействие. Оценка выполнимости пуска по алгоритму контроля с выявлением условий неуспешности должна

выполняться на малом временном интервале, обеспечивая экспресс прерывание неуспешного пускового процесса (с учетом инерционности контролируемых параметров).

- Наличие входных и выходных величин. Для контроля успешности пуска с использованием верифицированных моделей АД, ПС с учетом методов параметрической идентификации в алгоритме должны быть реализованы возможности введения, анализа и преобразования фактических режимных параметров двигателя, а также блокировки внешней команды (ВК) на его включение.

Для создания комплексного алгоритма необходимо разработать отвечающие приведенным требованиям частные алгоритмы этапов контроля пуска АД, включающие определение необходимых для проверки условий успешности критических параметров режима на базе предложенных моделей двигателя и ПС. В соответствии с обобщенной структурой рисунка 12 комплексный алгоритм контроля успешности пуска АД может быть разделен на шесть блоков:

- Блок измерения фактических мгновенных значений режимных параметров и их преобразования в действующие значения. Измерение напряжения и тока выполняется на шинах АД.

- Блок 1-го этапа контроля, включающий оценку нормальности режимных параметров для ЛСЭ. Требуемые для контроля по условиям успешности пуска критические параметры: минимально допустимое напряжение для прочей вращающейся нагрузки в ЛСЭ (U_{don}); предельно допустимое минимальное значение частоты в ЛСЭ (f_{min}).

- Блок 2-го этапа контроля (зондирующий интервал прямого пуска), в котором на начальной стадии процесса пуска АД выполняется идентификация электрических параметров двигателя и определение критических параметров режима двигателя с оценкой нормальности режимных параметров для ЛСЭ и их допустимости для успешного включения

двигателя. Требуемые для контроля по условиям успешности пуска критические параметры: минимально допустимое напряжение для прочей вращающейся нагрузки в ЛСЭ (U_{don}); предельно допустимое минимальное значение частоты в ЛСЭ (f_{min}); минимальное напряжение для успешного пуска подконтрольного АД ($U_{кр}$); предельное значение частоты в сети для успешного пуска АД ($f_{кр}$).

- Блок 3-го этапа контроля, в котором выполняется прогностическая оценка влияния АРС генераторных агрегатов на частоту в ЛСЭ в процессе пуска АД и ее допустимости для оборудования ПС. Для контроля по условиям успешности пуска требуется значение предельно допустимого минимального значения частоты в ЛСЭ (f_{min}), при этом, дополнительно может быть введена верхняя граница по частоте, определяемая параметрами подконтрольного двигателя ($f_{кр}$).

- Блок 4-го этапа контроля, в котором выполняется оценка продолжительности пуска АД и ее допустимости. Для контроля успешности пуска требуется значение максимально допустимого времени пуска АД по условию допустимости снижения напряжения в смежных нагрузочных узлах или по условию предельного термического воздействия ($t_{доп}$).

- Блок 5-го этапа контроля, в котором выполняется ЗПВ. Для введения ЗПВ необходимы разрешения на пуск от прочих этапов контроля или фиксация многократных включений двигателя с последующим прерыванием без улучшения условий пуска.

В блоке измерения режимных параметров, по данным которого выполняется проверка успешности на последующих этапах контроля, производится определение действующего напряжения и тока, угла между напряжением и током, частоты ПС. Цикл алгоритма измерения режимных параметров, соответствующий приведенным требованиям, вербально может быть представлен следующим образом:

- Программно генерируются опорные сигналы синусоидальной формы частотой 50 Гц с фазовым сдвигом 90 градусов (синусоида и косинусоида), измеряются мгновенные напряжение и ток двигателя.
- Выделяются действительная и мнимая составляющая вектора напряжения для нахождения амплитуды сигнала (удвоенный квадратный корень суммы квадратов мгновенных значений действительной и мнимой составляющей вектора напряжения). Действительная составляющая определяется произведением мгновенного напряжения на опорный сигнал (синусоида) с применением фильтра низких частот. Мнимая составляющая определяется произведением мгновенного напряжения на опорный сигнал с фазовым сдвигом 90 градусов (косинусоида) с применением фильтра низких частот.
- Выделяются действительная и мнимая составляющие вектора тока для нахождения амплитуды сигнала (удвоенный квадратный корень суммы квадратов мгновенных значений действительной и мнимой составляющей вектора тока). Действительная составляющая определяется произведением мгновенного тока на опорный сигнал (синусоида) с применением фильтра низких частот. Мнимая составляющая определяется произведением мгновенного тока на опорный сигнал с фазовым сдвигом 90 градусов (косинусоида) с применением фильтра низких частот.
- Определяется фаза тока и напряжения относительно опорных сигналов как арктангенсы отношения их мнимых и действительных составляющих.
- По скорости вращения вектора напряжения/тока (производная зависимости фазы от времени) относительно опорной синусоиды рассчитывается частота ПС.
- Определяется фаза между напряжением и током как разница углов опережающего и отстающего векторов.

- По найденным напряжению, току и фазе рассчитывается потребляемая мощность двигателя.

Алгоритм измерения режимных параметров должен быть инициализирован во время включения автоматики контроля успешности пуска и находиться в активном состоянии вне зависимости от схемно-режимных условий в ПС и режима АД. Интервал между циклами расчета режимных параметров зависит от заданной частоты дискретизации выбранной аппаратной базы и ограничивается ее производительностью.

Далее приведены частные алгоритмы контроля и определения соответствующих каждому этапу критических параметров режима ЛСЭ для успешного пуска АД.

3.1.1 Алгоритм контроля и определения минимально допустимого напряжения для прочей нагрузки в локальной системе энергоснабжения

Снижение уровней напряжения в процессах пусков особенно опасны для нагрузочных узлов электрической сети с АД. Пуск может являться причиной потери устойчивой работы и опрокидывания прочей двигательной нагрузки, что усугубляется возможностью их последующего самозапуска при восстановлении нормального напряжения при прерывании неуспешного пускового процесса крупного АД.

Под минимально допустимым напряжением для прочей вращающейся нагрузки в ЛСЭ понимается его значение, при котором величина максимального электромагнитного момента двигателя равна моменту сопротивления приводного механизма. Минимально допустимое напряжение для устойчивой работы АД по Г-образной упрощенной схеме замещения может быть определено по выражению:

$$U_{\text{дон}} = \sqrt{\frac{2}{3}} M_{\text{сопр}} w_c (X_1 + X_2')$$

Для контроля успешности пуска АД по представленному выражению по условию (8) для определения минимально допустимого напряжения прочей нагрузки ЛСЭ необходима информация о величине их моментов сопротивления приводных механизмов и электрических параметрах. При наличии данных об электрических и механических параметрах, принимаемая для контроля успешности величина допустимого напряжения определяется наибольшим его значением для конкретной единицы оборудования, что обеспечивает безопасный с точки зрения устойчивости прочей нагрузки пуск крупного АД.

В действительности, схемные и режимные параметры нагрузки в прочих узлах ЛСЭ, как правило, неизвестны. Локальный контроль режимных параметров только на шинах АД не позволяет произвести параметрическую идентификацию всех нагрузочных узлов ЛСЭ с последующим расчетом и выбором наибольшего допустимого напряжения. Необходимость в оценке допустимости напряжения для прочей нагрузки при отсутствии данных или возможности определения ее параметров заставляет руководствоваться иными путями определения его предельного значения.

В некоторых случаях, предельное значение напряжения для контроля успешности пуска АД для оборудования ЛСЭ может быть заранее ориентировочно известно и приравнено к конкретному значению. В методических указаниях по устойчивости энергосистем [49] рекомендуется принимать предельное напряжение для узлов нагрузки, при отсутствии более точных данных, равным большему из двух: $0,7U_{ном}$ и $0,75U_{ном}$, где $U_{ном}$ – напряжение узлов нагрузки при нормальном режиме энергосистемы. При этом, для определения нормального напряжения узлов нагрузки необходимо произвести расчет установившегося режима с номинальными параметрами оборудования, что при отсутствии точной информации о схемно-режимных условиях в ЛСЭ не представляется возможным.

В результате, до пуска АД и на его раннем этапе предельное напряжение для контроля его успешности при отсутствии данных о параметрах и режимах работы прочей нагрузки ЛСЭ принимается равным $0,7U_{ном}$. Введение подобного допущения при осуществлении прерывания на малом зондирующем временном интервале или блокировке процесса неуспешного пуска АД позволит без длительного определения критических параметров оценивать осуществимость пуска двигателя по условию влияния на прочую нагрузку в ЛСЭ.

В процессе контроля успешности пуска АД нормальность напряжения в ЛСЭ по условию (8) в соответствии с обобщенной структурой контроля рисунка 2.6 оценивается на этапе 1 (до пуска) и 2 (на начальной стадии). Заблаговременная проверка нормальности напряжения на 1-ом этапе контроля позволяет блокировать команду на пуск АД в условиях его априорной неуспешности. Быстрое прерывание процесса при снижении напряжения ниже допустимого уровня на 2-ом этапе контроля обеспечивает сохранение устойчивой работы нагрузки ЛСЭ (рисунок 2.5).

Контроль снижения напряжения для прочих нагрузочных узлов осуществляется в соответствии со следующим алгоритмом (рисунок 3.1):

- До пуска АД:
 1. Измеряется фактическое значение мгновенного напряжения на шинах подконтрольного АД.
 2. По мгновенным значениям определяется действующее значение напряжения.
 3. Производится сравнение фактического действующего напряжения на шинах АД и минимально допустимого напряжения для прочей нагрузки по условию (8), которое должно соблюдаться на заданном интервале в нормальном установившемся режиме ПС.
 4. При допустимом уровне напряжения формируется команда на разрешение пуска АД по условию (8).

- В процессе пуска:
 1. Измеряется фактическое значение мгновенного напряжения на шинах подконтрольного АД
 2. По мгновенным значениям определяется действующее значение напряжения.
 3. До достижения двигателем нормальной установившейся скорости вращения производится сравнение фактического действующего напряжения на шинах в процессе пуска АД и минимально допустимого напряжения для прочей нагрузки по условию (8). Снижение напряжения ниже допустимого уровня приводит к формированию команды на прерывание процесса пуска по условию (8).
 4. По достижению двигателем установившейся скорости вращения при фиксации соблюдения всех условий успешности пуска вводится ЗПВ, алгоритм контроля минимально допустимого напряжения для прочей нагрузки в ЛСЭ блокируется.

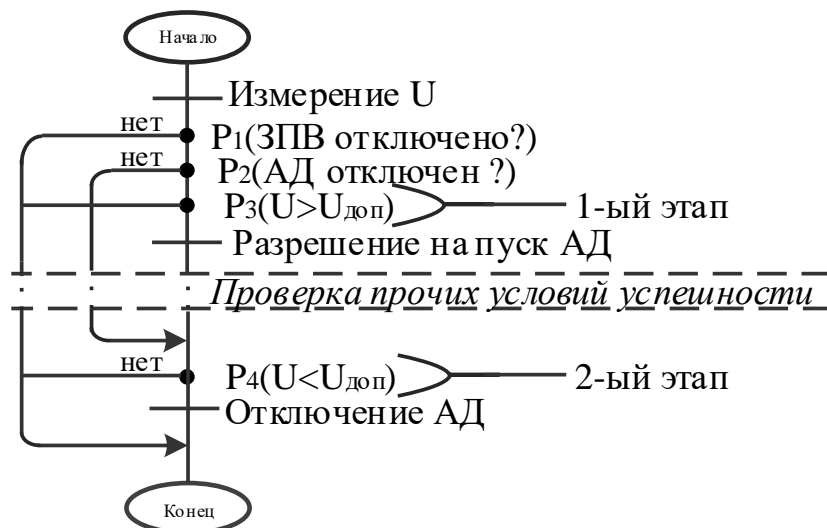


Рисунок 3.1 – Алгоритм контроля минимально допустимого напряжения для прочей нагрузки в ЛСЭ

При несоблюдении условия в заданные моменты проверки, формируется команда на прерывание процесса пуска АД с ожиданием благоприятных условий для повторного включения.

При необходимости, значение предельного напряжения может быть скорректировано по ретроспективным данным параметров режима с числом пусков АД с несоблюдением заданного условия в зафиксированных процессах их прерывания.

3.1.2 Алгоритм контроля и определения предельно допустимой минимальной частоты в локальной системе энергоснабжения

Пуск крупного АД в ЛСЭ приводит к значительному отклонению частоты, величина которого зависит от предшествующих пуску числа и загрузки генераторных агрегатов. Длительная работа на пониженной частоте наиболее часто используемых в ЛСЭ ГПУ и ГТУ приводит к возникновению вибраций с необходимостью их отключения. Технологическая автоматика настроена таким образом, чтобы заблаговременно производить отключение генераторных агрегатов от сети до их вероятного повреждения. Отключение генераторных агрегатов в ЛСЭ приводит к полной потере электроснабжения потребителей, что является недопустимым.

Под предельно допустимой минимальной частотой в ЛСЭ понимается предельное значение рабочей частоты вращения генераторных агрегатов, свыше которой возникают недопустимые вибрации первичного двигателя, прерываемые технологической автоматикой. Предельная частота для первичных двигателей, в частности, с разрезным консольным ротором (вал разделен на две части, имеющие опоры только с одной стороны турбины), применимых в установках малой и средней мощности, определяется по появлению резонанса, зоны которого зависят от гироскопического момента и упругости опор, обладающих малой массой и значительной гибкостью с возможностями возникновения вибраций и снижения критического числа оборотов [64]. В общем случае, из-за возникновения колебаний упругая линия вала может иметь круговую траекторию движения с некоторой угловой скоростью вокруг геометрической оси, проходящей через центры опор.

Возникает явление прецессии, когда направление и скорость вращения упругой линии не зависят от направления и скорости вращения ротора первичного двигателя. В результате, ротор имеет две резонансные частоты, определяемых появлением прямой (угловая скорость круговой траектории движения упругой линии вала совпадает с направлением вращения вала) и обратной (угловая скорость круговой траектории движения упругой линии вала не совпадает с направлением вращения вала) прецессии [65], т.е. существует ограничение по минимальной и максимальной частоте вращения вала первичного двигателя.

Предельная частота существует и для других компоновок и типов первичных двигателей. Ее значение определяется конструкцией первичного двигателя и указывается в паспорте устройства. Зачастую, критическое значение частоты принимается равным 45 Гц, что с другой стороны соответствует ограничению по величине максимального отклонения частоты в локальных энергосистемах, регламентированной ГОСТ по качеству электрической энергии.

В условиях отсутствия информации о параметрах генераторных агрегатов или возможности их параметрической и структурной идентификации предельное минимальное значение частоты может быть приятно равным усредненному значению существующих установок. В работе критическое значение частоты принято равным 45 Гц, которое не противоречит паспортным и регламентированным ГОСТ параметрам.

Контроль предельно допустимой минимальной частоты в ЛСЭ осуществляется в соответствии со следующим алгоритмом (рисунок 3.2):

- До пуска АД:
 1. Измеряются фактические значения мгновенного напряжения на шинах подконтрольного АД.
 2. По мгновенным значениям напряжения определяется частота в ПС.

3. Производится сравнение фактической частоты и предельно допустимой минимальной частоты по условию (4), которое должно соблюдаться на заданном интервале в нормальном установившемся режиме ПС.

4. При соблюдении условия (4) формируется команда на разрешение пуска АД.

- В процессе пуска:

1. Измеряются мгновенные напряжения на шинах подконтрольного АД.

2. По мгновенным значениям напряжения определяется частота в ПС.

3. До достижения двигателем установившейся скорости вращения производится сравнение фактической частоты и предельно допустимой минимальной частоты по условию (4). При снижении частоты ниже допустимой формируется команда на прерывание процесса пуска двигателя по условию (4).

4. Формируется база (массив) ретроспективных данных для прогностической оценки результирующего минимального значения частоты в процессе пуска двигателя по предложенной модели ПС.

5. Производится прогностическая оценка минимальной частоты в ЛСЭ в процессе пуска АД.

6. Производится сравнение прогнозной минимальной частоты и предельно допустимой минимальной частоты в ЛСЭ по условию (4). При соблюдении условия, пуск АД продолжается.

7. По достижению двигателем установившейся скорости вращения при фиксации соблюдения всех условий успешности пуска вводится ЗПВ, алгоритм контроля предельно допустимой минимальной частоты в ЛСЭ блокируется.

Для контроля успешности пуска АД в соответствии с обобщенной структурой (рисунок 2.6) допустимость фактического снижения частоты в ЛСЭ по условию (4) оценивается на этапах с 1 (до пуска) по 3.

Постоянная фиксация частоты в процессе пуска необходима для того, чтобы не допустить снижения частоты ниже предельного значения даже в условиях возникновения погрешностей модели ПС ввиду зашумления измерительных каналов или коммутации дополнительного нагрузки при пуске АД. Заблаговременная проверка допустимости частоты на 1-ом этапе контроля позволяет блокировать команду на пуск АД в условиях его априорной неуспешности. Прерывание процесса при условии прогностического снижения частоты ниже допустимого уровня по модели ПС на 3-ем этапе контроля обеспечивает заблаговременное отключение АД до фактического наступления режима, соответствующего критической частоте в ЛСЭ.

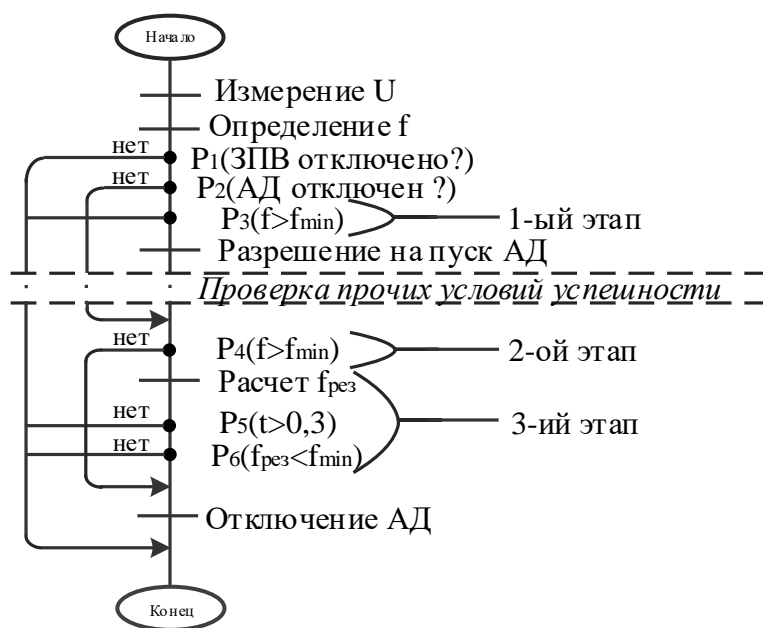


Рисунок 3.2 – Алгоритм контроля предельно допустимой минимальной частоты в ЛСЭ

При несоблюдении условий успешности пуска в заданные моменты проверки, формируется команда на прерывание процесса пуска АД с ожиданием благоприятных условий для повторного включения.

При необходимости, значение предельной минимальной частоты в ЛСЭ может быть скорректировано по ретроспективным данным параметров режима с учетом числа пусков АД с несоблюдением заданного условия в зафиксированных процессах их прерывания.

3.1.3 Алгоритм контроля и определения минимального напряжения для успешного пуска асинхронного двигателя

Снижение напряжения на шинах АД приводит к снижению электромагнитного момента, который пропорционален его квадрату. Снижение электромагнитного момента приводит к утяжелению условий пуска АД с увеличением его продолжительности. В предельном случае, пуск АД будет неосуществим ввиду снижения пускового момента ниже момента сопротивления приводного механизма, т.е. отсутствия ускорения в момент включения. Величина минимального напряжения для пуска, при котором пусковой момент АД равен моменту сопротивления приводного механизма, может быть определена исходя из условия успешности:

$$M_{\text{пуск}} = M_{\text{сопрт}}$$

где по упрощенной Г-образной схеме замещения:

$$M_{\text{пуск}} = \frac{U^2 R_2'}{(X^2 + R^2)_{\text{вс}}}$$

Минимальное напряжения для успешного пуска АД определится по выражению:

$$U_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{M_{\text{сопрт}}(X^2 + R^2)_{\text{вс}}}{R_2'}}$$

При валидации упрощенной Г-образной модели АД в цифровой модели рисунка 2.9 были определены критические параметры режима для успешного пуска двигателя, в частности, минимальное напряжение. Фактическое минимальное напряжение для успешного пуска АД при моменте

сопротивления $213 \text{ Н}^*_{\text{м}}$ составило $321,6 \text{ В}$. В соответствии с предложенным выражением, минимальное напряжение для успешного пуска составило:

$$U_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{M_{\text{сопр}}(X^2 + R^2)w_c}{R_2'}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 213((0,1 + 0,1)^2 + (0,021 + 0,036)^2)314}{3 \cdot 0,021}} = 318,16 \text{ В}$$

Погрешность определения минимального напряжения по представленному выражению составила $1,1\%$, что является вполне допустимым для контроля успешности пуска АД на ранней стадии процесса.

Для исключения возникновения аварийных режимов в ЛСЭ необходимо осуществлять пуск АД при напряжении, достаточном для преодоления тормозящего момента приводного механизма, т.е. выше его минимального (критического) значения. Значение критического напряжения при первичном пуске при изменении частоты ПС в соответствии с обобщенной структурой контроля успешности пуска АД (рисунок 2.6) определяется на 2-ом этапе, когда произведена параметрическая идентификация двигателя. Проверка условия успешности по величине критического напряжения (5) выполняется в момент времени (С). В последующих пусках, при наличии ретроспективных данных, проверка условия успешности (5) дополнительно выполняется на 1-ом этапе для блокировки команды на включение двигателя при фиксации априорной неуспешности пуска в текущих схемно-режимных условиях ЛСЭ.

Контроль минимального напряжения для успешного пуска АД осуществляется в соответствии со следующим алгоритмом (рисунок 3.3):

- До пуска:
 1. Измеряется значение мгновенного напряжения на шинах подконтрольного АД.
 2. По мгновенным значениям определяется величина действующего значения напряжения.
 3. При наличии ретроспективных данных о величине критического напряжения, полученного из предшествующего пускового режима, производится сравнение фактического действующего напряжения на шинах

АД и его минимально допустимого напряжения для успешного пуска по условию (5), которое должно соблюдаться на заданном интервале в нормальном установившемся режиме ПС (при отсутствии ретроспективных данных условие успешности до пуска считается выполненным).

4. При соблюдении условия (5) формируется команда на разрешение пуска АД.

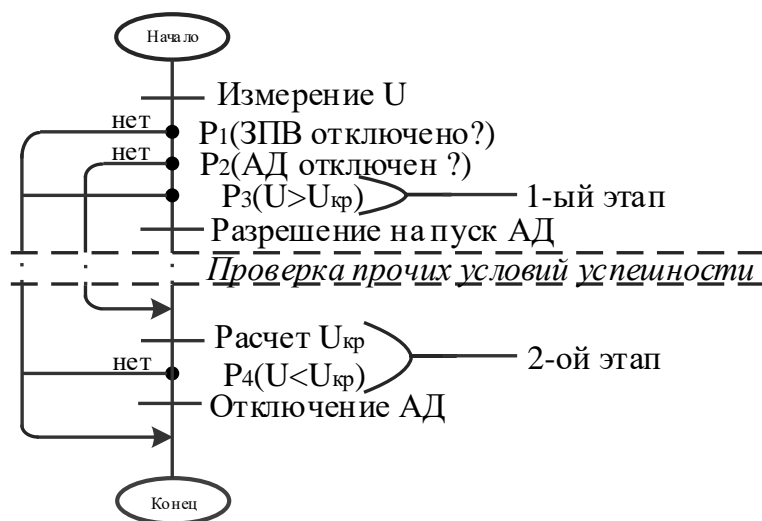


Рисунок 3.3 – Алгоритм контроля минимально допустимого напряжения для успешного пуска АД

- В процессе пуска:
 1. Измеряются значения мгновенного напряжения на шинах подконтрольного АД.
 2. По мгновенным значениям определяется величина действующего значения напряжения.
 3. Рассчитывается значение минимального напряжения для успешного пуска АД.
 4. Производится сравнение фактического действующего напряжения на шинах АД и его минимально допустимого значения для успешного пуска по условию (5). При соблюдении условия, пуск АД продолжается.
 5. По достижению двигателем установившейся скорости вращения при фиксации соблюдения всех условий успешности пуска вводится ЗПВ,

алгоритм контроля минимально допустимого напряжения для успешного пуска АД блокируется.

При несоблюдении условия в заданные моменты проверки, формируется команда прерывания процесса пуска АД с ожиданием благоприятных условий для повторного включения.

Следует отметить, что наличие напряжения на шинах АД при пуске выше критического значения не гарантирует его успешность, т.к. не учитывает допустимость его длительности.

3.1.4 Алгоритм контроля и определения предельной частоты для успешного пуска асинхронного двигателя

Изменение частоты сети оказывает влияние не только на генерирующее оборудование, но и на работу электроприемников. В соответствии с известным соотношением момента и активной мощности, повышенная частота в ЛСЭ снижает электромагнитный момент АД.

Под критической частотой для пуска АД понимается такое значение частоты, при котором величина пускового электромагнитного момента равна моменту сопротивления приводного механизма. В соответствии с Г-образной упрощенной схемой замещения выражение для определения предельного значения частоты принимает следующий вид:

$$X^2 \frac{\omega^3}{\omega_{НОМ}^2} + R^2 \omega - \frac{U^2 R_2'}{M_{сопрт}} = 0$$

Действительным корнем представленного выражения является угловая скорость вращения магнитного поля статора, свыше которой пуск АД будет невозможен. По общеизвестному выражению связи угловой скорости вращения магнитного поля и частоты может быть определено ее критическое значение для успешного пуска АД. Следует отметить, что выражение учитывает изменение индуктивного сопротивления АД в зависимости от частоты ПС, при условии, что в первый момент времени скольжение равно 1.

В условиях ограниченных возможностей исполняющего алгоритм устройства (низкая вычислительная точность и/или разрешающая способность) представленное выражение по определению предельного значения частоты можно упростить, полагая, что индуктивные сопротивления ротора и статора постоянны и не зависят от частоты сети. В результате, предельное значение частоты для успешного пуска АД определится:

$$f_{кр} = \frac{U^2 R'_2}{M_{сопрт}(X^2 + R^2)}$$

При валидации упрощенной Г-образной модели АД в цифровой модели рисунка 2.9 были определены критические параметры режима для успешного пуска двигателя, в частности, предельная частота по представленным выражениям. Фактическое предельно допустимое значение частоты для успешного пуска двигателя при заданном моменте сопротивления на валу (213 Н*м) составило 51,21 Гц. Предельно допустимая частота для успешного пуска АД по упрощенному выражению – 54,64 Гц (погрешность 6,7%). Использование упрощенного выражения при контроле успешности пуска АД приводит к появлению дополнительной погрешности определения критических параметров режима, что может привести к неверной выдаче или отсутствию команды на прерывание процесса с необходимостью введения поправочных коэффициентов, и является нежелательным.

Предельное значение частоты при учете изменения реактивного сопротивления было определено по выражению:

$$X^2 \frac{\omega^3}{\omega_{Нач}^2} + R^2 \omega - \frac{U^2 R'_2}{M_{сопрт}} = 0$$

$$0,04489 \cdot \omega^3 + 0,0032 \cdot \omega - 15,28 = 0$$

Решением данного уравнения является действительное значение $\omega=316,73$ рад/с или 50,41 Гц, соответственно. Погрешность составляет 1,6%, что является вполне допустимым для контроля успешности пуска АД на ранней стадии процесса. Также, исследования показали, что параметр

оказывает значительное влияние в том случае, если момент сопротивления на валу двигателя близок к пусковому при номинальном напряжении и ЛСЭ обладает сильной электрической связностью. В противном случае, рассчитанное значение предельной частоты не войдет в допустимую область работы ЛСЭ и может не учитываться при контроле успешности пуска двигателя (определяющим критическим параметром является минимальное напряжение).

Для контроля успешности пуска АД в соответствии с обобщенной структурой (рисунок 2.6) допустимость фактической частоты для разгона в ЛСЭ по условию (4) оценивается на этапах с 1 (до пуска) по 2. На 2-ом этапе контроля после параметрической идентификации АД по фактической частоте и напряжению определяется предельная частота для успешного пуска АД по приведенному выше выражению. В момент времени (С) выполняется проверка соблюдения условия (4) и, при необходимости, формируется команда на отключение. На 1-ом этапе при последующих пусках по ретроспективным данным до включения АД оценивается текущий уровень частоты относительно ее предельного значения и, при несоблюдении условия успешности, производится блокировка команды на включение.

Контроль предельной частоты успешного пуска АД осуществляется в соответствии со следующим алгоритмом (рисунок 3.4):

- До пуска АД:
 1. Измеряются значения мгновенного напряжения на шинах подконтрольного АД.
 2. По мгновенным значениям напряжения определяется частота в ПС.
 3. При наличии ретроспективных данных о величине предельной частоты, полученной из предшествующего пускового режима, производится сравнение фактической частоты и ее предельного значения по условию (4), которое должно соблюдаться на заданном интервале в нормальном

установившемся режиме ПС (при отсутствии ретроспективных данных условие успешности до пуска считается выполненным).

4. При соблюдении условия (4) формируется команда на разрешение пуска АД.

- В процессе пуска:

1. Измеряются значения мгновенного напряжения на шинах подконтрольного АД.

2. По мгновенным значениям напряжения определяется частота в ПС.

3. Рассчитывается значение предельной частоты для успешного пуска АД.

4. Производится сравнение фактической частоты ПС и ее предельного значения для успешного пуска АД по условию (4). При соблюдении условия, пуск АД продолжается.

5. По достижению двигателем установившейся скорости вращения при фиксации соблюдения всех условий успешности пуска вводится ЗПВ, алгоритм контроля предельной частоты для успешного пуска АД блокируется.

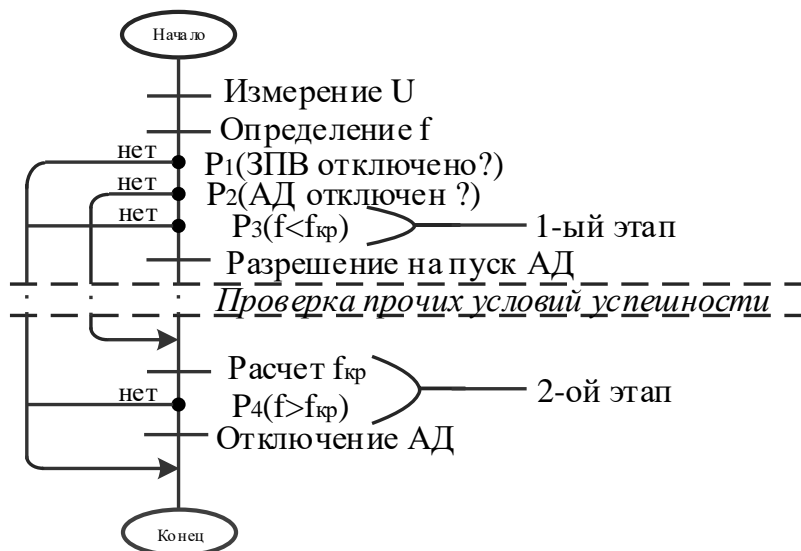


Рисунок 3.4 – Алгоритм контроля предельной частоты для успешного пуска

АД

При несоблюдении условия в заданные моменты проверки, формируется команда на прерывание процесса пуска АД с ожиданием благоприятных условий для повторного включения.

Важным является то, что пуск АД сопровождается значительным снижением частоты и питающего напряжения, влияние которых на электромагнитный момент различно. В процессе моделирования, необходимо обосновать возможность раздельного учета критических параметров режима по предельным напряжению и частоте для условий успешности (4) и (5) с рассмотрением возможностей их объединения.

3.1.5 Алгоритм контроля и определения предельной продолжительности пуска асинхронного двигателя

Длительность пуска АД, на ряду с прочими параметрами, также имеет ограничение по максимально допустимому значению, определяющему успешность процесса. Предельная продолжительность пуска двигателя в ЛСЭ ограничивается следующими условиями:

1. Допустимостью длительности снижения напряжения в процессе пуска в смежных нагрузочных узлах.
2. Допустимостью термического воздействия пускового тока на подконтрольный двигатель.

Следует отметить, что пуск АД, вызывающий скачкообразное изменение напряжения в узлах прилегающей сети, приводит к изменению режима прочих двигателей со снижением их установившейся скорости и коэффициента запаса по напряжению. В предельном случае, дефицит реактивной мощности, неразрывно связанный со снижением напряжения, является причиной потери устойчивой работы прочих двигателей, момент сопротивления которых превысил ускоряющий электромагнитный момент. Пуск АД будет успешен в том случае, если в его процессе прочая двигательная

нагрузка не замедлится до критического скольжения, которое определяется по выражению:

$$S_{кр} = \frac{R_2'}{\sqrt{X^2 + R_1^2}}$$

Представленный случай возможен только при пуске на ХХ (для ряда двигателей при номинальных параметрах сети длительность пуска составляет доли секунды) и крайне маловероятен при наличии тормозящего момента приводного механизма. При этом, при большой концентрации в ЛСЭ вращающейся нагрузки, быстрый выход в нормальный режим пускаемого АД приведет к восстановлению напряжения с последующим самозапуском прочих двигателей. Групповой самозапуск может являться причиной полной потери электроснабжения в ЛСЭ с отключением генераторных агрегатов, что является недопустимым.

С другой стороны, процесс пуска крупного АД может способствовать созданию режима ЛСЭ с низкими коэффициентами запаса по напряжению, в котором коммутация дополнительного электроприемника большой мощности может послужить причиной формирования аварийного режима, сопровождающегося потерей энергоснабжения потребителей. Пускаемый двигатель, утяжеляя режимные условия в ЛСЭ, формирует режимные условия в сети, близкие к предельным для прочего оборудования. Чем продолжительнее пусковой процесс, тем выше вероятность перехода в недопустимую область работы нагрузки ПС. Стохастический характер места и времени коммутации нагрузки в ЛСЭ усложняет учет ее влияния на допустимость процессов пусков АД в конкретных условиях.

Рассмотренные случаи возможны только в условиях отсутствия прогностического контроля успешности пуска АД в ЛСЭ. Как отмечалось ранее, наличие непродолжительного (малого) зондирующего интервала прямого пуска АД при его контроле позволяет произвести предиктивное отключение двигателя до потери устойчивости прочей нагрузки при

несоблюдении условий успешности (рисунок 2.5). Отстройка от возможного включения мощного электроприемника в ЛСЭ при пуске АД обеспечивается за счёт постоянного контроля допустимости режимных параметров в его процессе как для ПС, так и для самого двигателя с возможностью его противоаварийного прерывания при необходимости.

В результате, предельное время пуска ограничивается допустимостью термического воздействия тока на АД в его процессе. При проектировании электропривода при заданном режиме двигателя всегда оценивается его предельный нагрев. Расчет тепловых процессов в электрических машинах является достаточно трудоемким. Тепловая энергия, зависящая от материала и режима двигателя, выделяется обмотками и сердечниками, передается изоляции и рассеивается в окружающую среду. Для полного расчета тепловых процессов в АД следует его представить как систему разнородных тел (меди и стали статора и ротора), связанных тепловыми потоками, разделенных электрической изоляцией и помещенных в охлаждающую среду. Такой расчет описывается системой дифференциальных уравнений и, зачастую, при проектировании электропривода не производится ввиду отсутствия подробной информации о теплоотдаче лобовых частей обмоток, теплообмена между медью/алюминием и сталью через пазовую изоляцию и т.п.

Для упрощения расчетов для оценки предельной температуры АД в большинстве случаев используется упрощенное представление о двигателе, как об однородном тепловом теле (простое апериодическое звено первого порядка), что позволяет исключить внутренние тепловые процессы из рассмотрения, предполагая, что двигатель имеет эквивалентную теплоемкость и коэффициент теплоотдачи. Откуда, используя уравнение теплового равновесия, получено следующее выражение для определения времени нагрева АД до определенной температуры, превышающей температуру окружающей среды [66]:

$$t_{дон} = \frac{C}{A} \ln\left(\frac{q - A\tau_{нач}}{q - A\tau_{пред}}\right),$$

где: C – теплоемкость двигателя (Дж/К), A – коэффициент теплоотдачи (Дж/(с*К)), q – потери теплоты (Дж/с); $\tau_{нач}$ – начальное значение температуры двигателя до пуска (температура окружающей среды), которое в расчетах принимается равным $+40^\circ\text{C}$ (313,15 К); $\tau_{пред}$ – предельное превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды или перегрев (К).

В большинстве источников [67], [68] определяют допустимость режима АД по нагреву (температуре) его отдельных частей, а оценка продолжительности работы в конкретном режиме с нагревом до предельно допустимой температуры не производится.

Предельная допустимая температура для АД определяется как сумма допускаемого превышения температуры ($\tau_{пред}$) и предельной допускаемой температуры охлаждающей среды ($\tau_{нач}$), принятой для электрических машин общего назначения [69]. Предельная допустимая температура двигателя определяется ограничением возможного нагрева его электрической изоляции. В [69] приведены предельно допустимые превышения температуры частей при температуре газообразной охлаждающей среды $+40^\circ\text{C}$ АД общего назначения при различных методах измерения, которые могут быть использованы для определения предельного времени пуска двигателя по условиям термического воздействия пускового тока при контроле его успешности.

В действительности, в условиях отсутствия возможности идентификации тепловых параметров и измерения температуры АД в процессе пуска необходимо, при наличии каталожных параметров, осуществлять расчет предельного времени заблаговременно. При отсутствии каталожных параметров, величина предельного времени пуска конкретного АД может быть определена путем:

- Проведения натурных испытаний с измерением температуры отдельных частей АД по определению предельного нагрева двигателя до значений, указанных в [69].

- Экспертной оценки потребителя, которая получена исходя из личного опыта и требований к производственному процессу.

Для контроля успешности пуска АД в соответствии с обобщенной структурой (рисунок 2.6) допустимость продолжительности пуска в ЛСЭ по условию (6) оценивается на этапе 4. На этапах контроля с 1-го по 4-ый формируется массив ретроспективных данных скорости вращения ротора АД, полученного по величине разницы электромагнитного (определяется по потребляемой активной мощности и частоты ПС) и тормозящего (определяется из предшествующего пуску нормального режима) моментов с учетом величины постоянной инерции (идентифицируется в одном из нормальных переходных процессов) нагруженного двигателя. В момент времени контроля (E) осуществляется проверка соблюдения условия (6) по модели прогностической оценки продолжительности пуска АД.

Контроль успешности пуска АД по предельной продолжительности осуществляется только в процессе пуска в соответствии со следующим алгоритмом (рисунок 3.5):

1. Измеряются значения мгновенных напряжений и тока подконтрольного АД.

2. По мгновенным значениям напряжения определяется частота в ПС.

3. По мгновенным значениям режимных параметров определяется потребляемая активная мощность АД, рассчитывается его электромагнитный момент.

4. Рассчитывается установившаяся угловая скорость ротора по электрическим и механическим параметрам АД.

5. Рассчитывается фактическая угловая скорость ротора АД, формируется база (массив) ретроспективных данных для прогностической оценки продолжительности пуска по предложенной модели разгона двигателя.

6. Производится прогностическая оценка продолжительности пуска АД.

7. Производится сравнение прогнозной продолжительности и предельного времени пуска по условию (6). При соблюдении условия, пуск АД продолжается.

8. По достижению двигателем установившейся скорости вращения при фиксации соблюдения всех условий успешности пуска вводится ЗПВ, алгоритм контроля успешности пуска АД по предельной продолжительности блокируется.

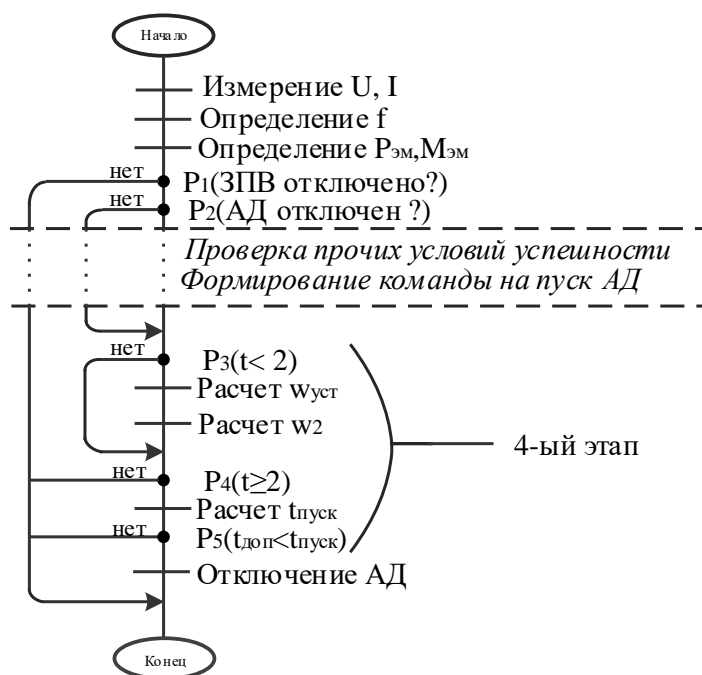


Рисунок 3.5 – Алгоритм контроля успешности пуска АД по предельной продолжительности

При несоблюдении условия в заданный момент проверки, формируется команда на отключение АД с ожиданием благоприятных условий для повторного включения. Причем, т.к. продолжительность оценивается на последних этапах процесса с возможностью значительного повышения

температуры статора и ротора, необходимо учитывать допустимую частоту пусков АД как отражено в [59].

3.2 Алгоритм комплексного поэтапного контроля успешности пуска асинхронного двигателя

Разработанные частные алгоритмы контроля критических параметров при пуске АД в ЛСЭ могут быть сведены в обобщенный алгоритм, осуществляющий оценку допустимости параметров режима по необходимым и достаточным условиям успешности. Используя верифицированную модель контроля успешности пуска АД при прямом измерении только тока и напряжения двигателя, был разработан алгоритм автоматики, обобщенный вид которого приведен в форме ведущей линии на рисунке 3.6.

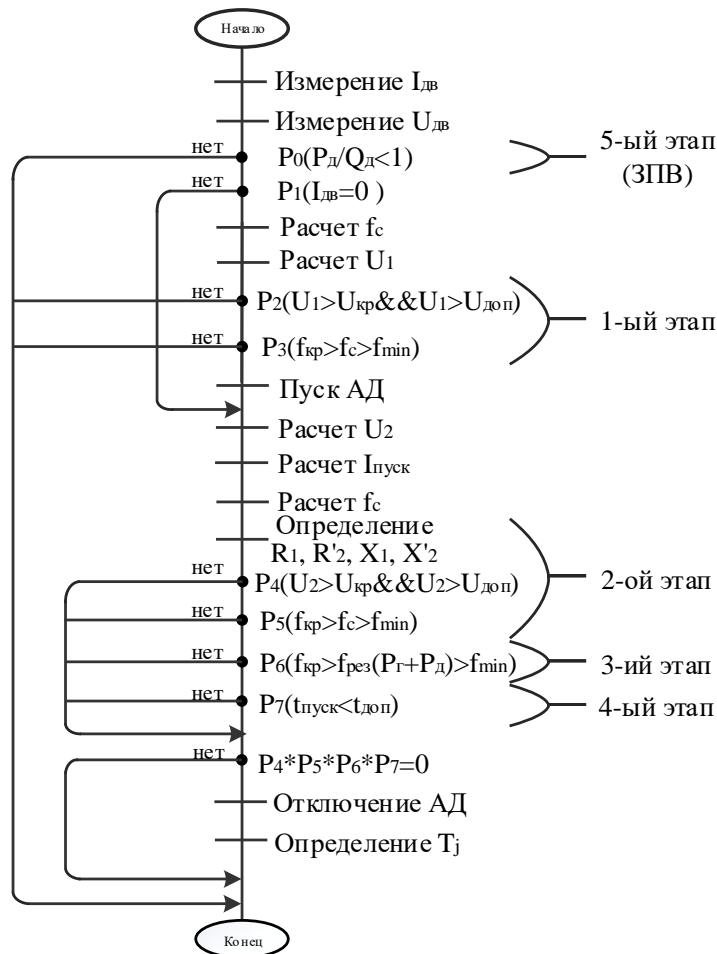


Рисунок 3.6– Алгоритм контроля успешности пуска АД при измерении его локальных электрических режимных параметров

Рассмотрим работу укрупненного алгоритма контроля условий успешности на начальном этапе пуска двигателя, когда возможно зафиксировать величину пускового тока и снижение напряжения без превышения допустимого времени его существования. Контроль возможности пуска по алгоритму рисунка 3.6 осуществляется следующим образом:

1 Измеряются необходимые для расчета режимные параметры на шинах двигателя.

2 Определяется текущее состояние двигателя (в работе/остановлен).

3 Производится оценка возможности пуска АД по условиям (4), (5), (8) в квазиустановившемся режиме ЛСЭ на заданном временном интервале (1-ый этап контроля успешности).

4 При соблюдении условий 1-го этапа контроля, производится пуск АД с зондирующим интервалом. В его процессе:

4.1 Измеряются значения напряжения на шинах и пускового тока двигателя, определяется текущая частота в ПС, формируется массив данных для определения электрических и механических параметров АД.

4.2 По полученным режимным параметрам производится параметрическая идентификация АД.

4.3 Рассчитываются критические параметры для условий успешности 2-го этапа контроля и выполняется проверка соблюдения условия (4), (5), (8).

4.4 При соблюдении условий 2-го этапа, пуск продолжается. Выполняется прогностическая оценка минимального значения частоты в ЛСЭ при пуске АД с проверкой соблюдения условия (4) для 3-го этапа контроля.

4.5 При соблюдении условий 3-го этапа, пуск продолжается. Выполняется прогностическая оценка продолжительности пуска АД с проверкой соблюдения условия (6) для 4-го этапа контроля.

4.6 При соблюдении условий успешности 4-го этапа, пуск продолжается до достижения двигателем установившейся скорости вращения.

5 Наступает 5-ый этап контроля, на котором вводится команда на ЗПВ.

Если хотя бы одно из условий не будет выполнено на зондирующем интервале, то пуск двигателя будет прерван. Пуск АД будет возобновлен через некоторый промежуток времени с актуальными поправочными коэффициентами, если это необходимо.

В процессе вынужденного или планового останова АД выполняется определение его постоянной времени ротора в соответствии с предложенным ранее методом параметрической идентификации.

В таблице 3.1 приведены обозначения переменных алгоритма рисунка 3.6.

Таблица 3.1 – Переменные алгоритма

№	Характер	Технологическое содержание	Обозначение в алгоритме
1	Измеряемые	Ток двигателя	$I_{дв}$
2		Напряжение на шинах двигателя	$U_{дв}$
3	Определяемые	Реактивная мощность двигателя	$Q_{д}$
4		Активная мощность двигателя	$P_{д}$
5		Предельно допустимое значение частоты для успешного пуска	$f_{кр}$
6		Действующее значение напряжения на шинах двигателя до пуска	U_1
7		Действующее значение критического напряжения	$U_{кр}$
8		Действующее значение напряжения на шинах двигателя на момент пуска	U_2
9		Действующее значение пускового тока	$I_{пуск}$
10		Время пуска АД	$t_{пуск}$
11		Частота в ЛСЭ	f_c
		Минимальное значение частоты в ЛСЭ при пуске АД	$f_{рез}$
	Активное сопротивление статора двигателя	R_1	
	Активное сопротивление ротора двигателя	R'_2	
	Индуктивное сопротивление статора двигателя	X_1	
	Индуктивное сопротивление ротора двигателя	X'_2	
12		Механическая постоянная времени ротора нагруженного двигателя	T_j
13	Задаваемые	Допустимая длительность пуска двигателя	$t_{доп}$
14		Предельно допустимое минимальное значение частоты в ЛСЭ	f_{min}
15		Минимально допустимое напряжение для нагрузки в ЛСЭ	$U_{доп}$

Разработанный алгоритм поэтапного контроля успешности пуска АД перед физической реализацией верифицирован на цифровой модели ЛСЭ для проверки его работоспособности в условиях значительных отклонений параметров режима ПС, свойственных системам сопоставимой мощности генерации и включаемой крупной нагрузки.

3.3 Верификация алгоритмов контроля успешности пуска асинхронного двигателя на цифровой модели локальной системы энергоснабжения

Для апробации разработанного алгоритма в программном пакете MATLAB/Simulink была создана цифровая модель ЛСЭ с соизмеримыми по мощности генератором и АД (рисунок 3.7).

Цель исследования на цифровой модели ЛСЭ – подтверждение работоспособности алгоритмов поэтапного контроля пуска АД и адекватности используемых при этом моделей процессов и критических условий в энергосистеме сопоставимой мощности.

Задачи исследования:

1. Верификация комплексной модели контроля успешности пуска АД, состоящей из моделей критических и прогностической оценки режимных параметров, в ЛСЭ
2. Реализация на цифровой модели ЛСЭ поэтапного прогностического контроля успешности пуска АД при локальном измерении режимных параметров в нагрузочном узле.
3. Проведение испытаний реализованного алгоритма с проверкой достоверности прерывания/продолжения процесса пуска АД автоматикой при вариации схемно-режимных условий ЛСЭ.
4. Обоснование преимущества отдельного учета критических параметров режима по предельным напряжению и частоте для условий успешности (4) и (5) с рассмотрением возможностей их объединения.

Критерием оценки полученных результатов является тождественность определения осуществимости пуска АД по предложенной комплексной модели контроля успешности и при цифровом (математическом) моделировании пускового процесса крупного двигателя в заданных схемно-режимных условиях ЛСЭ, режимы которой рассчитываются по полным моделям на базе дифференциальных уравнений.

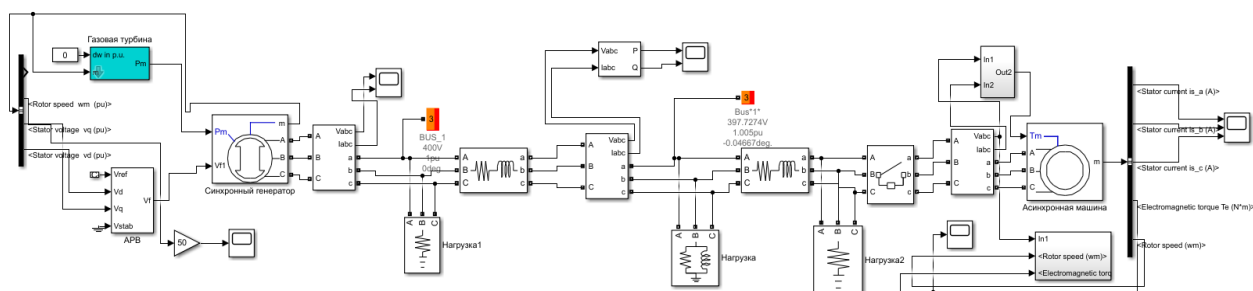


Рисунок 3.7 – Цифровая модель ЛСЭ

Созданная цифровая модель ЛСЭ включает:

- эквивалентный СГ (параметрами приведены в таблице 3.2);
- АРС ГТУ с характеристиками реального регулятора [70];
- стандартный астатический АРВ СГ;
- шунтовую нагрузку мощностью $1,11+j0,01$ МВА;
- АД с механической нагрузкой (параметры приведены в таблице 2.3);
- две линии связи (сопротивление изменяется в соответствии с требуемым схемно-режимным состоянием ЛСЭ);
 - блоки измерения режимных параметров в генераторном и нагрузочном узлах;
 - блок управления (БУ) коммутационным аппаратом АД.

В блоке управления коммутационным аппаратом АД реализован поэтапный алгоритм контроля успешности пуска рисунка 3.7 без идентификации электрических параметров двигателя (принимается, что параметры заранее известны) и 1-го этапа проверки. Намеренное отсутствие 1-го этапа позволяет смоделировать первый пуск в условиях отсутствия

ретроспективных данных о критических параметрах режима АД, а также рассмотреть большее число схемно-режимных условий ЛСЭ для проверки работы алгоритма при отсутствии блокировки команды на включение при снижении напряжения ниже допустимого значения для прочей нагрузки до коммутации двигателя.

Ранее проверка определения критических параметров режима и прогностических моделей была выполнена для систем большой мощности, в которых режимные параметры при пуске двигателя имеют различный характер и степень изменения. Частота ПС была постоянна и не зависела от величины подключаемой нагрузки. Напряжение же в нагрузочном узле могло изменяться в широком диапазоне в зависимости от схемных условий сети. Требуется проверка достоверности использования общей модели контроля успешности пуска АД на цифровой модели ЛСЭ при комплексном изменении режимных параметров в его процессе для подтверждения возможности ее использования в алгоритме автоматики.

Таблица 3.2 – Параметры эквивалентного генератора

Параметр	Значение
Номинальная мощность, S_n (МВА)	2
Линейное напряжение, V_n (В)	400
Частота, f_n (Гц)	50
X_d (о.е.)	2,11
X'_d (о.е.)	0,17
X''_d (о.е.)	0,13
X_q (о.е.)	1,56
X''_q (о.е.)	0,23
X_l (о.е.)	0,05
T'_d (с)	0,33
T''_d (с)	0,03
T''_q (с)	0,03
Коэффициент инерции, H (с)	0,3072
Коэффициент трения, F (о.е.)	0,00987
Число пар полюсов, p	2

Для созданной цифровой модели ЛСЭ были определены критические параметры ПС для успешного пуска АД при механической нагрузке двигателя 200 Н*м (таблица 3.3). Из таблицы видно, что погрешность определения

критических параметров режима в ЛСЭ составляет не более 2%, погрешность моделей прогностической оценки: разгона АД – менее 9% (для электромеханического процесса пуска двигателя разница в десятые доли секунды в условиях кумулятивного характера процесса его нагрева является несущественной); минимального значения частоты в ПС – менее 1%. Погрешности лежат в допустимом диапазоне, позволяя на основе критических параметров и моделей прогностической оценки осуществлять контроль успешности пуска АД в ЛСЭ при значительных отклонениях параметров режима ПС.

Таблица 3.3 – Критические условия пуска АД

Параметр	Расчитанное значение	Фактическое значение	Погрешность, %
Uкр, В	308,4	309,942	0,5
fкр, Гц	51,86	51,1	1,5
fрез, Гц	46,13	46,32	0,41
tпуск, с	3,7	3,4	8,8

Дополнительно на цифровой модели ЛСЭ была верифицирована модель разгона АД. Для ряда установившихся схемно-режимных условий ЛСЭ производилось включение АД, в процессе которого производилась оценка продолжительности пуска по различным моделям разгона с фиксацией его фактического значения. В таблице 3.4 приведены результаты моделирования, из которых следует:

- Линейная модель разгона АД с введенным поправочным коэффициентом по напряжению не учитывает изменение момента нагрузки (работает только для двигателей с номинальной загрузкой) и частоты ПС, что приводит к появлению погрешности при вариации схемно-режимных условий ЛСЭ до 50%.
- Степенная модель разгона АД, наиболее распространенная в технической литературе, в большинстве режимов рассмотренного диапазона не позволила определить время пуска АД из-за недопустимого снижения

напряжения и повышения механической нагрузки. В допустимых для модели режимах погрешность определения времени пуска достигает 26%.

- Погрешность модели прогностической оценки продолжительности пуска по времени изменения механических параметров до установившегося значения не превышает 10 %.

Таблица 3.4– Тестирование модели разгона АД

Параметры ЛСЭ	Фактическое время пуска, с	Время пуска по линейной модели с поправочным коэффициентом, с	Время пуска по степенной модели, с	Время пуска при прогнозировании продолжительности и изменения механических параметров
$S_H=1+j0.485$ МВА, $R_1=R_2=0.025$ Ом $M_{сопрт}=101$ Н*м	3.87 с	4.03	-	4,1
$S_H=1+j0.485$ МВА, $R_1=177$ мкОм $R_2=390$ мкОм $M_{сопрт}=101$ Н*м	3.245	3.16	-	3,4
$S_H=1+j0.01$ МВА, $R_1=177$ мкОм $R_2=390$ мкОм $M_{сопрт}=101$ Н*м	2.96	3.05	-	3,1
$S_H=1+j0.01$ МВА, $R_1=177$ мкОм $R_2=390$ мкОм $M_{сопрт}=150$ Н*м	14.07	3.6	-	15,2
$S_H=1+j0.01$ МВА, $R_1=177$ мкОм $R_2=390$ мкОм $M_{сопрт}=101$ Н*м $U_{Г}=0.9$, $f=50.5$	2.42	2.03	1.78	2,6
$S_H=1+j0.01$ МВА, $R_1=177$ мкОм $R_2=390$ мкОм $M_{сопрт}=101$ Н*м $U_{Г}=0.8$, $f=51.1$	3.5	4.5	-	3,7
$S_H=1+j0.01$ МВА, $R_1=177$ мкОм $R_2=390$ мкОм $M_{сопрт}=101$ Н*м $U_{Г}=0.75$, $f=51.15$	8.36	6.07	-	8,1
$S_H=1+j0.01$ МВА, $R_1=177$ мкОм $R_2=390$ мкОм $M_{сопрт}=101$ Н*м $U_{Г}=0.725$, $f=51.32$	18	9.57	-	19,8

Применение модели прогностической оценки продолжительности пуска по времени изменения механических параметров до установившегося значения позволяет с допустимой погрешностью определять длительность пускового процесса АД для контроля его успешности в ЛСЭ по предложенному алгоритму при значительных отклонениях параметров режима с возможностью их локального измерения на шинах нагрузки.

В соответствие с предложенными верифицированными моделями двигателя и ПС для определения критических и прогностической оценки режимных параметров на цифровой модели ЛСЭ в БУ был реализован алгоритм контроля успешности пусков. Визуально оценить работу алгоритма на цифровой модели ЛСЭ можно по ряду проверочных сценариев, в которых, анализируя изменение режимных параметров при пуске АД, алгоритмом определена необходимость прерывания/продолжения процесса в соответствие с заданным схемно-режимным состоянием сети и ограничениями на режим оборудования.

Проверочный сценарий 1 состоял в следующем: ЛСЭ работает в сбалансированном режиме (мощность генерации составляет 50% от номинальной мощности); после фиксации установившегося нормального режима производится включение АД с зондирующим интервалом. Результатом является либо отключение двигателя по команде блока управления ввиду нарушения условий успешности пуска, либо его разгон до нормальной скорости вращения.

На рисунке 3.8 приведены осциллограммы изменения режимных параметров в ЛСЭ при успешном пуске АД с номинальной механической нагрузкой (101,43 Н*м). Из рисунка видно, что созданные схемно-режимные условия в ЛСЭ не являются тяжелыми для пуска двигателя, длительность которого составила около 1,25 с.

Проверочный сценарий 2 состоял в том, что осуществлялось включение АД с неуспешным пуском при механической нагрузке равной 200 Н*м и увеличенным сопротивлением связи между двигателем и синхронным

генератором для повышения величины падения напряжения при протекании пускового тока. Результаты моделирования приведены на рисунках 3.9, 3.10. На рисунке 3.9 приведены режимные последствия неуспешного пуска АД. Неуспешный пуск АД повлек за собой недопустимое снижение частоты в ЛСЭ.

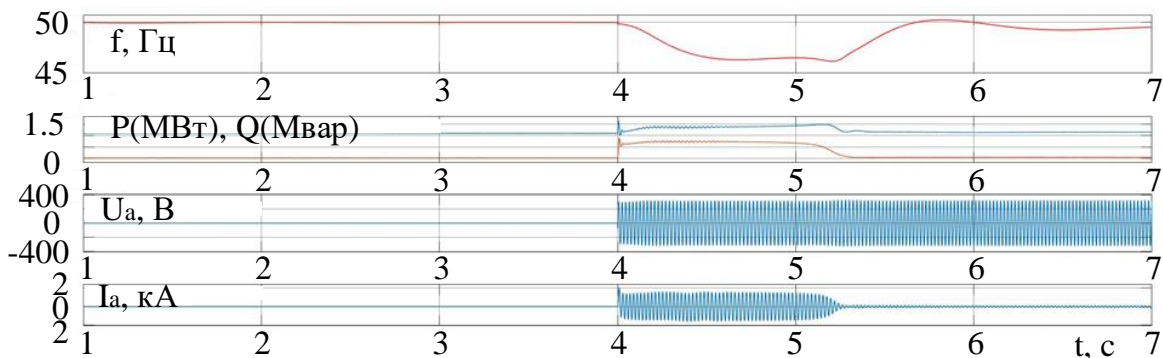


Рисунок 3.8 – Режимные параметры в ЛСЭ при успешном пуске АД

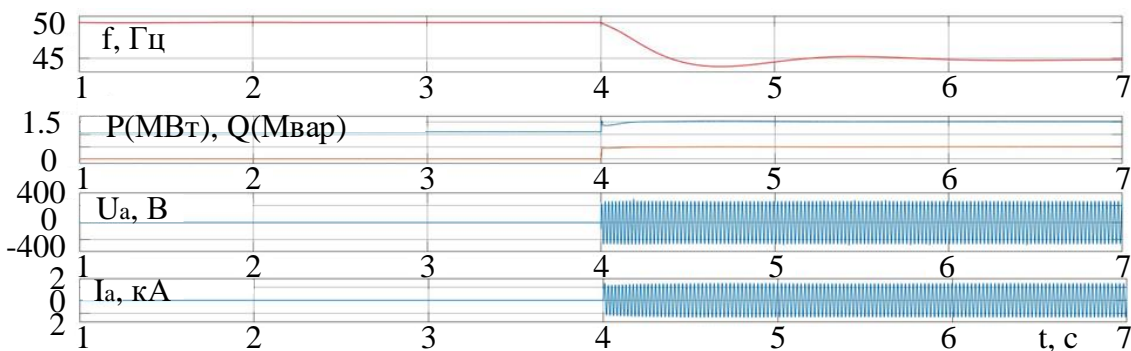


Рисунок 3.9 – Режимные параметры в ЛСЭ при неуспешном пуске АД

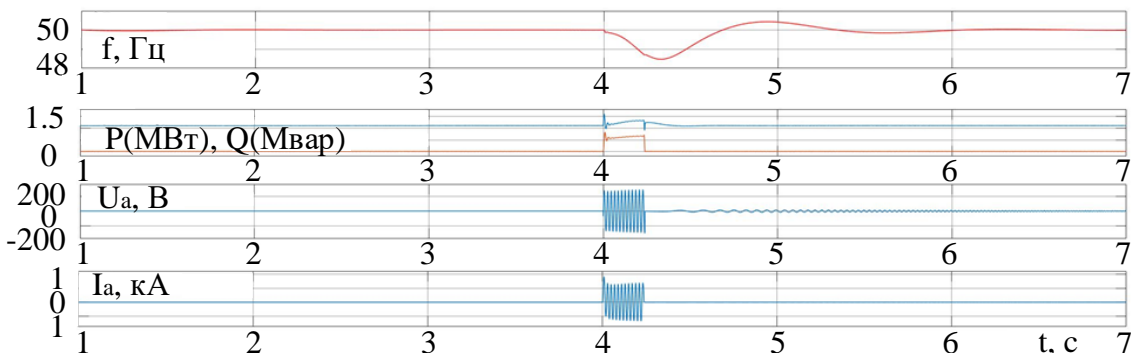


Рисунок 3.10 – Режимные параметры в ЛСЭ при неуспешном пуске АД с последующим его отключением по команде блока управления

На рисунке 3.10 приведены осциллограммы изменения режимных параметров в ЛСЭ при неуспешном пуске АД с последующим его отключением по команде БУ. Длительность зондирующего интервала, после которого сформировалась команда на отключение подконтрольного АД, составила 0,237 с, режимные параметры отклонились в допустимом диапазоне. Пуск двигателя был прерван по необходимому условию (5).

В соответствие с требованиями к предложенной модели контроля успешности пуска АД, полученная продолжительность зондирующего интервала является допустимой. Предполагая, что влияние АРС и АРВ слабо проявляются на начальном этапе процесса пуска, имеется возможность снижения времени оценки успешности пуска АД до значения 0.1 с.

Для верификации разработанного алгоритма прогностической оценки успешности пуска двигателя для ряда схемно-режимных состояний ЛСЭ был произведен расчет серии пусков АД с их варьированием в широком диапазоне. Изменялись: напряжение и частота питающей сети; сопротивление связи; механическая нагрузка на валу АД.

В таблице 3.5 приведены результаты тестирования алгоритма контроля успешности пусков АД. Из таблицы 3.5 видно, что при некоторых схемно-режимных условиях сети алгоритм оценил возможность пуска АД как неуспешный при фактической его успешности, что связано с методической погрешностью определения критических параметров режима в его процессе. Причем, при проведении испытаний не было зафиксировано отсутствия прерывания процесса алгоритмом контроля пусков в условиях его фактической неуспешности.

В результате, в 85% случаев разработанный алгоритм корректно срабатывал при выявлении успешности/неуспешности пуска двигателя, что свидетельствует о возможности его практического применения.

Таблица 3.5 – Результаты тестирования алгоритма контроля успешности пусков АД

Изменяемый параметр	Значение параметра	Цифровая модель	Модель контроля пуска АД	Условие прерывания
Mсопрт, H*м	0.1	Да	Да	-
	50	Да	Да	-
	101.4	Да	Да	-
	200	Да	Да	-
	213	Да	Да	-
	215	Да	Да	-
	216	Да	Да	-
	220	Да	Нет	(5)
	223	Да	Нет	(5)
	224	нет	Нет	(5)
225	нет	Нет	(5)	
Uг, о.е.	0.9	Да	Да	-
	0.8	Да	Да	-
	0.75	Да	Да	-
	0.735	Да	Да	-
	0.73	Да	Да	-
	0.725	Да	Нет	(4)
	0.72	Нет	Нет	(4)
	0.715	Нет	Нет	(5)
	0.71	Нет	Нет	(5)
	0.709	Нет	Нет	(5)
	0.708	Нет	Нет	(5)
	0.706	Нет	Нет	(5)
	0.704	Нет	Нет	(5)
	0.701	Нет	Нет	(5)
	0.7	Нет	Нет	(5)
0.5	Нет	Нет	(5)	
Rсв2, Ом	0.1	Да	Да	-
	0.15	Да	Да	-
	0.175	Да	Нет	(5)
	0.18	Да	Нет	(5)
	0.181	Нет	Нет	(5)
	0.185	Нет	Нет	(5)
	0.2	Нет	Нет	(5)

Как отмечалось ранее, снижение напряжения и частоты в процессе пуска оказывают различное влияние на его успешность. Снижение напряжения приводит к снижению ускоряющего электромагнитного момента. Снижение частоты в условиях ее нормального отклонения в ЛСЭ, напротив, увеличивает ускоряющий момент двигателя. Взаимное различное воздействие нескольких параметров режима на переходной процесс, в частности, пуск АД, зачастую, требует рассмотрения их комплексного влияния, т.е. формирования

объединенного условия, учитывающего одновременное противоположенное их действие. Причем, важным является зависимость объединённых или частных критических значений этих параметров, по которым осуществляется контроль успешности, от фактических величин параметров режима, а также от интервалов их определения в процессе пуска.

Для цифровой модели (рисунок 3.7) при вариации схемно-режимных состояния ЛСЭ определено влияние совместного учета и условий расчета критических параметров режима на управляющую команду алгоритма контроля успешности пуска АД (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Совместный учет критических параметров режима ЛСЭ для необходимых условий успешности пуска АД

Параметр	Значение параметра	Варианты совместного учета и/или условий расчета критических параметров режима						Факт
		1	2	3	4	5	6	
		U _{кр} (f), f _{кр} (U)	U _{кр} -const, f _{кр} -const	U _{кр} (f)* f _{кр} (U)	U _{кр} -const* f _{кр} -const	U _{кр} -const* f _{кр} (U)	U _{кр} -const, f _{кр} (U)	
Mсопрт, Н*м	0.1	да	да	да	да	да	да	да
	50	да	да	да	да	да	да	да
	101.4	да	да	да	да	да	да	да
	200	нет	да	нет	нет	нет	да	да
	213	нет	нет	нет	нет	нет	да	да
	215	нет	нет	нет	нет	нет	да	да
	216	нет	нет	нет	нет	нет	да	да
	220	нет	нет	нет	нет	нет	нет	да
	223	нет	нет	нет	нет	нет	нет	да
	224	нет	нет	нет	нет	нет	нет	да
	225	нет	нет	нет	нет	нет	нет	да
240	нет	нет	нет	нет	нет	нет	да	
245	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	
U _г , о.е.	0.9	да	да	да	да	да	да	да
	0.8	да	да	да	да	да	да	да
	0.77	нет	нет	да	да	да	да	да
	0.725	нет	нет	да	да	да	нет	да
	0.72	нет	нет	да	да	да	нет	нет
	0.5	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет
Rсв2, Ом	0.1	да	да	нет	нет	нет	да	да
	0.15	да	нет	нет	нет	нет	да	да
	0.175	нет	нет	нет	нет	нет	нет	да
	0.205	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет

В таблице 3.6 рассмотрены следующие варианты совместного учета и/или условий расчета критических параметров режима:

1. Значения критического напряжения и частоты ПС для успешного пуска АД рассчитывались постоянно, обновляя полученные ранее значения, на зондирующем интервале при изменении фактического напряжения и частоты в сети. При испытаниях наблюдались значительные колебания расчетных критических параметров (большое влияние характера регулирования регуляторов СГ), что приводило к неверной оценке успешности пуска даже при сравнительно малом изменении схемно-режимных условий в ЛСЭ.

2. Критическое напряжение и частота рассчитывались на зондирующем интервале относительно начального значения режимных параметров (до пуска АД).

3. Значения критического напряжения и частоты ПС для успешного пуска АД рассчитывались постоянно, обновляя полученные ранее значения, на зондирующем интервале при изменении фактического напряжения и частоты в сети. Далее, относительные значения критических параметров перемножались и производилось сравнение с перемноженными относительными значениями режимных параметров в процессе пуска. Все значения определялись по отношению к номинальному режиму. Объединение условий в значительной мере позволило устранить колебания расчетных значений критических параметров и увеличить стабильность команды на прерывание процесса в условиях неуспешности пуска АД.

4. Критическое напряжение и частота рассчитывались на зондирующем интервале относительно начального значения режимных параметров (до пуска АД). Далее, относительные значения критических параметров перемножались и производилось сравнение с перемноженными относительными значениями режимных параметров в процессе пуска. Значения также определялись по отношению к номинальному режиму.

5. Критическое напряжение рассчитывалось на зондирующем интервале относительно начального значения режимных параметров (до пуска АД), а предельное значение частоты постоянно обновлялось на зондирующем интервале при изменении фактических режимных параметров ПС. Далее, относительные значения критических параметров перемножались и производилось сравнение с перемноженными относительными значениями режимных параметров в процессе пуска. Значения также определялись по отношению к номинальному режиму.

6. Критическое напряжение рассчитывалось на зондирующем интервале относительно начального значения режимных параметров (до пуска АД), а предельное значение частоты постоянно обновлялось на зондирующем интервале при изменении фактических режимных параметров ПС.

Из таблицы 3.6 видно, что совместный учет критических параметров, повышая устойчивость результирующей оценки успешности пуска, увеличивает вероятность ложного прерывания пускового процесса. Дополнительно было рассмотрено иное объединение условий – сравнение частного квадрата критического напряжения от критической частоты и частного квадрата фактического напряжения от фактической частоты (в соответствии с выражением для расчета электромагнитного момента) с аналогичными условиям расчета критических параметров режима вариантов 3–5. Были получены значения управляющих команд аналогичные вариантам 3–5 таблицы 3.6.

В результате, для оценки успешности пуска АД по необходимым условиям следует применять 6 вариант учета критических параметров режима, который и был реализован в верифицированном на цифровой модели ЛСЭ алгоритме контроля (таблица 3.5).

Проведенные исследования на цифровой модели ЛСЭ показали, что разработанный алгоритм контроля успешности пуска АД позволяет на зондирующем интервале определять осуществимость пускового процесса двигателя и выполнять его противоаварийное прерывание при фиксации

условий неуспешности без создания опасных режимов для оборудования ПС. Высокая вероятность оценки успешности пускового процесса при сложившихся схемно-режимных условия ПС доказывает возможность и осуществимость контроля прямого пуска АД на малом временном интервале в энергосистемах сопоставимой мощности, открывая путь для физической реализации подобной автоматики для реального применения.

Выводы по главе 3

1. Поэтапный контроль успешности пуска АД по разработанному алгоритму, учитывающий инерционность изменения режимных параметров и степень влияния продолжительности и величины воздействия их критических значений на ПС, позволяет ранжировать этапы процесса оценки успешности в соответствие с физическими, технологическими и режимными ограничениями ПС по их первоочередной важности.

2. Общая модель контроля успешности пуска АД, включающая модели критических условий и прогностической оценки параметров режима, позволяет с допустимой погрешностью производить оценку осуществимости пускового процесса в ЛСЭ для его контроля.

3. Разработанный алгоритм прогностического поэтапного контроля успешности пуска АД позволяет на малом (зондирующем) временном интервале определять осуществимость пускового процесса двигателя и выполнять его противоаварийное прерывание при фиксации условий неуспешности без создания опасных режимов для оборудования ПС.

4. Высокая достоверность оценки при контроле алгоритмом успешности пуска АД на цифровой модели ЛСЭ позволяет использовать полученные результаты для разработки автоматики, обеспечивающей безопасное включение двигателей крупных нагрузочных узлов для оборудования ПС путем его противоаварийного прерывания при выявлении условий априорной неуспешности процесса.

ГЛАВА 4 ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПА УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ УСПЕШНОСТИ ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

4.1 Прототип устройства контроля успешности пуска асинхронного двигателя на базе Raptor

С целью получения научно-технического задела (НТЗ), достаточного для перехода к стадии опытно-конструкторских работ по созданию опытного образца, необходимо реализовать и испытать прототип автоматики поэтапного контроля успешности пусков АД на физической модели ЛСЭ. Под прототипом в представленной главе понимается устройство, реализующее базовую функциональность будущего серийного изделия, достаточную для оценки его работоспособности и эффективности. Устройство управления прямым пуском АД, реализующее контроль его успешности по верифицированному алгоритму, должно осуществлять противоаварийное отключение двигателя в фактически сформировавшихся и/или потенциально возможных ситуациях создания в пусковом процессе условий неуспешности в ПС при определении осуществимости на малом временном интервале. Для реализации прототипа необходима подходящая техническая основа, позволяющая реализовать предиктивный контроль успешности на малом временном интервале с возможностями его изменения и настройки.

Аппаратно-техническая база для прототипа устройства контроля успешности пусков АД в ЛСЭ должна отвечать следующим требованиям:

1. Высокое быстродействие. Выявление необходимости прерывания пуска и его реализация должны происходить за доли секунды.
2. Наличие совместимых устройств преобразования входных сигналов и выдачи управляющих воздействий. Аппаратная база должна поддерживать блоки расширения, позволяющие осуществлять преобразование измеренных аналоговых сигналов в цифровые (АЦП) и формировать команду на включение коммутационного аппарата.

3. Наличие или возможность реализации алгоритмов определения актуальных параметров режима. Для определения электрических, критических и предиктивной оценки режимных параметров в пусковом процессе необходимы актуальные значения частоты ПС и потребляемой мощности, которые должны рассчитываться в соответствии с текущим напряжением и током двигателя.

4. Возможность записи текущей и хранения ретроспективной информации. Для проведения параметрической идентификации, прогностической оценки продолжительности пуска и оценки состояния ЛСЭ необходимо формировать массивы ретроспективных данных в темпе процесса, которые дополнительно могут быть использованы для коррекции заранее заданных величин критических параметров режима.

5. Возможность создания интерактивного пользовательского интерфейса. Для взаимодействия с устройством, предполагающее настройку (назначение интервала сканирования нормального режима, предельной допустимой минимальной частоты, минимально допустимого напряжения для прочей вращающейся нагрузки в ЛСЭ, максимально допустимого времени пуска АД и т.д.) и фиксацию условия прерывания процесса неуспешного пуска, необходимо визуальное отображение текущего состояния двигателя (выведен из работы/нормальный режим работы/пуск и т.п.), причин отключения или блокировки команды на включение, а также значений критических параметров режима.

В соответствии с предъявленными требованиями, для технической реализации алгоритма автоматки были рассмотрены следующие варианты аппаратного исполнения:

- плата Arduino Uno с микроконтроллером ATmega328;
- промышленный процессорный блок RAPTOR-x86.

Выбор определен тем, что для представленного оборудования имеется широкий ряд измерительных, преобразовательный и сигнальных блоков

расширения, применение которых позволяет решать задачи управления и взаимодействия различных объектов в электрической сети.

Аппаратная платформа Arduino Uno представляет собой программируемую плату, предполагающую гибкую настройку, с микроконтроллером 8-бит ATmega328с, рядом цифровых и аналоговых входов/выходов, которые используются для записи и выдачи внешних сигналов. Измерительные каналы стандартно имеют диапазон измерения от 0 до 5 В, превышение которого недопустимо. Для записи режимных параметров при помощи Arduino Uno требуется понизить уровень напряжения сигнала до допустимого и ввести его в измерительный диапазон (от 0 до 5 В) с разрешением 10 бит (сигнал в диапазоне измерения может принимать до 1024 различных значений). Значения сигнала, не вошедшие в измерительный диапазон, игнорируются.

На базе платы Arduino для оценки возможности ее применения в качестве БУ для контроля успешности пусков АД в ЛСЭ был реализован измерительный блок действующего значения напряжения двух вариантов исполнения преобразовательного устройства: со стандартным модулем ZMPT101В; самодельным модулем. Модуль ZMPT101В представляет собой датчик измерения переменного напряжения, структурно состоящий из трансформатора и нескольких операционных усилителей, совместное действие которых преобразует вводной сигнал в соответствии с требованиями измерительного диапазона микроконтроллера.

Самодельный модуль структурно (рисунке 4.1) состоит из делителя напряжения и операционного усилителя, которые также преобразуют сигнал в соответствии с требованиями измерительного диапазона микроконтроллера. Рассмотрение двух вариантов исполнения преобразовательных устройства на базе трансформатора и делителя напряжения с непроволочными резисторами позволяет оценить возможность появления и степень влияния фазной погрешности (особенно актуально при определении частоты ПС) при измерении мгновенного значения сигнала и искажения формы его кривой на

величину действующего значения напряжения по отношению к эталонному, полученному при помощи вольтамперфазометра РЕТОМЕТР-М2 с классом точности 0,1. Величина действующего напряжения в ArduinoUno определялась как среднеквадратическое значение на интервале равном половине периода с учетом действия цифровой фильтрации сигнала.

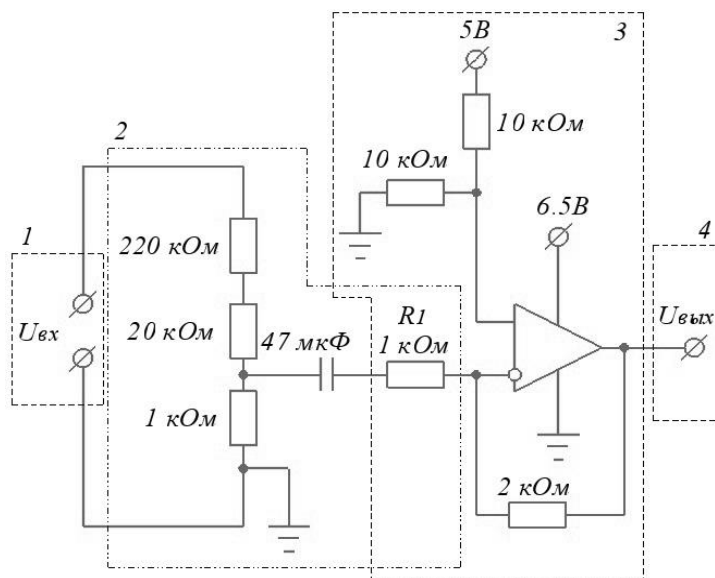


Рисунок 4.1 – Структура блока преобразования аналогового сигнала для Arduino Uno

Натурные испытания измерительного блока с разными модулями преобразования проводились для ряда режимных условий ПС характерных для пусковых процессов АД в ЛСЭ (изменение питающего напряжения двигателя в широком диапазоне при номинальном значении 220 В). Были получены следующие результаты [71], [72]:

- отклонение напряжения от номинального значения приводит к необходимости постоянного изменения положения подстроечного резистора на модуле ZMPT101B;
- искажение кривой напряжения и малое разрешение контроллера приводит к появлению погрешности определения его действующего значения до 4,5% с необходимостью введения поправочного коэффициента.

Исследования показали, что микроконтроллеры Arduino, являясь наиболее мало затратным решением, не позволяют определять режимные

параметры с требуемой точностью ввиду операционных и физических ограничений, затрудняя их применение для задач контроля успешности пуска АД. Необходимо рассмотреть иную аппаратно-техническую базу для реализации автоматики предиктивного контроля успешности пусков.

Потенциально возможным устройством для реализации прототипа автоматики контроля может являться промышленный процессорный блок RAPTOR-x86 с возможностями гибкой настройки и реализации алгоритмов управления, а также применения сертифицированных компонентов, применяемых на реальных объектах в электроэнергетике [73]. Промышленный процессорный блок RAPTOR-x86, конструктивно выполненный в виде панельного контроллера на операционной системе Windows с графическим дисплеем и функциональной клавиатурой, предназначен для использования в системах промышленной автоматики в качестве центрального процессорного устройства, выполняющего функции:

- исполнения технологических алгоритмов;
- взаимодействия с устройствами расширения;
- информационного обмена через сетевые интерфейсы;
- отображения текущего состояния контролируемого объекта и результатов работы алгоритма;
- накопления данных в энергонезависимой памяти.

Доукомплектование процессорного блока модулями расширения формирует специализированную платформу для реализации устройств противоаварийной автоматики. Существуют следующие стандартные блоки расширения:

- Кроссовые блоки, увеличивающие число подключаемых модулей на 6 единиц.
- Модули ввода/вывода дискретных сигналов для различных напряжений вторичных измерительных цепей (220 В/24 В), позволяющие

осуществлять управление внешними устройствами и/или получать команды от них.

- Модули ввода аналоговых сигналов от измерительных цепей напряжения и тока, позволяющие измерять необходимые мгновенные значения режимных параметров ПС для реализованных алгоритмов управления в БУ.

Интеграция блоков расширения в процессорный блок RAPTOR позволяет получить целевое устройство в виде конструктивной единицы (моноблока), содержащую:

- Центральный процессор.
- Человеко-машинный интерфейс.
- Подсистему ввода/вывода.

Благодаря возможности гибкой настройки и наличия обширной периферии, прототип автоматики контроля может быть реализован на процессорном блоке RAPTOR-x86, являющимся специализированной аппаратной платформой для построения устройств противоаварийной автоматики и исполнения технологических алгоритмов, с применением дополнительных устройств расширения, осуществляющих информационный обмен с БУ через интерфейс RS-485 по специализированному протоколу:

1. Трехканальный модуль ввода аналоговых сигналов от цепей тока REXT-I3, предназначенный для измерения его мгновенных значений во вторичных цепях трансформаторов тока (ТТ) на 1 А и 5 А.

2. Трехканальный модуль ввода аналоговых сигналов от цепей напряжения REXT-U8, предназначенный для измерения его мгновенных значений во вторичных цепях трансформаторов напряжения (ТН) на 100 В.

3. Модуль вывода дискретных сигналов REXT-DO220 с коммутационной способностью контактов при напряжении 220 В постоянного тока 0,2 А, предназначенный для управления состоянием выключателя АД.

На данной аппаратно-технической базе, специально предназначенной для устройств управления объектами в электрической сети в квазиустановившихся и переходных процессах, был реализован прототип автоматики многоэтапного контроля успешности пуска АД в ЛСЭ, структура, испытания и исследования которого приведены далее.

4.2 Программная реализация алгоритмов контроля успешности пуска асинхронного двигателя

Работа прототипа устройства поясняется схемой подключения двигателя к ПС с устройством контроля успешности пуска (рисунок 4.2), структурой процесса контроля успешности пуска АД (рисунок 4.3).

Структурная схема (рисунок 4.2) содержит: 1 – ПС; 2 – измерительный блок напряжения (ИБН); 3 – коммутационный аппарат (КА); 4 – БУ пуском АД, в который поступает ВК на включение или отключение двигателя; 5 – измерительный блок тока (ИБТ); 6 – АД.

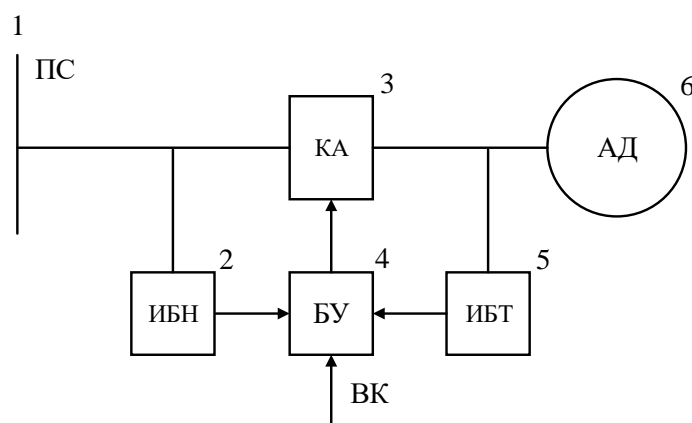


Рисунок 4.2– Схема подключения двигателя с устройством контроля успешности пуска

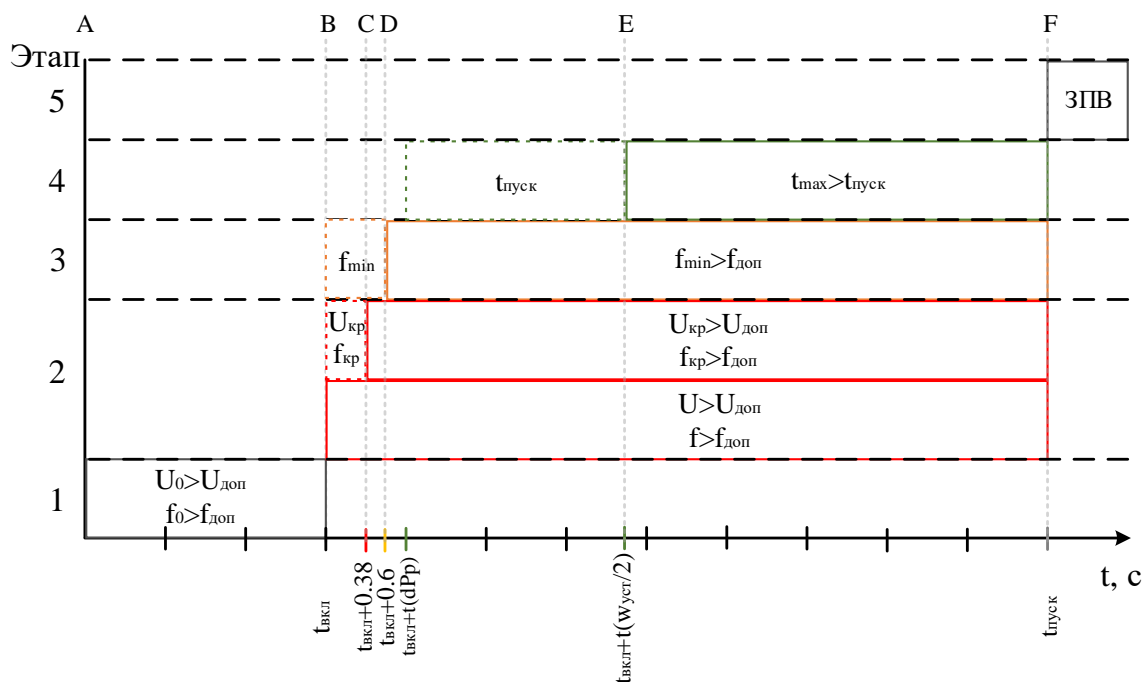


Рисунок 4.3 – Структура процесса контроля успешности пуска двигателя

Процесс контроля успешности пуска АД (рисунок 4.3) как и на рисунке 2.6 разделен на пять этапов, но уже с введенными фактическими фиксированными временами проверки условий:

1. Этап блокировки пуска. Интервал оценки нормальности режима ЛСЭ до пуска АД (после подачи команды на включение) может быть задан по усмотрению пользователя. Исходное значение составляет 5 с.

2. Этап оценки по необходимым условиям. Производится на интервале 0,38 с после включения двигателя с определением критических параметров режима (минимального напряжения и предельной частоты для успешного пуска).

3. Этап оценки по достаточным условиям. Производится на интервале 0,6 с после пуска двигателя с формированием массива ретроспективных данных об изменении частоты в ЛСЭ в его процессе.

4. Этап оценки допустимости длительности пуска. Интервал зависит от наличия/отсутствия фактического устойчивого разгона двигателя. Массив ретроспективных данных расчетной механической угловой скорости двигателя для оценки продолжительности пуска начинает формироваться при

превышении заданного числа ее приращений (исходное значение составляет 50) и ограничивается половиной установившейся скорости вращения, которая определяется из текущих схемно-режимных условий АД.

5. ЗПВ. Вводится после выхода АД в нормальный режим работы с установившейся рабочей скоростью и фиксации соблюдения всех условий успешности пуска в его процессе.

В конце каждого этапа в приведенные моменты времени выполняется проверка соблюдения соответствующих условий успешности. Причем, производится сквозная проверка условий с их контролем на протяжении всего процесса после определения значений критических и прогнозных режимных параметров, препятствующая возможному останovu (обратный переход в режим КЗ) или зависанию двигателя в области повышенных скольжений при пуске ввиду изменения схемно-режимных условий ЛСЭ.

Работа устройства согласно рисунку 37 осуществляется следующим образом: в момент времени (А) АД находится в режиме ожидания ВК на включение. После ее получения, на этапе 1 до момента (В) БУ производится оценка возможности пуска АД по данным ИБН. Напряжение в узле нагрузки и частота ПС для выполнения первого прямого пуска АД должны удовлетворять следующим условиям:

$$U_0 > U_{дон}, f_0 > f_{дон},$$

где U_0 – напряжение на шинах АД до пуска, f_0 – значение частоты до пуска двигателя, $f_{дон}$ – минимально допустимая частота ПС.

Для последующих пусков совместно учитываются следующие условия:

$$U_0 > U_{кр}, f_{кр} > f_0 > f_{min}$$

При соблюдении условий успешности до пуска, БУ разрешает исполнение команды на включение КА, запускается процесс прямого пуска двигателя. После включения с момента времени (В) БУ начинает формировать массив ретроспективных данных о значении частоты в ЛСЭ для прогноза ее минимального значения на 3 этапе и рассчитывать угловую скорость вращения

ротора АД. Угловая скорость вращения ротора АД определяется из уравнения движения ротора следующим образом:

$$\omega_2 = \sum_{i=0}^n \frac{(M_{эмi} - M_{сопрti}) \omega_{ном}}{M_{ном} \cdot T_j} \Delta t_i$$

Расчет скорости вращения ротора АД заканчивается по достижению ее установившегося значения. При наличии ретроспективных данных момент сопротивления приводного механизма принимается равным электромагнитному моменту в нормальном квазиустановившемся режиме, предшествующем текущему пуску двигателя, в противном случае – номинальному.

На этапе 2 БУ известным методом определяет параметры математической модели АД и критические значения параметров (напряжения и частоты) режима ПС для успешного пуска двигателя, проверяет выход параметров за критические и нормативно допустимые значения, при выходе за нормативно допустимые значения отключает двигатель.

Определение электрических параметров математической модели АД производится по методу наименьших квадратов по выражениям:

$$R_1 = R_2' = \frac{\sum(P \cdot I^2)}{6 \sum I^4}, \quad X_1 = X_2' = \frac{\sum(Q \cdot I^2)}{6 \sum I^4}$$

Определение критического напряжения БУ выполняется по выражению:

$$U_{кр} = \sqrt{\frac{M_{сопрт} (X^2 + R^2) \omega_c}{R_2'}}$$

Критическая частота для пуска АД БУ определяется по выражению:

$$X^2 \frac{\omega^3}{\omega_{ном}^2} + R^2 \omega - \frac{U^2 R_2'}{M_{сопрт}} = 0,$$

где ω – критическая угловая скорость магнитного поля статора для успешного пуска АД.

В момент (С) БУ проверяет соблюдение следующих условий:

$$U > U_{\text{дон}}, f > f_{\text{дон}}, U > U_{\text{кр}}, f < f_{\text{кр}},$$

где f – значение частоты при пуске двигателя, U – напряжение на шинах АД при пуске.

На этапе 3 БУ по ретроспективным данным производит прогностический расчет квазиустановившегося значения частоты с учетом работы регуляторов скорости генерирующих агрегатов, путем экстраполяции зависимостей частоты от времени, характер изменения которой описывается аппроксимирующей функцией:

$$f = f_{\text{рез}} + (f_0 - f_{\text{рез}})e^{\alpha t}$$

Минимальное значение частоты сети при пуске АД определяется по выражению:

$$f_{\text{рез}} = \frac{\frac{1}{4}\alpha^4 f_0(\sum t^4) + \alpha^3 f_0(\sum t^3) + \alpha^2(\frac{3}{2}f_0(\sum t^2) - \frac{1}{2}(\sum f \cdot t^2)) + \alpha(f_0(\sum t) - (\sum f \cdot t))}{\frac{1}{4}\alpha^4(\sum t^4) + \alpha^3(\sum t^3) + \alpha^2(\sum t^2)},$$

где

$$\alpha = -\frac{\frac{1}{2}(\sum t^3)(f_0(\sum t) - (\sum f \cdot t)) + \frac{1}{2}(\sum t^2)((\sum f \cdot t^2) - f_0(\sum t^2))}{\frac{1}{4}((\sum t^4)(f_0(\sum t) - (\sum f \cdot t)) + (\sum t^3)((\sum f \cdot t^2) - f_0(\sum t^2)))}$$

Значение напряжения с учетом действия регуляторов возбуждения принимается равным фактическому на момент окончания зондирующего интервала.

В момент (D) БУ выполняет проверку соблюдения условий аналогичных моменту времени (С), но уже с учетом влияния регуляторов генерирующих агрегатов, а также следующего условия:

$$f_{\text{рез}} > f_{\text{min}}$$

На этапе 4 БУ определяет прогностическую длительность пуска и знак скорости изменения потребляемой активной мощности, при выявлении положительного значения которой по экстраполяции зависимости угловой

скорости вращения ротора от времени определяет продолжительность разгона до нормальной установившейся скорости, определяемой в соответствии со значением момента сопротивления и электрическими параметрами двигателя. При выявлении устойчивого знака скорости изменения активной мощности производит расчёт продолжительности пуска:

$$t_{\text{пуск}} = \frac{\ln\left(\frac{\omega_{\text{уст}}}{\omega_0}\right) \sum t^2}{\sum \ln(\omega_2) t - \ln(\omega_0) \sum t}$$

Для получения достоверного значения продолжительности пуска АД интервал ретроспективы должен соответствовать времени от выявления устойчивого знака скорости изменения активной мощности до достижения ротором двигателя половины расчетной установившейся угловой скорости. При снижении количества ретроспективных данных возрастает погрешность определения продолжительности пуска двигателя.

В момент (Е) в БУ выполняется проверка допустимости длительности пуска АД:

$$t_{\text{доп}} > t_{\text{пуск}}$$

На этапе 5 до момента времени F БУ находится в режиме ожидания команды ЗПВ двигателя для предотвращения бесконечности циклов пуска АД или исключения включения после принудительного основа.

При несоблюдении условий успешности пуска АД в представленные моменты, БУ выдает команду на отключение двигателя с последующим запретом повторного включения двигателя без улучшения условий его пуска.

Предложенный алгоритм контроля успешности пуска АД был реализован на RAPTOR-x86, оснащённом процессорной платформой Intelx86 и операционной системой (ОС) Windows 10, в среде разработки Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench (LabVIEW) с применением специализированного драйвера, позволяющего обмениваться сигналами с модулями расширения через LabVIEW в обход процессов и процедур ОС для повышения быстродействия БУ.

Программное обеспечение (ПО) в среде разработки LabVIEW состоит из двух частей: пользовательской и управляющей. На рисунке 4.4 приведен пользовательский интерфейс ПО, на котором располагаются: 1 – переключатель, изменение положения которого приводит к инициализации алгоритма автоматики; 2 – световые индикаторы для визуального контроля критерия (критериев), по которому (которым) произведено прерывание пуска АД; 3 – поля для вывода фактических параметров режима; 4 – поля для ввода минимально допустимых значений напряжения и частоты в ЛСЭ, а также интервала поиска оптимального момента включения АД; 5 – поля для вывода критических параметров режима; 6 – поля для ввода электрических и механических параметров АД; 7 – окна с осциллограммами действующего напряжения и частоты; 8 – поле для ввода частоты дискретизации БУ.

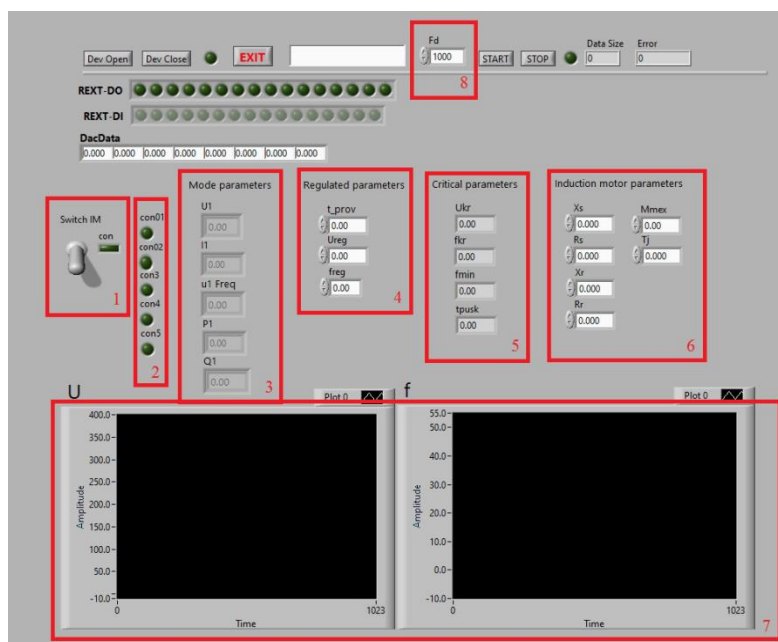


Рисунок 4.4 – Пользовательский интерфейс ПО

На данной стадии разработки устройства контроля успешности пусков введено допущение, что электрические параметры АД заведомо известны и заданы, параметрическая идентификация двигателя не требуется, а также подконтрольный двигатель и ПС симметричны (контроль процесса выполняется по режимным параметрам фазы А).

Управляющая программа реализована на языке C++ с применением функциональных блоков LabVIEW в соответствии с алгоритмом многоэтапного контроля успешности пусков АД в ЛСЭ рисунка 4.5 с введением дополнительных алгоритмов определения действующих значений тока, напряжения, фазы между ними, активной и реактивной мощности, а также частоты ПС.

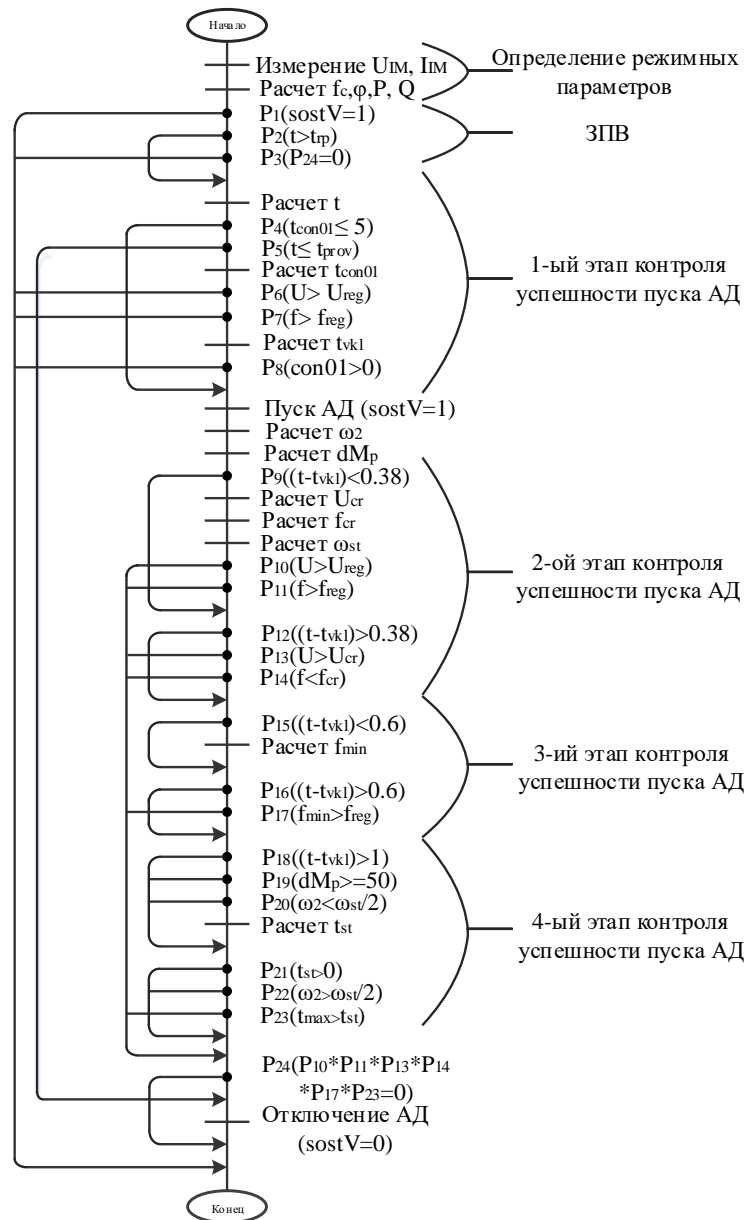


Рисунок 4.5 – Алгоритм многоэтапного контроля успешности пуска АД в ЛСЭ

В таблице 4.1 приведены переменные алгоритма контроля успешности пуска АД (рисунок 4.5).

Таблица 4.1 – Переменные алгоритма контроля успешности пуска АД

№	Характер		Технологическое содержание	Обозначение в алгоритме	Тип
1	Входные	Измеряемые	Линейное мгновенное напряжение на шинах двигателя	UIM	A
2			Фазный мгновенный ток двигателя	IM	A
3	Внутренние	Определяемые	Угол между фазным током и фазным напряжением	φ	D
4			Частота ПС	fc	D
5			Активная мощность двигателя	P	D
6			Реактивная мощность двигателя	Q	D
7			Счетчик относительного времени работы алгоритма	t	D
8			Счетчик времени оценки нормальности режима до пуска двигателя	tcon01	D
9			Относительное время включения двигателя	tvkl	D
10			Угловая скорость вращения ротора	w2	D
11			Счетчик положительной разницы ускоряющего и тормозящего моментов	dMp	D
12			Действующее критическое напряжение	Ucr	D
13			Предельно допустимое максимальное значение частоты для успешного пуска	fcr	D
14			Нормальное установившееся значение угловой скорости ротора	wst	D
15			Минимальная частота в ЛСЭ при пуске АД	fmin	D
16			Продолжительность пуска АД	tst	D
17			Состояние проверки по нормальности исходного режима ЛСЭ (необходимые условия) для пуска АД	con01	D
18			Задаваемые	Состояние переключателя	sostV
19	Относительное время до запрета повторного включения двигателя	trp		D	
20	Интервал проверки нормальности режимных параметров до пуска АД	tprov		D	
21	Предельно допустимое минимальное действующее значение напряжения для ЛСЭ	Ureg		D	
22	Предельно допустимое минимальное значение частоты в ЛСЭ	freg		D	
23	Допустимая длительность пуска двигателя	tmax		D	

Разработанное ПО на базе алгоритма многоэтапного контроля успешности пусков обобщенно состоит из 10 блоков (рисунок 4.6):

- Блок расчета действующего значения напряжения, его частоты и фазы относительно опорного сигнала RAPTOR на основе мгновенных значений напряжения фазы А (блок 1.1).
- Блок расчета действующего значения тока, его частоты и фазы относительно опорного сигнала RAPTOR на основе мгновенных значений тока фазы А (блок 1.2).
- Блок расчета активной и реактивной мощности (2-ой блок).
- Блок реализации алгоритма 1-го этапа контроля успешности пуска АД, в котором оценивается нормальность режимных параметров на интервале 5 с до пуска с возможностью включения двигателя при их соответствии (3-ий блок).
- Блок реализации 1-ой части алгоритма 2-го этапа контроля успешности пуска АД (4-ый блок), в котором оценивается нормальность режимных параметров в процессе пуска и определяются значения критических параметров режима (критического напряжения и частоты).
- Блок реализации 2-ой части алгоритма 2-го этапа контроля успешности пуска АД, в котором оценивается допустимость напряжения и частоты для успешного пуска АД (5-ый блок).
- Блок реализации алгоритма 3-го этапа контроля успешности пуска АД, в котором оценивается допустимость снижения частоты в ЛСЭ (6-ой блок).
- Блок реализации алгоритма определения угловой скорости вращения ротора АД (7-ой блок).
- Блок реализации алгоритма 4-го этапа контроля успешности пуска АД, в котором производится прогностическое определение продолжительности пуска двигателя под механической нагрузкой (8-ой блок).

- Блок реализации алгоритма 5-го этапа контроля успешности пуска АД, в котором осуществляется ЗПВ (9-ый блок).

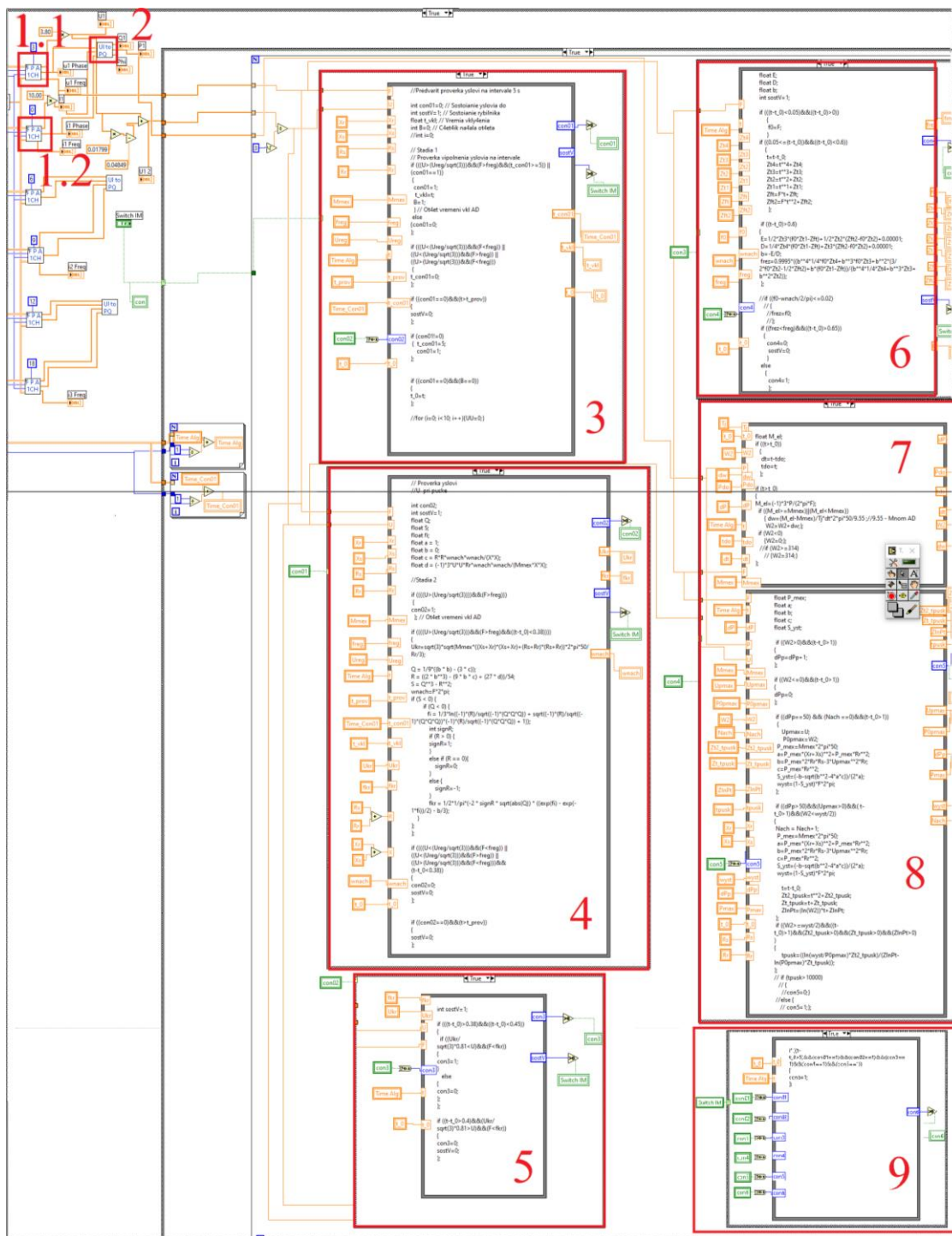


Рисунок 4.6—Внешний вид ПО

Актуальное состояние двигателя определяется по положению переключателя на пользовательском интерфейсе. При отключенном переключателе ($sostV = 0$) автоматика не активна, а алгоритмы не

инициализированы. Изменение положения переключателя ($sostV=1$) приводит к инициализации алгоритма поиска допустимого режима ПС для включения АД на заданном интервале при фиксации установившегося режима длительностью до 5 с. Далее, все процедуры алгоритмов ориентируются на внутренний таймер, который запускается при пуске двигателя и обнуляется при его отключении. Дополнительно для определения времени пуска АД в алгоритме установлен счетчик, фиксирующий количество приращений скорости вращения ротора, при превышении заданного значения которого инициализируется алгоритм прогностического определения продолжительности пуска АД.

Начальное значение переменных, отражающих состояния условий успешности в процессе пуска двигателя, заданы равными 1 (исходно–выполнены). В соответствии с заданными временными задержками и счетчиками внутри алгоритмов, формируются команды на отключение/продолжение (смена/сохранение исходных состояний условий) пуска АД на выделенных этапах. При выявлении условий неуспешности, соответствующий блок выдает команду на логический выход промышленного контроллера БУ, отключая двигатель от ПС.

В результате, разработанный прототип устройства контроля успешности пусков АД, внедренный в учебный процесс (Приложение «Б»), выполняет следующие функции:

1. Измерение мгновенных значений напряжений в фазах узла подключения двигателя и токов статорной обмотки двигателя.
2. Многоэтапный процесс контроля успешности пуска двигателя на основе критических условий промежуточной успешности для каждого из этапов.
3. Блокирование включения двигателя в сеть при априорной неуспешности пуска и повторного включения после прерывания пуска без улучшения его условий.

4. Накопление данных об условиях и результатах пуска двигателя с последующей корректировкой расчетных условий при прогностическом моделировании процесса.

4.3 Электродинамическая модель энергосистемы малой мощности с асинхронным двигателем

Экспериментальная проверка работоспособности прототипа автоматики проведена на базе электродинамической модели (ЭДМ) центра коллективного пользования «Центр испытаний устройств контроля и управления режимами электроэнергетических систем» НГТУ. Структурно ЭДМ состоит из силового (генераторы, трансформаторы и т.п.), измерительного (трансформаторы тока, трансформаторы напряжения и т.п.) и управляющего оборудования (режимная, противоаварийная автоматика и т.п.), имитирующего работу основных элементов оригинала. Исключением являются первичные двигатели (вместо газопоршневых двигателей/турбин использованы двигатели постоянного тока) и воздушные линии электропередачи (имеют не распределенные, а сосредоточенные параметры). Остальные элементы и внешней электрической сети на ЭДМ представлены масштабными физическими моделями. Параметры и конструкция силовых элементов модели подобраны таким образом, чтобы по возможности максимально удовлетворить критериям подобия при моделировании, прежде всего, переходных электромеханических процессов.

Для испытания прототипа автоматики на базе ЭДМ была создана физическая модель ЛСЭ с АД сопоставимой мощности, приведенная на рисунке 4.7. Физическая модель ЛСЭ с АД включает:

- Генераторные агрегаты, управление работой которых осуществлялся при помощи автоматики беспилотного управления режимами ЛСЭ [74], работающей в условиях автономного режима с возможностями

регулирования напряжения и частоты для поддержания баланса активной и реактивной мощности.

- Нерегулируемые силовые трансформаторы, связывающие оборудование с разным номинальным напряжением.
- Промежуточную нагрузку с возможностью изменения потребляемой мощности.
- АД, оснащенный БУ автоматики контроля успешности его пуска, с возможностью изменения механической нагрузки.
- Коммутационные аппараты, необходимые для изменения топологии ПС и исполнения команды БУ на включение/отключение двигателя.
- Линии связи, необходимые для изменения электрической удаленности узла нагрузки от генераторных шин
- Измерительное и преобразовательное оборудование, снижающее величину аналоговых сигналов до допустимого для блоков расширения БУ уровня.

Основные элементы физической модели и их параметры приведены в таблице 4.2.

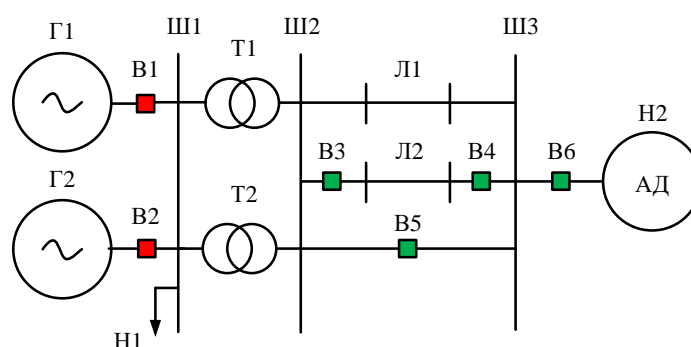


Рисунок 4.7 – Схема ЛЭС с АД для испытания прототипа автоматики

Сопряжение прототипа автоматики с объектом управления выполнено в соответствии с рисунком 4.8, где: сигнал с ТТ, расположенного на фазе А, поступает на REXT-I3; сигнал с ТН, подключенный к линейному напряжению АВ, поступает на REXT-U8; КБУ – контакты REXT-DO220; К2 – катушка

промежуточного реле, контакты которой подают/снимают напряжение на/с катушки магнитного пускателя К1, контакты которого подключают/отключают АД к/от ПС. Сами блоки расширения REXT-U8, REXT-I3, REXT-DO220 монтируются на тыльной стороне корпуса RAPTOR-x86.

Таблица 4.2 – Основные элементы модели ЛСЭ с АД

№	Элемент схемы	Тип	Количество	Примечание
1	Модельный синхронный генератор (СГ)	МКЗ-1500	2	U _{ном} = 220 В P _{ном} = 3 кВт
2	Группа модельных однофазных силовых трансформаторов	МТО-1.7	2	K _T = 220/380 S _{ном} = 1,7 кВт
3	Осветительная нагрузка	-	1	U _{ном} = 220 В P _{ном} = 0,9 кВт
4	АД	АИР90L2	1	U _{ном} = 380 В P _{ном} = 3 кВт M _{ном} = 10 Н*м
5	Модель линии электропередачи (ЛЭП)	-	2	X _л = 16 Ом C _{фф} = 1 мкФ C _{фз} = 2,27 мкФ U _{ном} = 380
6	Модель силового выключателя	-	6	-
7	Шина	-	3	-
8	ТТ	И508М	1	K _T = 100/5
9	ТН	УТН-1	1	K _T = 380/100
10	Автоматика беспилотного управления режимами ЛСЭ	ПТК Торнадо	1	Применялся для синхронизации и регулирования работы СГ
11	БУ	RAPTOR-x86	1	Прототип автоматики контроля успешности пусков АД

Созданная физическая модель, соответствующая обобщенному представлению ЛСЭ со стороны нагрузочных шин рисунка 2.4 главы 2, позволяет производить испытания автоматики контроля успешности пусков АД в условиях сопоставимости мощности суммарной генерации и единичной

нагрузки с возможностями изменения схемно-режимных условий для двигателя и ПС в широком диапазоне.

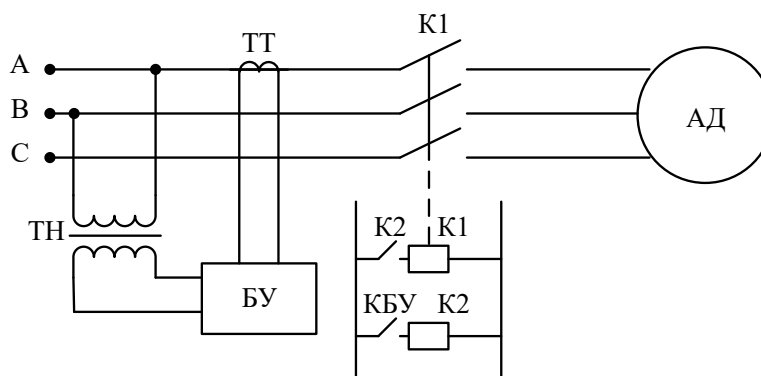


Рисунок 4.8 – Схема сопряжения прототипа автоматики с объектом управления

4.4 Программа и результаты испытаний прототипа автоматики контроля успешности пуска асинхронного двигателя на электродинамической модели

Программа испытаний предусматривала проверку работы прототипа автоматики в условиях изменения напряжения, частоты и сопротивления связи между источником и нагрузкой в ЛСЭ, а также механической загрузки двигателя. Пуск АД в схеме рисунка 4.7 производился только после создания нормального установившегося режима ЛСЭ (Г1 и Г2 работают на выделенную нагрузку Н1) и подключения необходимых для пункта программы элементов, образующих требуемые схемно-режимные условия.

Содержание программы испытаний:

1. Проверка блокировки пуска АД на 1-м этапе при выходе параметров за допустимые значения для нормального режима.
2. Проверка отключения АД на 2-м этапе по условию снижения напряжения в ЛСЭ ниже допустимого уровня.
3. Проверка отключения АД при превышении допустимой механической нагрузки на валу в заданных схемно-режимных условиях.

4. Проверка отключения АД по условию снижения напряжения питания ниже допустимого уровня в процессе пуска при вариации уставки автоматического регулятора возбуждения (АРВ) СГ в исходном режиме (номинальное фазное напряжение 127 В).

5. Проверка отключения АД на 2-м этапе по условию превышения допустимой частоты ПС в процессе пуска при вариации уставки автоматического регулятора скорости (АРС) СГ в исходном режиме.

6. Проверка отключения АД на 3-м этапе по условию снижения частоты в ПС в процессе пуска ниже допустимого значения (минимально допустимое значение частоты в ЛСЭ задавалось 45 Гц) при вариации уставки АРС СГ в исходном режиме.

7. Проверка отключения АД на 2-м этапе по условию снижения напряжения питания ниже допустимого уровня в процессе пуска при вариации сопротивления связи между СГ и АД.

Для проведения испытаний пунктов 1–6 в схеме рисунка 4.7 вводился в работу выключатель В5 для усиления электрической связи между генераторным и нагрузочным узлами. В пункте 7 для изменения схемных условий в ЛСЭ при отключенном выключателе В5 вводились в работу В3 и В4.

Для проверки блокировки автоматикой по условию нормальности напряжения и частоты в ЛСЭ до пуска АД по *программе пункта 1* в БУ на пользовательском интерфейсе (рисунок 4.4) было задано значение минимально допустимого напряжения для ЛСЭ равное 400 В с интервалом поиска момента включения равным 10 с и подана команда на пуск АД (ввод в работу В6). В результате, команда на пуск была заблокирована, т.к. на заданном 10-ти секундном интервале напряжение на шинах АД до пуска было ниже допустимого и составляло 394 В.

Для проведения испытаний *по программе пункта 2* были созданы условия прерывания пуска АД на 2-ом этапе путем снижения значения минимально допустимого напряжения для ЛСЭ до 300 В в БУ. В результате,

автоматика прервала пуск АД по условию снижения напряжения в процессе пуска ниже допустимого за промежуток времени равный 0.2 с.

Дополнительная серия испытаний при вариации схемно-режимных условий в ЛСЭ при пуске АД показала, что прямое включение двигателя при различных значениях параметров режима в схеме рисунка 4.7 всегда приводит к недопустимому снижению напряжения в ПС. Для последующих пунктов программы испытаний условие (8) 2-го этапа контроля было загрублено путем снижения уровня минимально допустимого напряжения для исключения ложных прерывай пусков АД прототипом автоматики.

Для проведения испытаний *по программе пункта 3* подбором схемно-режимного состояния ЛСЭ были созданы условия прерывания пуска АД на 2-ом этапе по факту превышения допустимой механической загрузки на валу. Поиск предельно допустимой нагрузки производился путем проведения ряда пусков АД при вариации момента сопротивления приводного механизма в диапазоне от 0,08 до 0,24Мном. В результате, при механическом сопротивлении равно 0,21Мном автоматика прервала процесс пуска АД по условию (5). Достоверность отключения двигателя была подтверждена неуспешным ручным включением АД в аналогичных схемно-режимных условиях при визуальном контроле.

Для проведения испытаний *по программе пункта 4* подбором схемно-режимного состояния ЛСЭ были созданы условия прерывания пуска АД на 2-ом этапе по факту недопустимого снижения напряжения в сети до критического значения (вычисляется по параметрам двигателя и момента на валу) при низменном моменте сопротивления приводного механизма, который был принят равным 0,18 Мном. Определение критического значения напряжения производилось путем проведения ряда пусков АД при вариации уставки АРВ на Г1 и Г2 в диапазоне от 1,1 Уном до 0,85 Уном.

Прототип автоматики прерывал пуск АД за 1.25 с по условию (5) при напряжении на генераторных шинах равном 0,95 Уном. Фактическое недопустимое снижение напряжения в сети до критического значения было

получено вручную и соответствовало напряжению на генераторных шинах равному $0,85 U_{ном}$. В результате, прототип автоматики в пункте 4 отключил АД с некоторым запасом по уровню напряжения.

Для проведения испытаний *по программе пункта 5* подбором схемно-режимного состояния ЛСЭ были созданы условия для прерывания пуска АД на 2-ом этапе по факту недопустимого (критического) значения частоты в ПС для успешного пуска двигателя при низменном моменте сопротивления приводного механизма равном $0,18 M_{ном}$. Условия для прерывания пуска АД создавались путем вариации уставки АРС Г1 и Г2 в нормальном режиме ЛСЭ (до пуска двигателя) в диапазоне от 50 до 54 Гц. Исследования показали, что диапазон изменения частоты при заданной механической нагрузке двигателя был недостаточен. Увеличение механической нагрузки на валу двигателя привело к необходимости усиления связи, что не представляется возможным. В результате, определяющим условием для прерывания процесса пуска АД на 2-ом этапе контроля для схемы рисунка 4 являлось условие по напряжению (5), ввиду слабой электрической связи между АД и СГ.

Для проведения испытаний *по программе пункта 6* подбором схемно-режимного состояния ЛСЭ были созданы условия для прерывания пуска АД на 3-ем этапе по факту недопустимого снижения частоты в сети до критического значения при неизменном моменте сопротивления приводного механизма равном $0,18 M_{ном}$. Условия для прерывания пуска АД создавались путем вариации уставки АРС Г1 и Г2 в нормальном режиме ЛСЭ (до пуска двигателя) в диапазоне от 50 до 46 Гц с проверкой достоверности определения минимального значения частоты ПС. В результате, пуск АД был прерван автоматикой при частоте предшествующего режима равной 49 Гц по условию (9) (снижение частоты ниже предельно допустимого значения) из-за наличия обмена мощностью между генераторными агрегатами, который привел к появлению низкочастотным колебаниям в ЛСЭ. При отсутствии колебаний в ЛСЭ пуск АД был прерван при частоте исходного установившегося режима

равной 48 Гц ввиду его неуспешности по условию (4) этапа 3– снижение частоты ниже предельно допустимого значения (45 Гц).

В пункте 7 программы испытаний производился пуск АД при моменте сопротивления приводного механизма равном 0,18 Мном и напряжении на генераторной шине равном 127 В с записью режимных параметров при различных сопротивлениях связи между двигателем и генерирующими агрегатами (с одной и с двумя линиями электропередачи). При пуске АД через одну линию связи автоматика сформировала команду на его прерывание по условию (5) – снижение напряжения на шинах двигателя ниже критического значения (время отключения составило 0.479 с). Процесс пуска АД при введении в работу второй линии связи (Л2) также был прерван автоматикой по условию (5) – снижение напряжения на шинах двигателя ниже критического значения (время отключения составило 0.508 с). Достоверность отключения двигателя была подтверждена неуспешным ручным включением АД в аналогичных схемно-режимных условиях при визуальном контроле на интервале 6 с.

Описание программы и результаты испытаний прототипа автоматики контроля успешности пусков АД на физической модели ЛСЭ приведены в таблице 4.3. В представленных пунктах программы испытаний прототипа были определены критические параметры режима и значения времени пуска и минимальной частоты в ЛСЭ. Погрешность определения минимальной частоты в ЛСЭ не превысила 4%, продолжительности пуска двигателя – 14%.

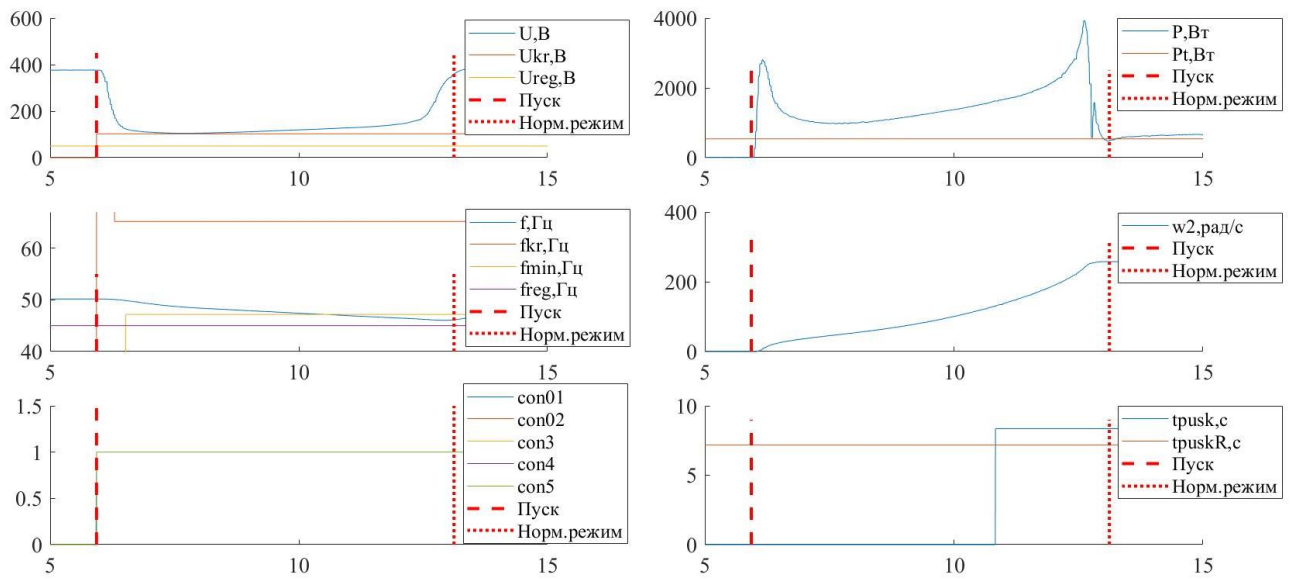
В качестве примеров на рисунках 4.9 а, б приведены осциллограммы процессов при пуске АД в ЛСЭ с критическими параметрами режима для пункта 6 программы испытаний. На рисунка 4.9 а представлен процесс успешного пуска АД при частоте предшествующего режима, равной 50 Гц с моментом сопротивления 0,18 Мном (все условия успешности соблюдены).

На рисунке 4.9 б представлен процесс прерванного через 0,7 с по условию (6) 3-го этапа контроля пуска АД при частоте предшествующего режима, равной 48 Гц с моментом сопротивления 0,18 Мном. В интервал

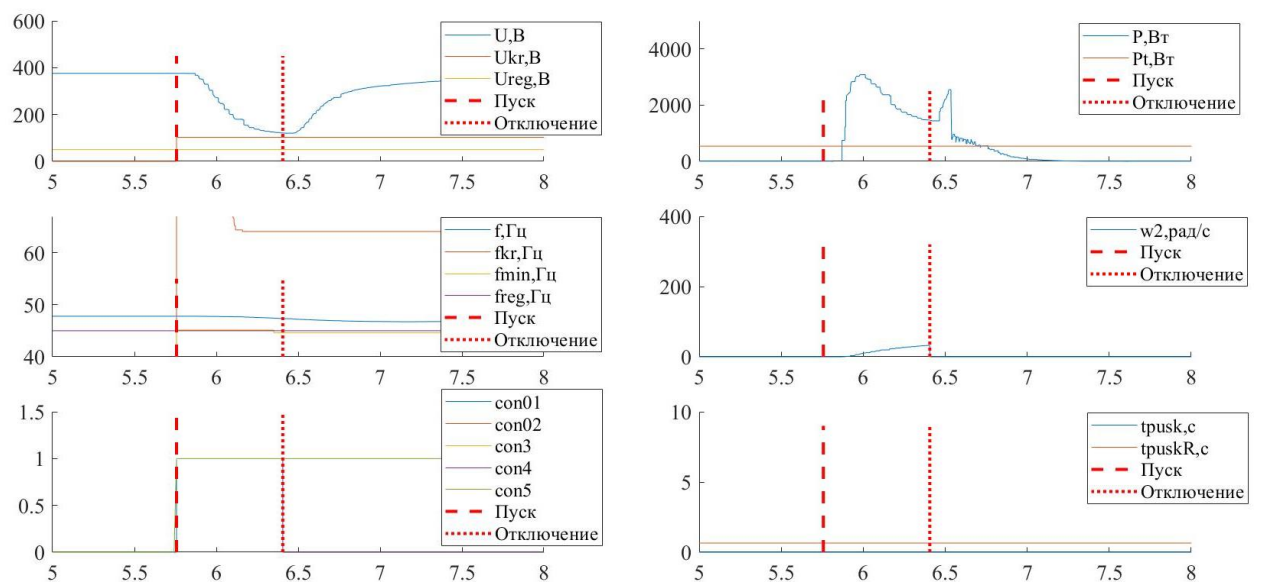
отключения входили: предиктивная оценка БУ величины минимальной частоты продолжительностью 0,6 с; время срабатывания модельного выключателя 0,1 с.

Таблица 4.3 –Программа и результаты испытаний

№	Смысл	Примечание	Результат
1	Выход параметров за допустимые значения для нормального режима на заданном интервале до включения АД	Интервал – 10 с	На заданном 10-секундном интервале напряжение на шинах АД до пуска было ниже допустимого, команда на пуск была заблокирована
2	Выход параметров за допустимые значения для ЛСЭ после включения АД	Минимально допустимое напряжения для ЛСЭ – 300 В	Пуск прерван по условию (8) за 0,2 с
3	Изменение режимных условий ЛСЭ	Вариация момента сопротивления в диапазоне от 0,08 до 0,24 Мном	Пуск прерван по условию (5) при моменте сопротивления 0,21 Мном за 0,6 с
4		Вариация уставки АРВ СГ в диапазоне от 1,1 до 0,85 Уном при моменте сопротивления 0,18Мном	Пуск прерван за 1,25 с по условию (5) при напряжении на СГ 0,95 Уном. Фактическое недопустимое снижение напряжения в сети соответствовало напряжению на СГ 0,85 Уном
5		Вариация уставки АРС СГ в диапазоне от 50 до 54 Гц при моменте сопротивления 0,18 Мном	Определяющим условием для прерывания пуска на 2-м этапе из-за слабой электрической связи является (5)
6		Вариация уставки АРС СГ в диапазоне от 50 до 46 Гц при моменте сопротивления 0,18 Мном	Пуск прерван из-за наличия низкочастотных колебаний при частоте 49 Гц по условию (9) за 6 с. При отсутствии колебаний пуск прерван при частоте 48 Гц по условию (4) за 0,6 с.
7		Изменение числа ЛЭП между АД и СГ при моменте сопротивления 0,18 Мном	Пуск прерван по условию (5) за 0,479 с и 0,508 с для одной и двух ЛЭП соответственно



a



b

Рисунок 4.9 –Осциллограмма процесса при пуске асинхронного двигателя в локальных системах энергоснабжения с критическими параметрами режима при частоте предшествующего режима 50 Гц (a) и 48 Гц (b):

U – напряжение; P – активная мощность; Pt – механическая мощность; f – частота; Ukr – критическое напряжение; fmin – расчетное предельное снижение частоты; tpusk – расчетное время пуска; Ureg– минимально допустимое напряжение; freg – минимально допустимая частота; tpuskR – фактическая продолжительность пуска; w2 – расчетная угловая скорость; con01 – условие 1-го этапа; con02 – условие 2-го этапа (нормальность напряжения и частоты); con3 – условие 2-го этапа (допустимость снижения напряжения и частоты); con4 – условие 3-го этапа; con5 – условие 4-го этапа

В таблице 4.4 приведены результаты испытаний прототипа автоматики при вариации схемно-режимных условий. В 91% случаев прототип корректно прогностически определял успешность/неуспешность пуска АД в ЛСЭ (случаев отсутствия выдачи команды на прерывание процесса пуска в условиях его неуспешности не зафиксировано).

Результаты проведенных испытаний прототипа автоматики контроля успешности пусков АД на базе RAPTOR-x86 на физической модели ЛСЭ подтвердили его работоспособность. Применение автоматики в ЛСЭ позволит предотвращать повреждение двигателей или оборудования ПС, сохранить их ресурс работоспособности в процессах неуспешных прямых пусков путем их выявления на ранних этапах и прерывания.

Таблица 4.4 – Результаты испытания автоматики по 23 пускам асинхронного двигателя при вариации условий

Величина	Значение	Оценка успешности пуска прототипом автоматики	Фактическая успешность пуска	Условие прерывания
Mсопрг, о.е.	0,08	+	+	-
	0,12	+	+	-
	0,14	+	+	-
	0,18	+	+	-
	0,21	-	-	(5)
	0,24	-	-	(5)
Uг, о.е.	1,10	+	+	-
	1,05	+	+	-
	1,00	+	+	-
	0,98	+	+	-
	0,95	-	+	(5)
	0,90	-	+	(5)
	0,85	-	-	(5)
fс, Гц	50,00	+	+	-
	49,50	+	+	-
	49,00	-	-	(9)
	49,00	+	+	-
	48,00	-	-	(4)
	50,00	+	+	-
	51,00	+	+	-
	53,00	+	+	-
	54,00	+	+	-
Количество линий связи, шт.	1	-	-	(5)
	2	-	-	(5)

Выводы по главе 4

1. Предиктивный контроль успешности пуска АД в ЛСЭ возможен.
2. Поэтапный контроль пуска позволяет прерывать процесс на ранних стадиях выявления его неуспешности.
3. Высокая вероятность достоверности оценки успешности пуска АД подтверждает возможность ее реализации на базе предложенной модели по определению критических параметров режима, погрешность которой в испытаниях не превышала 4 %, а погрешность определения продолжительности пуска не превышала 14%.
4. Испытания показали, что функциональный прототип автоматики обеспечил выявление успешности/неуспешности пуска АД на ранних стадиях процесса в 91% случаев при широкой вариации условий его осуществления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие энергетического сектора по пути децентрализации и диджитализации привело к проектированию и созданию на базе МГ ЛСЭ с возможностями работы, как параллельно с внешней электрической сетью централизованного энергоснабжения, объединенных энергосистем малой мощности, так и автономно (при наличии фактических или плановых ограничений). При этом децентрализация генерирующих мощностей привела к сближению суммарной мощности локальной генерации и крупных АД в составе ЛСЭ, а постоянно изменяющиеся схемно-режимные условия в ЛСЭ, особенно в автономном режиме, усилили влияние пускового процесса АД на возможности отключения генераторных агрегатов, потерю устойчивой работы нагрузочных узлов с возникновением и развитием аварийных режимов, вызывающих полную или частичную потерю энергоснабжения потребителей.

Применение специализированных устройств, реализующих специальные способы пуска АД, требует сопоставимых со стоимостью двигателя дополнительных затрат, а в некоторых случаях, изменения производственных циклов механизмов, что не представляется возможным. При этом, контроль успешности самими устройствами либо не выполняется (осуществляется только визуальный контроль оператором), либо выполняется опосредованно при помощи введения внутренних программных ограничений (уставок), производя отключение двигателя только по факту состоявшегося недопустимого отклонения режимных параметров без прогностического определения его последствий.

Значительных запас обеспечения надежности ЛСЭ с крупными АД содержится в возможностях автоматического контроля успешности их пуска с прогностическим прерыванием на ранних стадиях выявления неуспешности. Применение такой автоматики позволит минимизировать негативные последствия прямых пусков АД в системах их соизмеримой мощности с генераций.

В диссертационной работе предложен и разработан способ многоэтапного прогностического контроля успешности пуска АД для реализации подобной автоматики, разработан ее прототип на базе промышленного процессорного блока RAPTOR-x86 и экспериментально доказана ее эффективность на физической модели ЛСЭ с АД.

Для этого в работе были решены следующие задачи:

- Выявлены основные значащие факторы, определяющие успешность и допустимость пуска АД в системах соизмеримой мощности, формализованы условия успешности его пуска.
- Разработана и верифицирована модель по определению критических параметров режима для успешного пуска АД.
- Разработаны и верифицированы методы идентификации электрических и механических параметров АД в условиях возможности измерения режимных параметров только на его статорных обмотках.
- Разработана инвариантная обобщенная структура контроля успешности пуска АД.
- Разработан и реализован на промышленной платформе поэтапный алгоритм контроля успешности пуска АД в ЛСЭ.
- Доказана необходимость и возможность контроля успешности прямого пуска АД в условиях постоянно изменяющегося схемно-режимного состояния ЛСЭ.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты разработки прототипа автоматики контроля успешности пуска АД в системах соизмеримой мощности позволяют перейти к созданию опытных образцов с их применением на реальных объектах энергетики.

СПИСОК ТЕРМИНОВ

Прогностический контроль успешности пуска – оценка качества пуска АД на начальной стадии процесса с его превентивным отключением в условиях неуспешности до возникновения нарушений в ЛСЭ.

Необходимые условия для успешного пуска – условия, соблюдение которых гарантирует разгон двигателя до рабочей скорости с точки зрения объектных факторов (определяемых параметрами пускаемого двигателя).

Достаточные условия для успешного пуска – условия, соблюдение которых гарантирует допустимое отклонение параметров режима в процессе пуска (системный фактор) и безопасную с точки зрения термической стойкости его продолжительность (объектный фактор).

Критические параметры режима ЛСЭ при пуске АД – предельная величина параметров режима достаточная для перехода АД из статического состояния в установившееся с рабочей скоростью вращения за допустимое время при допустимом их отклонении.

Зондирующий интервал прямого пуска – время, достаточное для оценки успешности пуска АД с учетом влияния на прочую нагрузку и генераторные агрегаты в ПС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маркова, В. М. Децентрализация энергетики: интеграция и инновации / В. М. Маркова, В. Н. Чурашев // ЭКО. – 2020. – № 4(550). – С. 8-27. – DOI 10.30680/ЕСО0131-7652-2020-4-8-27.
2. Дегтярев, К. Проблемы и перспективы развития возобновляемой энергетики России в новых условиях / К. Дегтярев, Д. Соловьев // Энергетическая политика. – 2022. – № 6(172). – С. 55-69. – DOI 10.46920/2409-5516_2022_6172_56. – EDN EULADY.
3. Безруких, П. П. К истории развития возобновляемой энергетики России и её современное состояние / П. П. Безруких // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2022. – № 4. – С. 11-18. – DOI 10.24160/1993-6982-2022-4-11-18. – EDN ZWALCO.
4. Тягунов, М. Цифровая трансформация и энергетика / М. Тягунов // Энергетическая политика. – 2021. – № 9(163). – С. 74-85. – DOI 10.46920/2409-5516_2021_9163_74. – EDN HVIOVP.
5. Дербенева Анна Александровна. "ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПАНИЙ: МЕХАНИЗМЫ И ИНСТРУМЕНТЫ" Кронос, vol. 7, no. 7 (69), 2022, pp. 52-55.
6. Илюшин П. В. Перспективы применения и проблемные вопросы интеграции распределенных источников энергии в электрические сети / П. В. Илюшин // Библиотечка электротехника. – 2020. – № 8(260). – С. 1-116.
7. Цацулин, А. Н. Плюс газификация/догазификация всех российских пользователей и иные проблемы отрасли / А. Н. Цацулин, А. И. Быков // Экономический вектор. – 2023. – № 4(35). – С. 129-151. – DOI 10.36807/2411-7269-2023-4-35-129-151. – EDN INJRVD.
8. Тренд времени - распределенная генерация: как он реализуется в России и как влияет на отрасль / С. В. Смирнова, П. В. Болотов, Д. Е. Петрушин [и др.] // Вопросы электротехнологии. – 2020. – № 2(27). – С. 20-28. – EDN KGGEOB.

9. Гуревич Ю.Е. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: монография/ Ю.Е. Гуревич, П.В. Илюшин.– Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018.– 280 с.
10. Илюшин, П. В. Перспективные направления развития распределительных сетей при интеграции локальных интеллектуальных энергосистем / П. В. Илюшин // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2021. – № 4(67). – С. 70-80.
11. Фишов А. Г. Цифровой симулятор режимов минигрида, интегрированного с внешней электрической сетью. Часть 1. Физико-технологические основы объекта симуляции = The digital simulator of minigrid modes integrated with external power grid / А. Г. Фишов, А. В. Петрищев, В. А. Ожужас. – Текст : непосредственный // Энергетик. – 2023. – № 6. – С. 6–13.
12. Активные распределительные электрические сети с децентрализованным мультиагентным управлением режимом. Ч. 1 = Active power distribution networks with decentralized multi-agent control mode. P. 1 / А. Г. Фишов, А. А. Осинцев, Ю. В. Какоша, М. З. Одинабеков. – DOI 10.24160/0013-5380-2022-10-14-24. – Текст : непосредственный // Электричество. – 2022. – № 10. – С. 14–24.
13. Воропай Н.И. Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы / Н.И. Воропай // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2011. - № 3 (20). – С.11-16.
14. Динамика и тенденции электропотребления Московского региона / Б. И. Макоклюев, В. С. Павликов, Г. И. Фефелова, А. И. Владимиров // Энергетик. – 2007. – № 6. – С. 10-15. – EDN KWCBHR.
15. Макоклюев, Б. И. Структура и тенденции электропотребления энергосистем России / Б. И. Макоклюев // Энергия единой сети. – 2012. – № 4(4). – С. 56-61. – EDN VXCKVH.
16. Моисейкина, Л. Г. Анализ структурных изменений внутреннего потребления ТЭР г. Москвы / Л. Г. Моисейкина, Е. С. Дарда // Статистика и

Экономика. – 2017. – № 6. – С. 22-31. – DOI 10.21686/2500-3925-2017-6-22-31.
– EDN YMWJIX.

17. Армашова-Тельник, Г. С. Обзор сетевых организационных структур Северо-Западного региона с позиции потребления электроэнергии / Г. С. Армашова-Тельник, А. Н. Зубкова // Актуальные проблемы экономики и управления. – 2021. – № 2(30). – С. 62-71. – EDN AOWTFJ.

18. Мугалимов Р.Г., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р. Энергоэффективные асинхронные двигатели технико-экономические преимущества и оптимизация себестоимости их создания / Мугалимов Р.Г., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р. // Энерго и ресурсосбережение. – 2016. – № 2.

19. Илюшин П. В., Куликов А. Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией. Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. 364 с.

20. Газизова О.В., Аллаяров А.А., Кондрашова Ю.Н., Патшин Н.Т. “Определение границ динамической устойчивости генераторов промышленной электростанции с учетом двигательной нагрузки”, Электротехнические системы и комплексы, из-во: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (Магнитогорск), ISSN: 2311-8318, н-р. 2 (39), стр. 34-41, 2018 г.

21. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен В.Х. “Моделирование режимов работы систем электроснабжения с установками распределенной генерации и мощной асинхронной нагрузкой”, Научный вестник Новосибирского государственного технического университета, из-во: Новосибирский государственный технический университет, ISSN: 1814-1196, н-р 4 (73), стр. 101-114, Новосибирск, 2018 г.

22. Hasan S., Gurung N, Muttaqi K.M., Kamalasan, S. “Electromagnetic field-based control of distributed generator units to mitigate motor starting voltage dips in power grids” Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., vol. 29, is. 2, no. 862612, March 2019, DOI: 10.1109/TASC.2019.2895468.

23. Исмаилов, И. Д. Расчет замены двигателей волоочильной машины ВСК-13М постоянного тока на асинхронные двигатели переменного тока / И. Д. Исмаилов, В. П. Иванова // Точная наука. – 2022. – № 128. – С. 7-10. – EDN NNZELS.

24. Мусатов А.В., Асинхронный двигатель – основной потребитель реактивной мощности, ТОЧНАЯ НАУКА, Кемерово, 2018 г., № 22, стр. 14-17.

25. Пуск и защита двигателей переменного тока [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.electrocentr.com.ua/files> (Дата обращения: 10.01.2021 г.).

26. В.А. Веников Электрические системы, т.2. Электрические сети: Учебн. пособие для электроэнерг. вузов — М.: Высш. шк., 1971. — 440 с.

27. Лыкин, А. В. Электрические системы и сети : учебник / А. В. Лыкин. — Новосибирск : НГТУ, 2017. — 363 с.

28. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов.— М.: Энергоатомиздат, 1989. — 592 с.

29. Бык Ф. Л., Мышкина Л. С. Эффекты интеграции локальных интеллектуальных энергосистем. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, - 2022, 24 (1), 3-15

30. Блинов В.Л., Зубков И.С., Бродов Ю.М., & Мурманский Б.Е. (2021). МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ТРАКТЕ КОМПЛЕКСНОГО ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ГТУ. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 23 (4), 66-83.

31. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

32. Илюшин, П. В., С. П. Филиппов, Н. Л. Новиков Требования к маневренности газотурбинных и газопоршневых генерирующих установок, с. 343-352, 2019.

33. Брускин Д.Э. Электрические машины : учебник для электротехнических специальностей вузов : в 2 ч. / Д. Э. Брускин, А. Е.

Зорохович, В. С. Хвостов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1987. – (Учебник для вузов). – Ч.1. – 1987. – 319 с.

34. Мелешкин Г.А. Переходные режимы судовых электроэнергетических систем.— Л.: Судостроение, 1971. — 344 с.

35. Коротков В. Ф. Автоматическое регулирование в электроэнергетических системах / В. Ф. Коротков. – Москва : Издательский дом «МЭИ», 2013. – 416 с. .

36. Карчин, В. В. Перспективы применения систем накопления энергии в системах электроснабжения собственных нужд АЭС / В. В. Карчин, Е. В. Мельдин, А. Н. Питев // Глобальная ядерная безопасность. – 2023. – № 3(48). – С. 17-25. – DOI 10.26583/gns-2023-03-02. – EDN EOODDO.

37. Ярыш, Р. Ф. Эффективность применения автоматических установок компенсации реактивной мощности в нефтепромысловых электрических сетях / Р. Ф. Ярыш, И. А. Чернявская, А. Р. Гарифуллина // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – Т. 19, № 1. – С. 58-67. – DOI 10.17122/1999-5458-2023-19-1-58-67. – EDN GTDKAS.

38. Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е. Электрические машины: Асинхронные машины/ Под ред. И.П. Копылова. – М.: Изд. «Высш. школа», 1988 г.

39. Батурлин, С. А. Решения для водного хозяйства. Устройства плавного пуска и приводы двигателей / С. А. Батурлин // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2014. – № 4(76). – С. 56-59. – EDN RXRTCV.

40. Планков, А. А. Учет высших гармоник при исследовании динамической устойчивости узлов электроэнергетических систем с асинхронной нагрузкой / А. А. Планков // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – С. 23.

41. Е. А. Шумилов Оценка влияния несинусоидальности питающего напряжения на напряжения смятия зубцов асинхронных двигателей / Е. А. Шумилов, С. К. Гнутов, А. В. Тамьяров, Ю. Б. Казаков // Вестник Ивановского

государственного энергетического университета. – 2017. – № 1. – С. 33-39. – DOI 10.17588/2072-2672.2017.1.033-039.

42. Аносов В. Н. Векторное управление асинхронными электроприводами на основе прогнозирующих моделей : учеб. пособие / В. Н. Аносов, А. А. З. Диаб, Д. А. Котин; Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – 175 с.

43. ГОСТ МЭК 60034-1-2007. Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные и рабочие характеристики.

44. Кравчик А.Э., Стрельбицкий Э.К., Шлаф М.М., Выбор и применение асинхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 96 с.; ил.

45. Тепловая модель асинхронного двигателя для целей релейной защиты / А. В. Булычев, Е. Ю. Ерохин, Н. Д. Поздеев, О. А. Филичев // Электротехника. – 2011. – № 3. – С. 26-30. – EDN NCVZAD.

46. Decentralized emergency control of AC power grid modes with distributed generation / A. Fishov, A. Osintsev, A. Ghulomzoda, A. Marchenko [et al.]. – DOI 10.3390/en16155607. – Text : direct // Energies. – 2023. – Vol. 16, iss. 15. – Art. 5607.

47. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов / В.А. Веников. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1985. — 536 с.

48. Эрнст А.Д. Самозапуск асинхронных электродвигателей: Учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. 46 с.

49. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 3 августа 2018 г. № 630 "Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Методические указания по устойчивости энергосистем»": (с учетом поправок от 30 дек. 2008 г. № 6-ФКЗ; от 30 дек. 2008 г. № 7-ФКЗ) // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2018. – № 630. – Ст. 25

50. Патент № 2543495 С1 Российская Федерация, МПК H02P 23/14, H02P 21/14, G01R 31/34. устройство оценивания параметров и процессов асинхронного электродвигателя : № 2013146768/07 : заявл. 18.10.2013 : опубл. 10.03.2015 / А. Ю. Афанасьев, В. Г. Макаров, В. В. Тамбов, Р. Х. Бариев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Казанский национальный исследовательский технологический университет" (ФГБОУ ВПО "КНИТУ"). – EDN LYAZDW.

51. Волков, А. В. Идентификация потокосцепления ротора и скорости асинхронного двигателя с учётом изменения его активных сопротивлений / А. В. Волков, Ю. С. Скалько // Электротехника. – 2009. – № 11. – С. 2-12. – EDN KWNBVH.

52. Макаров, В. Г. Идентификация параметров и токов ротора трехфазного асинхронного двигателя / В. Г. Макаров // Электротехнические системы и комплексы. – 2010. – № 18. – С. 173. – EDN OTMRQL.

53. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш.техн. учебн. заведений. –3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.ил.

54. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов.– М.: Энергия, 1980. – 928 с.

55. Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Яковлев Ю.А., Ханнанова В.Н. Устройство идентификации параметров трехфазного асинхронного двигателя. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2015;(3-4):101-113.

56. Мелешкин Г.А., Меркурьев Г.В. Устойчивость энергосистем. Монография. Книга 1: СПб.: НОУ "Центр подготовки кадров энергетики", 2006. – 369 с.

57. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей/ Под ред. Л.Г. Мамиконянца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984.– 240 с., нл.

58. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-ч ч. Ч.2.–Машины переменного тока. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. Изд. 3-е, перераб. – Л.:Энергеия, 1973. – 648 с.
59. Лихачев В. Л. Справочник обмотчика асинхронных электродвигателей. - М.: СОЛОН-Пресс, 2004. - 240 с.
60. Соловьев И.И. Автоматические регуляторы синхронных генераторов/ Под ред. Н.И. Овчаренко.– М.: Энергоиздат, 1981.–248 с.
61. Шойко В. П. Автоматическое регулирование в электрических системах : учеб. пособие / В. П. Шойко. - : Издательство НГТУ, 2012. - 195 с.
62. А. Г. Фишов, Е. С. Ивкин, О. В. Гилев, Ю. В. Какоша Режимы и автоматика Минигрид, работающих в составе распределительных электрических сетей ЕЭС. Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 3(44). – С. 22-37.
63. Шумаков Б.Д. Электрические машины переменного тока: методические указания к лабораторным работам. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 93 с
64. Жирицкий Г. С. Газовые турбины двигателей летательных аппаратов: учебное пособие для втузов/ Г. С. Жирицкий [и др.] – 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1971. –620 с.
65. Зысин Л.В. Парогазовые и газотурбинные тепловые электростанции: учеб. пособие. — СПб.: Изд.-во Политехн. ун-та, 2010. — 368 с.
66. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода: Учебник для вузов. — СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург отд-ние, 1994. — 496 с.
67. Чертков М. А. Расчет нагрева обмоток асинхронного двигателя при пуске.—Электричество, 1979, №6. с. 48—51.
68. Бурковский А. Н., Ковалев Е. Б., Коробов В. К. Нагрев и охлаждение электродвигателей взрывонепроницаемого исполнения.—М.: Энергия, 1970. — 185 с.

69. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин: учебник для вузов/ под ред. И.П. Копылова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2011. — 767 с.

70. Rowen, W. I. Simplified Mathematical Representations of Heavy-Duty Gas Turbines. *Journal of Engineering for Power*, 105(4), 865. doi:10.1115/1.3227494

71. Комписенко А.А., Дулов И.В. Разработка системы измерения режимных параметров узла нагрузки. Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2023» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, Е.И. Зимакова. [Электронный ресурс] – М.: МАКС Пресс, 2023.

72. Комписенко А. А. Разработка системы измерения режимных параметров узла нагрузки с асинхронными двигателями / А. А. Комписенко ; науч. рук. И. В. Дулов. - Текст : непосредственный // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. 17 Всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 4–8 дек. 2023 г. : в 11 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2024. – Ч. 4. – С. 33–37. - 100 экз. - ISBN 978-5-7782-5132-8.

73. Advanced Algorithms in Automatic Generation Control of Hydroelectric Power Plants / Y. V. Kazantsev, G. V. Glazyrin, A. I. Khalyasmaa, S. M. Shayk, M. A. Kuparev. – DOI 10.3390/math10244809. – Text : electronic // *Mathematics*. – 2022. – Vol. 10, iss. 24. – Art. 4809 (18 p.). – URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/10/24/4809> (access date: 28.12.2022). – Работавыполнена : приподдержке Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation subject No. FEUZ-2022-0030.

74. Фишов А. Г. Системная автоматика для создания локальных интеллектуальных энергосистем и управления их режимами / А. Г. Фишов, А. И. Марченко, Е. С. Ивкин. – Текст : непосредственный // *Наука и технологии Сибири*. – 2022. – № 3 (6) Новая энергетика. – С. 26 – 28.

ПРИЛОЖЕНИЕ «А» Решение о выдаче патента

Форма № 01 ИЗ-2014

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ (РОСПАТЕНТ)

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993. Телефон (8-499) 240-60-15. Факс (8-495) 531-63-18

На № - от -

Наш № 2023130474/07(067759)

При перетиске просим ссылаться на номер заявки

Исходящая корреспонденция от

07.08.2024

НГТУ, Батаев Анатолий Андреевич
пр. Карла Маркса, 20
г. Новосибирск
630073

РЕШЕНИЕ

о выдаче патента на изобретение

(21) Заявка № 2023130474/07(067759)

(22) Дата подачи заявки 23.11.2023

В результате экспертизы заявки на изобретение по существу установлено, что заявленное изобретение относится к объектам патентных прав, соответствует условиям патентоспособности, сущность заявленного изобретения (изобретений) в документах заявки раскрыта с полнотой, достаточной для осуществления изобретения (изобретений)*, в связи с чем принято решение о выдаче патента на изобретение.

Заключение по результатам экспертизы прилагается.

Приложение: на 6 л. в 1 экз.

Начальник Управления
организации
предоставления
государственных услуг

Документ подписан электронной подписью
Сведения о сертификате ЭП
Сертификат
0418DA81005EB00DA040076C1111D2C713
Владелец Травников
Дмитрий Владимирович
Срок действия с 14.08.2023 по 14.08.2024

Д. В. Травников



*Проверка достаточности раскрытия сущности заявленного изобретения проводится по заявкам на изобретения, поданным после 01.10.2014.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРТИЗЫ

(21) Заявка № 2023130474/07(067759) (22) Дата подачи заявки 23.11.2023
(24) Дата начала отсчета срока действия патента 23.11.2023

ПРИОРИТЕТ УСТАНОВЛЕН ПО ДАТЕ

(22) подачи заявки 23.11.2023

(72) Автор(ы) Фишов Александр Георгиевич, Дулов Илья Вадимович, Фролов Михаил Юрьевич, RU

(73) Патентообладатель(и) ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ", RU

(54) Название изобретения Способ контроля успешности прямого пуска асинхронного двигателя

(см. на обороте)

01	2	ДОМ 01.07.2024	075401
		ИЗФ 01.07.2024	

ВНИМАНИЕ! С целью исключения ошибок просьба проверить сведения, приведенные в заключении, т.к. они без изменения будут внесены в Государственный реестр изобретений Российской Федерации, и незамедлительно сообщить об обнаруженных ошибках.

ПРИЛОЖЕНИЕ «Б» Акт внедрения



УТВЕРЖДАЮ:
Проректор по научной работе
и инновациям
к.т.н.
Отто А. И.
04 2024 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс Новосибирского государственного технического университета результатов диссертационной работы Дулова Ильи Вадимовича на тему «Контроль успешности пуска асинхронного двигателя в энергосистеме малой мощности»

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов диссертационного исследования Дулова Ильи Вадимовича на тему «Контроль успешности пуска асинхронного двигателя в энергосистеме малой мощности» в учебный процесс кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы» Новосибирского государственного технического университета.

Предмет внедрения:

- Способ контроля успешности пусков крупных асинхронных двигателей в локальных системах энергоснабжения с соизмеримыми генерирующими источниками;
- Разработанное программное обеспечение прототипа устройства контроля успешности пусков крупных асинхронных двигателей в локальных системах энергоснабжения с соизмеримыми генерирующими источниками;
- Раздел учебного пособия оффлайн курса для магистрантов «Инновационные технологии в электроэнергетике».

Характер внедрения:

1. Способ и программное обеспечение устройства контроля успешности пусков крупных асинхронных двигателей разработаны в рамках проекта 2030 НГТУ (СП 1 «Силовая электроника и интеллектуальная энергетика»). Прототип соответствующей автоматики испытан на физической электродинамической модели энергосистем и используется в дальнейших исследованиях аспирантами и магистрантами.
2. Учебное пособие используется в учебном процессе по плану обучения магистрантов в 3-м семестре 2-го года обучения.

Декан факультета энергетике,
д.т.н., доцент

А.Г. Русина