

На правах рукописи



Дулов Илья Вадимович

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

Специальность 2.4.3. – Электроэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск - 2024

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

Научный руководитель: **Фишов Александр Георгиевич,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Бердин Александр Сергеевич**
Доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», кафедра Автоматизированных
электрических систем, профессор-исследователь;

Кладиев Сергей Николаевич
Кандидат технических наук, доцент, Федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет», Отделение
электроэнергетики и электротехники Инженерной
школы энергетики, доцент.

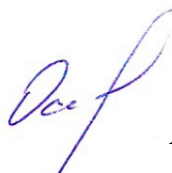
Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский федеральный
университет», г. Красноярск**

Защита состоится «19» декабря 2024 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.05 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации www.nstu.ru

Автореферат разослан «__» октября 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



Анатолий Анатольевич Осинцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время появляется все больше источников распределённой малой генерации, на базе которой формируются и развиваются активные энергорайоны электрических сетей, локальные интеллектуальные 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 энергоёмкости (асинхронные двигатели (АД)) оказывают значительное влияние на работу генерирующих агрегатов и прочей нагрузки.

Пуск крупных АД в таких системах способен приводить к нарушению балансов активной и реактивной мощности, создавая условия для возникновения аварийного режима с отключением генерирующих агрегатов и каскадной потерей 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 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, как с учетом актуальных параметров и режимов АД, так и питающей сети.

Степень разработанности темы исследования. Анализ 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, предотвращающего запуск или экстренно прекращающего 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 для определения критических параметров режима для успешного 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. Значительный 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 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 работы заключается в следующем:

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 энергоснабжения соизмеримой мощности, позволяющий

перерывать пуск двигателя при прогностическом выявлении условий его неуспешности на ранних стадиях процесса при измерении режимных параметров только на статорных обмотках, который может быть использован для выполнения ОКР по созданию опытных и промышленных образцов автоматики. Применение таких устройств в локальных системах энергоснабжения на базе малой генерации обеспечит повышение надежности электроснабжения потребителей и устойчивости работы электростанции.

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 научные 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 патент РФ на изобретение.

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 объём 178 страниц и включает 43 рисунка и 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость и апробация полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту положения.

В первой главе рассмотрены основные стратегии и тенденции развития энергетики. Особое внимание уделено локальным интеллектуальным энергосистемам, сформированным на базе объектов распределённой малой генерации (РМГ), с крупной асинхронной двигательной нагрузкой. Рассмотрено влияние процессов и способов пуска АД на большие и малые энергосистемы, проведен анализ средств и способов контроля его успешности. Прогностический контроль успешности пусков АД в локальных системах энергоснабжения (ЛСЭ) обоснован как определяющий фактор обеспечения надежности их функционирования.

Современная отечественная энергетическая отрасль развивается по пути декарбонизации, цифровизации и децентрализации. Децентрализация энергетической отрасли привела к появлению значительного количества источников РМГ, созданных на базе существующих (реконструкции котельных в когенерационные электростанции) или новых объектов. Объекты с РМГ могут быть нескольких видов: автономные, работающие параллельно с внешней сетью и сбалансированные ЛСЭ с возможностями как параллельной, так и изолированной работы. Параллельный режим объектов РМГ с внешней электрической сетью, в качестве которой может выступать ЕЭС или группа источников РМГ, объединенных в энергосистему малой мощности, является наиболее выгодным как с экономической точки зрения (с выдачей свободной мощности в сеть), так и с технической (стабилизация частоты, демпфирование резких набросов мощности и нерегулярных колебаний нагрузки внешней сетью).

В автономном режиме генераторные агрегаты самостоятельно обеспечивают необходимый режим по напряжению и частоте в ЛСЭ. На фоне разукрупнения мощностей генерации в сети появляются электроприемники, потребляемая мощность которых сопоставима с генерируемой. Такими электроприемниками, в частности, являются АД, пуски которых оказывают существенное влияние на питающую сеть (ПС) с нарушением балансов активной и реактивной мощности и, соответственно, значительными изменениями напряжения и частоты в сети, в т.ч.

на генераторных шинах. Они способны приводить к появлению аварийных режимов с каскадной потерей устойчивости работающих двигателей и/или отключением генераторных агрегатов с последующей потерей энергоснабжения всего энергорайона.

Для снижения влияния включений АД на ПС разработан ряд способов пуска, которые разделяются на две группы: классические; на базе силовой электроники. Для применения классических способов необходимы специализированные схемы подключения и дополнительное оборудование, комбинация которых позволяет обеспечить его успешность путем создания подходящих условий для гарантированного пуска, зачастую, без механической нагрузки. Возможность пуска АД под механической нагрузкой обеспечивает вторая выделенная группа способов, требующая дооснастить двигатель исполнительным устройством на базе силовой электроники. При этом, каждый из способов требует дополнительного, зачастую, дорогостоящего оборудования, не в полной мере исключая влияние процесса пуска на внешнюю ПС.

Все представленные способы реализуют только опосредованный контроль осуществимости пускового процесса АД, который реализуется преобразовательными устройствами при помощи программного ограничения длительно допустимого тока нагрузки в соответствии с предельно возможной термической стойкостью силовых электронных элементов на базе транзисторов/тиристоров или оператором при визуальной оценке допустимости динамики разгона вала двигателя. При этом, отключение АД от ПС производится только по факту отклонения подконтрольных параметров (напряжение, ток, частота, продолжительность и т.д.) от допустимых значений без прогноза их изменения в процессе пуска, что является недостатком существующих способов.

Доступным средством обеспечения эффективности применения прямого пуска АД в ЛСЭ может служить специальная автоматика контроля его успешности с противоаварийным прерыванием при необходимости. Ее применение, не требуя изменения конструкции АД, позволит снизить пагубное влияние процессов неуспешных прямых пусков на сам двигатель и прилегающую сеть за счет прогностической оценки их осуществимости на раннем этапе и автоматического отключения при выявлении критических условий, минимизируя продолжительность их существования.

Глава 2 посвящена задаче и способу многоэтапного контроля успешности пуска АД. Проведена декомпозиция условий успешности пуска АД в ЛСЭ. Обоснованы модели элементов ЛСЭ и методы их параметрической идентификации при валидации на цифровой модели для контроля успешности пуска АД.

Как правило, при пуске АД текущее схемно-режимное состояние ЛСЭ неизвестно ввиду разветвленной топологии и стохастического характера коммутации нагрузки. Для определения актуального состояния ЛСЭ необходимо сформировать и подать возмущающее воздействие, по реакции на которое оценить способность ПС обеспечить успешность пуска АД. В качестве возмущающего воздействия может выступать обычное прямое включение АД, но с коротким зондирующим интервалом, безопасным с точки зрения влияния на оборудование ПС, но достаточным для оценки успешности пускового процесса. При этом, различие в характере и скорости изменения режимных параметров вынуждает производить оценку возможности пуска в его процессе поэтапно.

Задачей многоэтапного прогностического контроля успешности пуска АД в ЛСЭ является прерывание процесса пуска двигателя на заданных этапах контроля возникновения условий его неуспешности при измерении режимных параметров только на статорных обмотках двигателя.

Для создания автоматики контроля пуска АД в ЛСЭ необходимы условия его успешности, корректные модели ЛСЭ и АД для определения критических параметров режима и методы их параметрической идентификации.

На успешность пускового процесса АД в энергосистемах сопоставимой мощности оказывают влияние большое число факторов, которые могут быть сведены к ряду системных и объектных. Системные и объектные факторы обобщенно представляются группами условий успешности пускового процесса, разделенных на необходимые и достаточные.

К необходимым условиям успешности пуска АД следует отнести:

1) *Допустимость снижения напряжения на шинах двигателя.* Величина напряжения до пуска и в его процессе должна быть достаточной для создания ускоряющего электромагнитного момента, превышающего момент сопротивления приводного механизма:

$$U_c > U_{кр} \quad (1)$$

где: U_c – фактическое напряжение двигателя; $U_{кр}$ – минимально возможное (критическое) напряжение для успешного пуска.

2) *Допустимость частоты ПС.* Частота ПС до пуска и в его процессе должна быть достаточной для создания ускоряющего электромагнитного момента, превышающего момент сопротивления приводного механизма:

$$f_{кр} > f_c \quad (2)$$

где: $f_{кр}$ – предельно допустимая (критическая) для успешного пуска частота в ПС; f_c – фактическая частота в ПС.

К достаточным условиям успешности пуска АД следует отнести:

1) *Допустимость частоты в ЛСЭ.* В процессе пуска частота не должна снижаться ниже технического минимума, определяемого параметрами и допустимой областью работы генераторных агрегатов в ЛСЭ:

$$f_c > f_{мин} \quad (3)$$

где: $f_{мин}$ – предельно допустимая минимальная частота для генераторных агрегатов.

2) *Допустимость продолжительности пуска.* Время пускового процесса не должно превышать предельного значения, приводящего к потере устойчивой работы прочей нагрузки в ПС или вызывающего недопустимый нагрев двигателя:

$$t_{пред} > t_{пуск} \quad (4)$$

где: $t_{пред}$ – предельная продолжительность пуска; $t_{пуск}$ – расчётное время пуска.

3) *Допустимость снижения напряжения в ЛСЭ.* Уровень напряжения в ЛСЭ до пуска и в его процессе должен быть достаточным для сохранения устойчивой работы узлов нагрузки:

$$U_c > U_{дон} \quad (5)$$

где: $U_{\text{дон}}$ – минимально допустимое напряжение для устойчивой работы узлов нагрузки.

Обобщенно структура процесса контроля пуска АД, созданная на базе условий его успешности, представлена на рисунке 1. Как видно из рисунка 1, процесс контроля разделен на пять этапов, на каждом из которых выполняется оценка осуществимости пуска:

1. Блокировка пуска. Пуск двигателя должен выполняться только при наличии нормального установившегося режима в ПС с допустимыми параметрами как для двигателя, так и для ЛСЭ.

2. Оценка по необходимым условиям. Экспресс проверка на малом временном интервале безопасном с точки зрения влияния пускового процесса на оборудование ПС и сам двигатель.

3. Оценка по достаточным условиям. Выполняется прогностическая проверка допустимости снижения частоты для ЛСЭ на ранней стадии процесса.

4. Оценка продолжительности пуска. Выполняется прогностическая проверка допустимости продолжительности пуска по условию термического воздействия на двигатель.

5. Запрет повторного включения (ЗПВ). Ввод блокировки на прерывание команды на включение двигателя этапами контроля успешности.

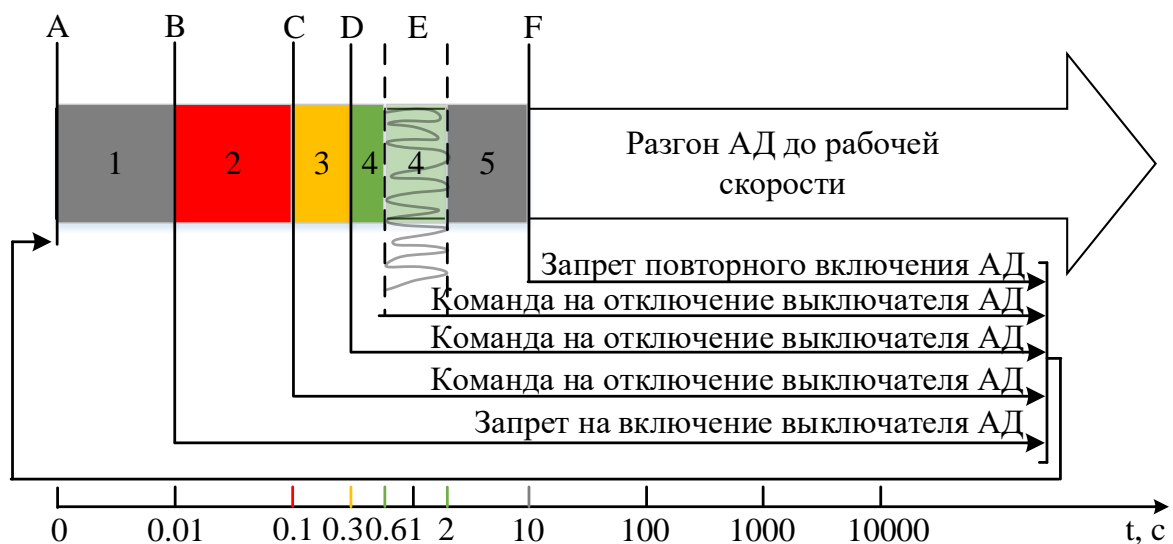


Рисунок 1 – Обобщенная структура контроля успешности пуска АД

Многоэтапный контроль успешности пуска по рисунку 1 выполняется следующим образом:

- Автоматика находится в режиме ожидания внешней команды на включение АД (момент времени (А)).
- После получения внешней команды на включение автоматикой по условиям (1), (2), (3), (5) производится оценка успешности по режимным параметрам ПС до пуска двигателя (напряжения и частота находятся в допустимой области по условиям успешности на этапе проверки 1 на момент времени (В)). Проверка производится с улавливанием режимных параметров присущих нормальному квазиустановившемуся режиму ЛСЭ на заранее заданном временном интервале, после выполнения которой производится включение двигателя с зондирующим интервалом. При фактическом отсутствии допустимого режима в ПС автоматика продолжает поиск подходящего момента включения до

конца сканирующего интервала, после которого внешняя команда на включение блокируется. В условиях отсутствия данных о характеристиках и параметрах прочей нагрузки в ЛСЭ минимальное значение напряжения для устойчивой работы для условия (5) принимается в соответствии с нормативной документацией равным регламентированному.

- После выполнения проверки на 1-ом этапе контроля производится пуск АД с зондирующим интервалом, который включает в себя 1 этап оценки успешности.

- Далее, выполняется идентификация электрических параметров АД, определяются критические параметры режима и производится оценка отклонения параметров режима по условию (5) на момент пуска двигателя без учета влияния регуляторов генераторных агрегатов ЛСЭ на интервале 0,1 с (этап контроля 2). Проверка соблюдения условий успешности (1), (2) выполняется в момент времени (С), завершающего 2-ой этап.

- Далее, на интервале 0,3 с производится оценка влияния генераторных агрегатов на величину режимных параметров сети (3-ий этап контроля). Выполняется прогностическая оценка минимального значения частоты в ЛСЭ при пуске АД для условия (3). В момент времени (D) выполняется проверка соблюдения условий (1), (2), (3), (5) с учетом действия регуляторов.

- Далее, на интервале не менее нескольких секунд выполняется оценка продолжительности пускового процесса двигателя (4-ый этап контроля). В конце интервала (момент времени (E)) выполняется проверка соблюдения условия (4).

- После получения команд о выполнении условий успешности на этапах проверки 2-4 автомата находится в режиме ожидания команды на ЗПВ (5-ый этап контроля), которая вводится по достижению двигателем нормальной установившейся скорости вращения в момент времени (F).

В конце каждого из этапов проверки при невыполнении условий автоматикой производится прерывание процесса пуска АД, после которого, при необходимости, производится поиск подходящего момента для повторного выключения с учетом ранее полученных параметров ПС и двигателя.

На представленных этапах (рисунок 1) в заданные моменты времени необходимо определять критические параметры режима для контроля успешности пуска АД. Для определения критических параметров режима необходимы корректные и быстродействующие модели ЛСЭ и АД для прерывания процесса неуспешного пуска за доли секунды.

В работе исследована возможность использования статической модели режима АД для прогностического контроля успешности его пуска. На цифровой модели в MATLAB/Simulink, имитирующей подключение АД с полной схемой замещения (в осях q и d) к шинам бесконечной мощности (ШБМ), была проведена валидация статической модели с записью режимных параметров в пусковом процессе. В программной среде производилось сопоставление электромагнитных моментов, развиваемых двигателем, по статической и динамической моделям в условиях изменения скорости вращения ротора. 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 на малом временном интервале, т.к. имеет малую погрешность определения электромагнитного момента на начальном этапе процесса.

Идентификация параметров статической модели АД может быть выполнена без прямого измерения скорости и режимных параметров ротора. При прямом пуске по величине напряжения и тока статора на начальном этапе процесса имеется возможность определить электрические параметры Г-образной схемы замещения двигателя для контроля его успешности при условии, что они распределены равномерно между обмотками (часто используемое допущение при расчете параметров двигателя по паспортным данным). Активное и индуктивное сопротивления статора и ротора двигателя определяются:

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

где: X_1, X_2' – индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора; R_1, R_2' – активные сопротивления обмоток статора и ротора; P, Q – активная и реактивная мощности двигателя; I – ток двигателя.

Применимость метода пассивной параметрической идентификации была проверена и подтверждена на физической модели энергосистемы. В процессах пуска АД АОК2-51-6 УЗ время идентификации составило 0,024 с (6% времени всего переходного процесса), погрешность определения сопротивлений АД не превышала 9%.

Механические параметры АД при отсутствии измерения скорости вращения ротора могут быть определены в режиме выбега при его отключении от ПС (электромагнитный момент равен 0) в соответствии с выражением:

$$T_j = \frac{\sum \frac{(-M_{сопрт}) w_{ном} \Delta t}{M_{ном} \cdot \Delta w_2}}{n},$$

где: $M_{сопрт}, M_{ном}$ – механический и номинальный моменты АД; T_j – механическая постоянная инерции вращающихся масс нагруженного двигателя; $w_{ном}$ – номинальная угловая скорость магнитного поля статора; w_2 – угловая скорость вращения ротора АД.

Применимость метода параметрической идентификации была проверена и подтверждена при цифровом моделировании. Погрешность определения механической постоянной инерции составила менее 1 %.

Для модели ПС определяющим параметром является минимальная частота ЛСЭ в процессе пуска АД, значение которой достигается спустя секунды после включения двигателя. Напряжение же при пуске АД в ЛСЭ изменяется практически мгновенно, что позволяет фиксировать его недопустимое отклонение на малом интервале времени в нагрузочном узле, не требуя прогнозирования его минимального установившегося значения.

В условиях отсутствия данных о топологии и электрических параметров оборудования ЛСЭ модель ПС может быть представлена: статической характеристикой регулятора частоты вращения первичного двигателя (АРС) с

известным коэффициентом статизма; аппроксимирующей функцией, отражающей характер изменения частоты при изменении баланса активной мощности.

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, как правило, одинаков и зависит от параметров настройки регуляторов и инерции генераторных агрегатов (снижение частоты до некоторого минимального значения, затем, ее восстановление до прежнего значения (астатиическое регулирование) или до нового установившегося с некоторой статической ошибкой. Для контроля успешности пуска АД важным является оценка по локальным измерениям минимального значения частоты, которая может быть получена путем прогнозирования ее изменения на раннем этапе процесса.

Предельное 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. Частота в ЛСЭ на начальном этапе изменяется аperiodически в соответствии с выражением:

$$f = f_p + (f_0 - f_p)e^{\alpha t}, \quad (6)$$

где: f_p – минимальная частота; α – декремент затухания; t – относительное время начала снижения частоты; f – фактическая частота.

Представленное выражение позволяет спрогнозировать результирующее значение частоты, соответствующее выходу АД в нормальный режим работы, на малом интервале процесса прямого пуска двигателя и не требует информации о фактической нагрузке генерирующих агрегатов, параметрах и топологии ПС.

В главе 3 представлены разработанные алгоритмы расчета критических параметров и поэтапного контроля успешности пуска АД. Проведена верификация комплексного поэтапного контроля успешности пуска АД на цифровой модели ЛСЭ.

В таблице 1 приведены критические параметры режима для успешного пуска АД в ЛСЭ. Выражения определены по статической модели АД. Минимальная частота для генераторных агрегатов ЛСЭ и предельное время пуска АД определяются заблаговременно и зависят от режимов, параметров и рабочих характеристик конкретного оборудования.

Таблица 1 – Критические параметры режима для успешного пуска АД в ЛСЭ

Параметр	Условие	Способ определения
Критическое напряжение ($U_{кр}$)	$U_d > U_{кр}$	$U_{кр} = \sqrt{\frac{M_{сопрт} (X^2 + R^2) w_c}{R_2'}}$
Критическая частота ($f_{кр}$)	$f_{кр} > f_c$	$X^2 \frac{(2\pi f_{кр})^3}{w_{ном}^2} + R^2 (2\pi f_{кр}) - \frac{U^2 R_2'}{M_{сопрт}} = 0$
Максимально допустимое время пуска ($t_{доп}$)	$t_{пред} > t_{пуск}$	Рассчитывается в соответствии с предельной допустимой температурой изоляции АД и количеством тепла, которое выделяется в двигателе в процессе пуска.

<p>Предельно допустимое минимальное значение частоты ($f_{\text{МИН}}$)</p>	<p>$f_c > f_{\text{МИН}}$</p>	<p>Задается в соответствии с техническими характеристиками генераторных агрегатов (в работе принимается равным 45 Гц)</p>
--	---	---

$M_{\text{сопрт}}$ – момент сопротивления приводного механизма АД; X – суммарное индуктивное сопротивление статора и ротора; R – суммарное активное сопротивление статора и ротора; ω_c – угловая скорость магнитного поля статора.

По модели изменения частоты в ЛСЭ при изменении баланса активной мощности (6) на начальном этапе процесса пуска, в котором после включения двигателя автоматикой формируется база ретроспективных данных о фактическом значении частоты ПС, имеется возможность оценить ее предельное снижение по выражению:

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

где

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

Исследования показали, что модели, основанные на аппроксимации моментно-скоростной характеристики двигателя, неприменимы для контроля его успешности в ЛСЭ ввиду высокой погрешности определения времени пуска и завышенных требований к величине отклонения режимных параметров ПС. Модель, основанная на аппроксимации угловой скорости вращения АД, требует наличия актуальной информации о ее величине. Угловая скорость ротора АД в процессе пуска при отсутствии датчика скорости может быть определена из уравнения движения ротора:

$$\omega_2 = \sum_{i=0}^n \frac{(M_{\text{эм}i} - M_{\text{сопрт}i})^{\omega_{\text{НОМ}}}}{M_{\text{НОМ}} \cdot T_j} \Delta t_i,$$

где $M_{\text{эм}}$ – электромагнитная мощность АД, Δt – интервал дискретизации блока управления (БУ). Продолжительность разгона АД при наличии актуальной информации о скорости вращения ротора:

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

где $\omega_{\text{уст}}$ – значение угловой скорости ротора двигателя, соответствующее установившемуся режиму при заданном моменте сопротивления, ω_0 – значение угловой скорости ротора на момент выявления устойчивого разгона двигателя, ω_2

– текущая угловая скорость ротора, определяемая исходя из величины небаланса моментов двигателя.

В соответствии с предложенной моделью и обобщенной структурой многоэтапного контроля успешности при возможности измерения только местных режимных параметров ПС был разработан алгоритм работы автоматики, представленный на рисунке 2.

Цифровое моделирование критических с точки зрения успешности пуска режимов работы ПС, при моменте приводного механизма АД превышающем номинальный (200 Н*м), позволило определить погрешность оценки предложенной модели контроля при различных состояниях ЛСЭ. Результаты моделирования приведены в таблице 2. Погрешность определения критических и прогнозируемых значений параметров режима по предложенной модели для контроля успешности пусков АД является допустимой.

При верификации разработанного алгоритма производился расчет серии пусков АД с варьированием в широком диапазоне схемно-режимного состояния ЛСЭ (рисунок 3). Проверочный сценарий 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 при заданных схемно-режимных условиях. Результатом является либо переход двигателя из статического состояния в состояние с нормальной рабочей скоростью, либо прерывание процесса при фиксации условий неуспешности.

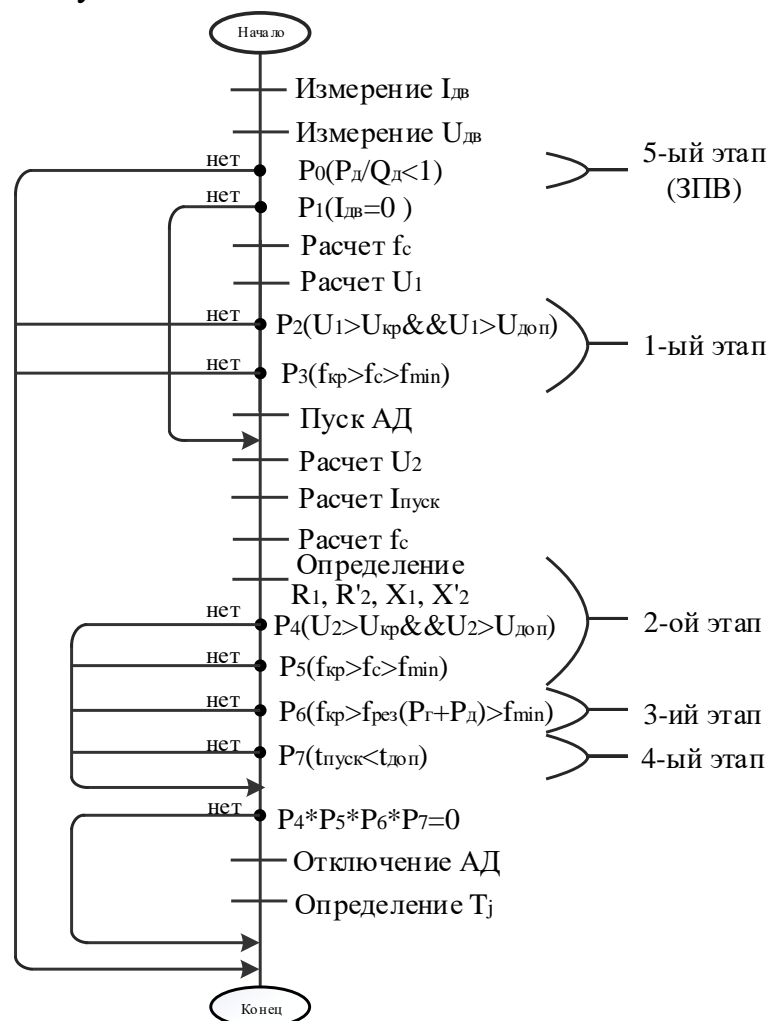


Рисунок 2 – Обобщенный алгоритм поэтапного контроля успешности пуска АД

Алгоритм контроля успешности пусков АД был испытан на цифровой модели ЛСЭ (Рисунок 3) при 34-х схемно-режимных условиях. В 85% случаев разработанный алгоритм корректно срабатывал при выявлении успешности/неуспешности пуска двигателя, что свидетельствует о возможности его применения для контроля успешности пусков АД в ЛСЭ.

Таблица 2 – Критические и прогнозируемые параметры режима цифровой модели ЛСЭ

Параметр	Рассчитанное значение	Фактическое значение	Погрешность, %
Критические			
Укр, В	308,4	309,942	0,5
f _{кр} , Гц	51,86	51,1	1,5
Прогнозируемые			
f _p , Гц	46,13	46,32	0,41
t _{пуск} , с	3,7	3,4	8,8

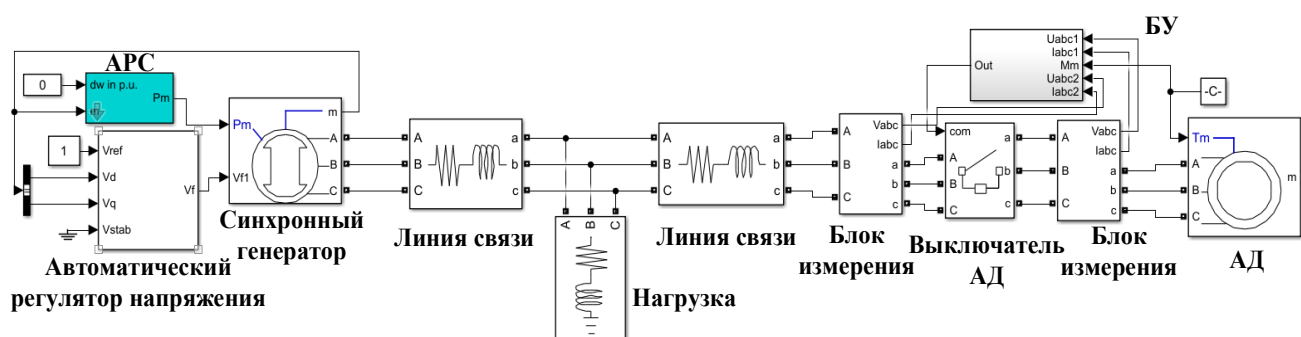


Рисунок 3 – Цифровая модель энергосистемы малой мощности с крупным АД

В главе 4 приведено описание разработанного прототипа устройства контроля успешности пуска АД на базе промышленного контроллера Raptor с программной реализацией в LabVIEW. По программе проведены испытания прототипа автоматики контроля успешности пуска АД на физической модели ЛСЭ, доказана его работоспособность.

Для технической реализации алгоритма автоматики рассмотрено два варианта аппаратного исполнения: плата Arduino Uno с микроконтроллером ATmega328; промышленный процессорный блок RAPTOR-x86.

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.

Прототип автоматики был реализован на процессорном блоке RAPTOR-x86, являющимся специализированной аппаратной платформой для построения устройств противоаварийной автоматики и исполнения технологических алгоритмов с возможностью взаимодействия с устройствами расширения. Для прототипа были использованы следующие дополнительные устройства расширения:

1. Трехканальный модуль ввода аналоговых сигналов от цепей тока REXT-I3.

2. Трехканальный модуль ввода аналоговых сигналов от цепей напряжения REXT-U8.

3. Модуль вывода дискретных сигналов REXT-DO220.

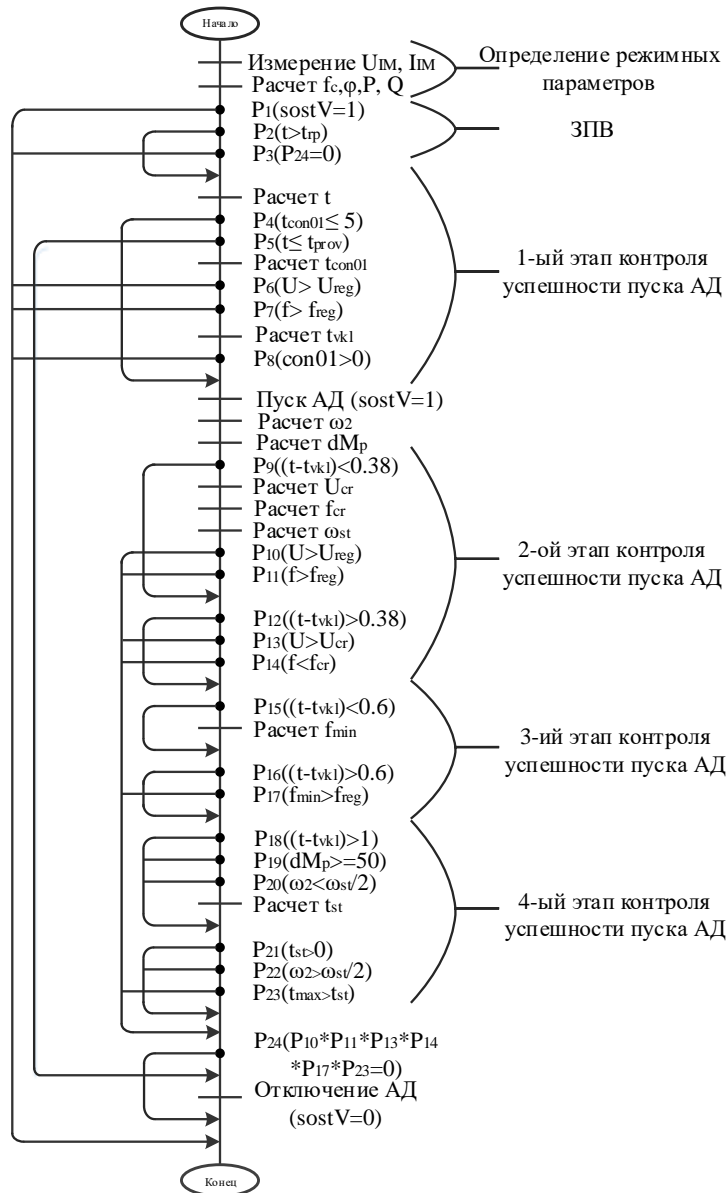


Рисунок 4 – Алгоритм контроля успешности пуска АД в ЛСЭ

Алгоритм контроля успешности пуска АД на RAPTOR-x86 (рисунок 4) был реализован в среде разработки LabVIEW на языке C++ с применением функциональных блоков LabVIEW, введением дополнительных алгоритмов определения действующих значений тока, напряжения, фазы между ними, активной и реактивной мощности, а также частоты ПС.

Для испытания разработанного прототипа автоматики на электродинамической модели (ЭДМ) центра коллективного пользования устройств автоматики и защиты электроэнергетических систем при НГТУ была создана физическая модель ЛСЭ с АД, приведенная на рисунке 5.

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 5 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.

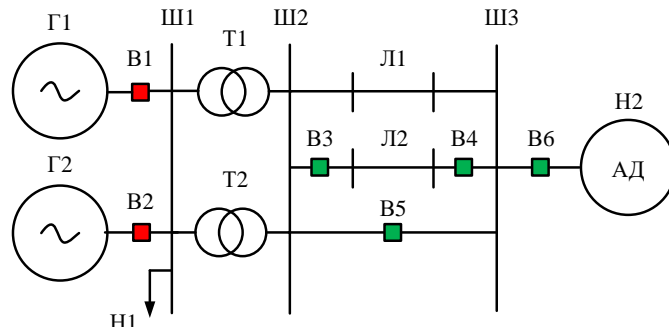


Рисунок 5 – Схема ЛСЭ с АД для испытания прототипа автоматики

Содержание программы испытаний:

1. Проверка блокировки пуска АД на 1-ом этапе при выходе параметров за допустимые значения для нормального режима.
2. Проверка отключения АД на 2-ом 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 его процессе при вариации уставки автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) синхронных генераторов (СГ) в исходном режиме (номинальное фазное напряжение 127 В).
5. Проверка отключения АД на 2-ом этапе по условию снижения напряжения питания ниже допустимого уровня в процессе при вариации сопротивления связи между СГ и АД.
6. Проверка отключения АД на 3-ем этапе по условию снижения частоты в ПС в процессе 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-ом этапе по условию превышения допустимой частоты ПС в процессе при вариации уставки АРС СГ в исходном режиме.

Для проведения испытаний пунктов 1 – 4, 6 и 7 в схеме рисунка 5 включался выключатель В5 для усиления электрической связи между генераторным и нагрузочным узлами. В пункте 5 для изменения схемных условий в ЛСЭ при отключенном выключателе В5 вводились в работу В3 и В4.

Прототип автоматики был испытан при 24-х схемно-режимных условиях. В 91% случаев прототип корректно определял успешность/неуспешность пуска АД в ЛСЭ, при этом, не зафиксировано случаев отсутствия выдачи команды на прерывание процесса пуска в условиях его неуспешности.

Погрешность определения минимальной частоты в ЛСЭ не превысила 4 %, продолжительности пуска двигателя –14 %.

В качестве примеров на рисунках 6 и 7 приведены осциллограммы режимных и критических параметров при пуске АД в ЛСЭ для пункта 6 программы испытаний. Для рисунков 6 и 7 приняты следующие обозначения: U – напряжение; P – активная мощность; P_t – механическая мощность; f – частота; U_{kr} – критическое напряжение; f_{min} – расчетное предельное снижение частоты; $t_{пуск}$ – расчетное время пуска; $U_{рег}$ – минимально допустимое напряжение; $f_{рег}$ – минимально допустимая частота; $t_{пускR}$ – фактическая продолжительность пуска; w_2 – 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.

На рисунке 6 приведен процесс пуска АД при частоте предшествующего режима равной 50 Гц с моментом сопротивления 1.78 Н*м. В процессе пуска режимные параметры остались в допустимом диапазоне, все условия успешности были выполнены.

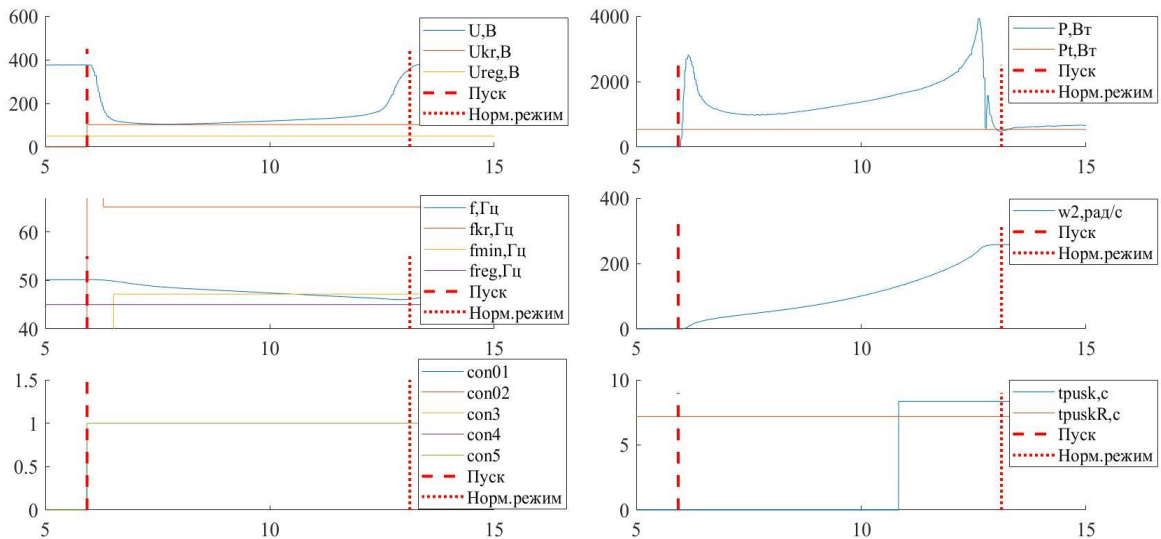


Рисунок 6 – Осциллограмма режимных и критических параметров при частоте предшествующего пуску режима 50 Гц

На рисунке 7 приведен пуск АД при частоте предшествующего режима равной 48 Гц с моментом сопротивления 1.78 Н*м. Из рисунка 7 видно, что процесс пуска АД был прерван за 0,7 с по условию (2) 3-го этапа контроля. В интервал отключения входили: предиктивная оценка БУ величины минимальной частоты продолжительностью 0,6 с; время срабатывания модельного выключателя – 0,1 с.

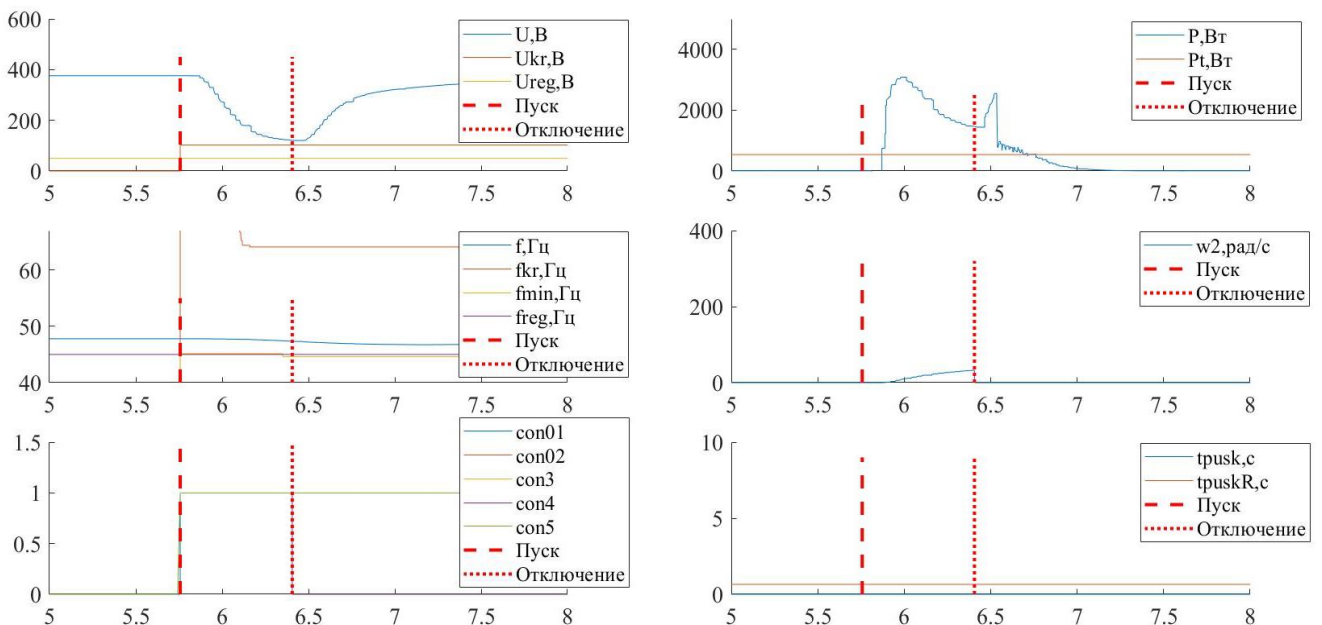


Рисунок 7 – Осциллограмма режимных и критических параметров при пуске и частоте предшествующего режима 48 Гц

Проведенные испытания на физической модели ЛСЭ прототипа автоматики контроля успешности пусков АД на базе RAPTOR-x86 доказали его работоспособность. Применение автоматики в ЛСЭ позволит предотвратить повреждение подконтрольного двигателя или оборудования ПС, сохранить их ресурс работоспособности в процессах неуспешных прямых пусков путем их выявления на ранних этапах и прерывания.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Определены условия успешности пуска АД в ЛСЭ и обоснованы модели оценки критических параметров режима.
2. Разработаны методы параметрической динамической и статической моделей АД.
3. Разработан способ поэтапного прогностического контроля успешности прямого пуска АД в ЛСЭ.
4. Проведены исследования разработанного способа контроля успешности пуска АД и методов параметрической идентификации.
5. Разработан и испытан на физической модели ЛСЭ прототип автоматики контроля успешности пусков АД.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных в ВАК РФ:

1. Дулов, И. В. Прототип автоматики контроля успешности пуска асинхронных двигателей в локальных системах энергоснабжения / И. В. Дулов, А. Г. Фишов // *iPolytech Journal*. – 2024. – Т. 28, № 2. – С. 303-319. – DOI 10.21285/1814-3520-2024-2-303-319.

2. Фишов А. Г. Контроль успешности пусков асинхронных двигателей в локальных энергосистемах = Controlling the success of induction motor starting in local power systems / А. Г. Фишов, И. В. Дулов, М. Ю. Фролов // *Релейная защита и автоматизация*. – 2023. – № 3 (52). – С. 4–17.

3. Оперативная идентификация электромеханических параметров синхронного генератора для задач интеллектуального управления / М. Ю. Фролов, Р. Ю. Степанович, Н. Н. Лизалек, И. В. Дулов. – DOI 10.52254/1857-0070.2022.4-56.02. // *Проблемы региональной энергетики*. – 2022. – № 4 (56). – С. 15–25.

4. Фролов М. Ю. Параметрическая идентификация асинхронной машины в процессе эксплуатации / М. Ю. Фролов, И. В. Дулов // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. – 2021. – Т.13, №1(49). – С. 85–96.

Патент на изобретение Российской Федерации:

5. Патент на изобретение № 2827055 приоритет от 23.11.2023. Способ контроля успешности прямого пуска асинхронного двигателя / Фишов А.Г., Дулов И.В., Фролов М.Ю.; опубл. 23.09.2024, Бюл. № 27 – 14 с.

Работы, опубликованные в международных и российских изданиях, сборниках научных трудов конференций:

6. Комписенко А. А. Разработка системы измерения режимных параметров узла нагрузки с асинхронными двигателями / А. А. Комписенко; науч. рук. И. В. Дулов // *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.

7. The Algorithm for Controlling the Success of Induction Motor Starting in Small-scale Power Systems / A. G. Fishov, I. V. Dulov, R. M. Khatylenko, Y. A. Frolova. - DOI 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017083 // *International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON–2022): proc., Novosibirsk-Yekaterinburg, 11–13 Nov. 2022.* – IEEE, 2022. – P. 1690-1696. - URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10017083>

8. Дулов И. В. Параметрическая идентификация асинхронного двигателя в процессе пуска / И. В. Дулов // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. 16 Всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 5–8 дек. 2022 г.: в 11 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. – Ч. 4. – С. 30–34.
9. Fishov A. G. The induction motor model for control starting in small-scale power systems / A. G. Fishov, I. V. Dulov, R. M. Khatylenko. - DOI 10.1109/UralCon52005.2021.9559568 // International Ural conference on electrical power engineering (UralCon): proc., Magnitogorsk, 24–26 Sept. 2021. – Magnitogorsk: IEEE, 2021. – P. 255-260.
10. Дулов И. В. Анализ гармонического состава напряжения в нагрузочном узле с асинхронными двигателями / И. В. Дулов, Р. М. Хатыленко, Я. А. Фролова // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. 15 Всерос. науч. конф. молодых ученых, посвящ. Году науки и технологий в России, Новосибирск, 6–10 дек. 2021 г.: в 10 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. – Ч. 4. – С. 25-30.
11. Дулов И. В. Исследование устойчивости работы крупных асинхронных двигателей в энергосистемах малой мощности / И. В. Дулов, А. Г. Фишов // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч., Новосибирск, 30 нояб.–4дек. 2020 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. – Ч. 4. – С. 31–35.
12. Frolov M. Y. Identification of asynchronous motor parameters in operational mode / M. Y. Frolov, I. V. Dulov, I. M. Yunusova // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon): proc., Chelyabinsk, 1–3 Oct. 2019. – Piscataway: IEEE, 2019. – P. 86-91. - DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877630.
13. Дулов И. В. Контроль пусков асинхронного двигателя в системах соизмеримой мощности / И. В. Дулов, А. Г. Фишов // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч., Новосибирск, 2–6 дек. 2019 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – Ч. 4. – С. 27–31.
14. Дулов И. В. Идентификация параметров асинхронной машины в эксплуатационных режимах / И. В. Дулов, М. Ю. Фролов, А. Г. Фишов // Наука. Технологии. Инновации: сб. научн. тр.: в 9 ч., Новосибирск, 3–7 дек. 2018 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 4. – С. 30–35.
15. Дулов И. В. Система измерения режимных параметров в генераторных и нагрузочных узлах / И. В. Дулов, М. Ю. Фролов; науч. рук. А. Г. Русина // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 10 ч., Новосибирск, 4–8 дек. 2017 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 4. – С. 25-28.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, тел./факс (383) 346-08-57.

Формат 60 x 84/16. Объем 1.25 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № Р-03730. Подписано в печать 10.10.2024 г.