

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

На правах рукописи



Чершова Валерия Олеговна

**КОНТРОЛЬ УСТОЙЧИВОСТИ УЗЛОВ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 05.14.02 –

Электрические станции и электроэнергетические системы

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Фишов Александр Георгиевич

НОВОСИБИРСК – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. УСТОЙЧИВОСТЬ НАГРУЗКИ. ИСТОРИЯ ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ПУТИ ЕЁ РЕШЕНИЯ.....	11
1.1. Заблаговременная оценка запаса статической устойчивости нагрузки, основанная на предположении об известности параметров схемы замещения нагрузки.....	11
1.2. Теоретические основы идентификации параметров асинхронных машин.....	26
1.3. Опыт параметрической идентификации асинхронных машин.....	30
1.4. Опыт определения критических напряжений узлов нагрузки в результате идентификации при мониторинге запасов статической устойчивости энергосистемы.....	34
ВЫВОДЫ.....	43
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ, МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УЗЛОВ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ	44
2.1. Определения критических параметров на шинах комплексной нагрузки в режиме реального времени.....	44
2.2. Определение критических параметров центра питания комплексной нагрузки в режиме реального времени.....	49
2.3. Проверка адекватности результатов идентификации посредством экспериментальных исследований на физической модели энергосистем НГТУ	53
2.4. Определение критических параметров узла нагрузки традиционными методами с использованием программных средств моделирования режимов энергосистем.....	59
ВЫВОДЫ.....	66

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УЗЛОВ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАДЁЖНОСТИ.....	67
3.1. Разработка рекомендаций по повышению достоверности результатов идентификации и определения критических параметров на шинах комплексной нагрузки.....	67
3.2. Разработка рекомендаций по повышению достоверности результатов идентификации и определения критических параметров в центре питания комплексной нагрузки.....	72
3.3. Оценка достоверности результатов идентификации с учётом разработанных рекомендаций.....	78
3.3.1. Достоверность результатов идентификации при использовании измерений режимных параметров, полученных в ходе эксперимента.....	78
3.3.2. Достоверность идентификации параметров схем замещения при использовании современных измерительных устройств.....	80
3.4. Оценка влияния состава комплексной нагрузки на достоверность результатов идентификации.....	83
3.5. Проверка достоверности идентификации с использованием программных средств моделирования режимов энергосистем.....	87
ВЫВОДЫ.....	91
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА КОНТРОЛЯ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УЗЛОВ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ.....	92
4.1. Анализ современного измерительного оборудования для реализации способа	92
4.2. Схема и программа эксперимента по исследованию способа контроля критических параметров узлов двигательной нагрузки на физической модели энергосистем НГТУ.....	102
4.3. Результаты эксперимента и заключение о достоверности результатов	

идентификации исследуемого метода.....	108
ВЫВОДЫ.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	114
СОКРАЩЕНИЯ.....	115
ТЕРМИНЫ.....	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	119
Приложение 1. Акты внедрения.....	134

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Актуальность задачи сохранения устойчивости нагрузки постоянно возрастает по мере увеличения ответственности и усложнения технологических процессов в металлургической, нефтегазовой и других отраслях промышленности. Критические параметры нагрузки являются важнейшим фактором, определяющим запас по статической устойчивости нагрузки и устанавливающим область нормальных режимов её работы.

Используемый в настоящее время метод определения пределов статической устойчивости нагрузки, заключающийся в заблаговременном расчёте её критического напряжения на основании каталожных данных оборудования и моделирования нормативных аварийных возмущений, имеет ряд недостатков. К ним относятся завышение коэффициентов запаса в результате использования при их расчёте наиболее неблагоприятных схемно-режимных условий, а также настройка устройств режимной и противоаварийной автоматики на заблаговременно определённые завышенные критические параметры, и, как следствие, – снижение эффективности энергосистемы (ЭС).

Основной резерв снижения системных ограничений по условию устойчивой работы нагрузки лежит в переходе от концепции заблаговременного определения этих ограничений к их определению в темпе процесса. Данный подход позволяет повысить точность и эффективность расчёта критических параметров за счёт использования актуальной информации о режимных параметрах нагрузки и параметрах схемы её замещения, имеющих свойство меняться в процессе работы. Определение актуальных значений критических параметров и запасов устойчивости нагрузки необходимо как собственнику нагрузки, заинтересованному в эффективном использовании своих мощностей, так и сетевым компаниям, поскольку критические параметры нагрузки являются одним из факторов, определяющих работу электрической сети.

Практическая реализация методов определения критических параметров нагрузки в режиме реального времени стала возможной благодаря развитию в России на протяжении прошедшего десятилетия регистраторов аварийных событий, систем сбора и передачи данных, а также системы мониторинга переходных режимов (СМПР). Одной из основных задач развития технологий СМПР в России и в мире является повышение эффективности работы энергосистемы и её управления.

Определение критических параметров нагрузки в режиме реального времени может функционально являться частью глобального алгоритма работы СМПР, способствуя повышению эффективности работы энергосистемы России за счёт снижения системных ограничений по условию устойчивой работы нагрузки.

На основании вышесказанного, актуальной является задача разработки принципиально новых методов определения критических параметров в узлах нагрузки, позволяющих на основе актуальной информации о режимных параметрах нагрузки в темпе процесса рассчитывать текущие значения параметров необходимых расчетных схем замещения и критических параметров на их основе.

Целью работы является разработка способов, расчетных методов и алгоритмов определения критических параметров узлов двигательной нагрузки в режиме реального времени.

Для достижения цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Анализ достигнутых результатов и выявление нерешенных задач на основе обзора научных работ отечественных и зарубежных авторов, посвящённых устойчивости узлов нагрузки.

2. Разработка способов и расчетных методов определения критических параметров узлов нагрузки в режиме реального времени.

3. Проверка работоспособности способов и методов определения критических параметров комплексной нагрузки и алгоритмов на их основе, достоверности получаемых результатов посредством проведения

вычислительных экспериментов и испытаний в условиях, максимально приближенных к промышленным.

4. Разработка рекомендаций по повышению вычислительной эффективности метода для обеспечения устойчивости численного решения системы уравнений в процессе идентификации расчетной модели и повышения точности результатов.

5. Разработка технического задания на устройство контроля устойчивости двигателей и узлов двигательной нагрузки.

6. Подготовка заявки на патент способа контроля устойчивости узлов двигательной нагрузки.

Методы исследования

Полученные в работе результаты основываются на применении теоретических и экспериментальных методов исследования в предметной области, базируются на положениях фундаментальных и прикладных наук, таких как математическое моделирование, теория устойчивости, теоретические основы электротехники и электроэнергетики.

Достоверность и обоснованность основных научных положений и выводов работы подтверждаются теоретическими обоснованиями, совпадением результатов, полученных теоретически, с результатами экспериментов при моделировании и испытаниях, максимально приближенных к промышленным условиям.

Научная новизна работы

1. Предложен новый способ определения критических параметров и запасов устойчивости узлов комплексной нагрузки в режиме реального времени, основанный на идентификации параметров схемы замещения нагрузки по текущим значениям её режимных параметров.

2. Разработаны методы и алгоритмы расчёта критических параметров и запасов устойчивости двигателей и узлов двигательной нагрузки в режиме реального времени для их использования в противоаварийном и оперативном управлении.

3. Исследованы факторы, определяющие достоверность результатов идентификации расчетной модели для определения критических параметров узлов нагрузки и предложено использование избыточности измерений режимных параметров для её повышения.

4. Разработаны рекомендации по повышению достоверности получаемых результатов за счёт использования переопределённости решаемых систем уравнений.

5. Обоснованы рекомендации по использованию контроля критических параметров в узлах нагрузки при управлении режимами энергосистем.

Практическая ценность и реализация результатов работы

Результаты исследований, проведенных в диссертационной работе, учтены при разработке устройств противоаварийной автоматики (ПА) для объектов электроэнергетической системы, что подтверждено актом об использовании результатов диссертационной работы.

Предложенный способ определения критических параметров и управления нагрузкой реализуется на базе Комплекса противоаварийной автоматики – КПА-М (разработка и производство ЗАО «ИАЭС», г. Новосибирск). Устройства КПА-М, реализующие указанный способ, планируются к установке на нескольких объектах МЭС Сибири.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Полученные соискателем основные научные результаты соответствуют пункту 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» паспорта специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Регистрация текущих параметров нагрузки при искусственно создаваемых или естественных изменениях режима её работы позволяет

идентифицировать параметры расчётной схемы замещения с последующим определением критических параметров и запасов устойчивости узлов двигательной нагрузки в режиме реального времени.

2. Использование переопределённости решаемых систем уравнений повышает стабильность и достоверность получаемых результатов и позволяет производить расчёт критических параметров в узлах комплексной нагрузки с допустимой погрешностью.

3. Предложенные методы и алгоритмы обеспечивают достоверные результаты определения критических параметров, запасов устойчивости двигателей и узлов двигательной нагрузки и могут быть использованы в устройствах противоаварийной автоматики.

4. Контроль критических параметров узлов нагрузки при управлении режимами энергосистем и электрических сетей целесообразен как в самих узлах нагрузки, так и со стороны центров их питания.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 3-ей научно-технической конференции «Релейная защита и противоаварийная автоматика. Перспективы развития», организованной Филиалом ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири и посвящённой памяти В.Н. Ясникова, в декабре 2011 года в г. Кемерово; на научно-практической конференции «Современные устройства в электроэнергетике: релейная защита, автоматика и элементы активно-адаптивных сетей. Подготовка кадров для электроэнергетической отрасли», проводившейся в Национальном исследовательском Томском политехническом университете, Энергетическом институте, в мае 2012 года в г. Томске; на 4-ой научно-технической конференции «Повышение эффективности и надёжности функционирования устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики в ОЭС Сибири», организованной Филиалом ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири и посвящённой памяти В.Н. Ясникова, в декабре 2012 года в г. Кемерово; на научно-технической конференции «ЭНЕРГОСИСТЕМА: Исследование свойств,

Управление, Автоматизация», организованной ЗАО «Институт автоматизации энергетических систем», 30 сентября – 2 октября 2014 года в г. Новосибирске.

Публикации

По результатам исследований опубликовано 7 печатных работ, в том числе 3 научных статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендованных изданий ВАК РФ; 4 статьи в сборниках международных и всероссийских конференций.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 114 наименований, списка сокращений и терминов, и одного приложения. Общий объем работы составляет 136 страниц, включая 29 таблиц и 26 рисунков.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю, заведующему кафедрой автоматизированных электроэнергетических систем (АЭЭС) НГТУ, д.т.н., профессору А.Г. Фишову за постоянную помощь в работе над диссертацией на всех этапах, к.т.н., доценту кафедры АЭЭС В.И. Бобрику за помощь в проведении экспериментальных исследований на физических моделях энергосистем, магистранту кафедры АЭЭС А.Л. Нагайцеву за помощь в реализации алгоритмов в прототипе автоматики, проведении экспериментальных исследований прототипа автоматики с устройством векторных измерений МИП-02 производства ЗАО «РТСофт» на ЭДМ.

ГЛАВА 1

УСТОЙЧИВОСТЬ НАГРУЗКИ. ИСТОРИЯ ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ

1.1. Заблаговременная оценка запаса статической устойчивости нагрузки, основанная на предположении об известности параметров схемы замещения нагрузки

Устойчивости узлов нагрузки посвящён ряд научных работ отечественных и зарубежных авторов, таких как: М.А. Андреев, В.А. Веников, Л.П. Веретенников, И.Н. Войтенков, В.Н. Гришин, Х.М. Гучапшев, П.С. Жданов, В.М. Завьялов, А.В. Иванов-Смоленский, В.Г. Каширских, Г.А. Мелешкин, А.В. Нестеровский, А.А. Пискунов, И.А. Сыромятников, С.А. Ульянов, Ш.Е. Штейнберг, F. Alonge, La.S. Barbera, P. Eykhoff, F. D'Ippolo, J. Liu, C. Moons, F.M. Raimondi, K. Spidi, Y. Wang, Le Kong Zan`.

Теоретические основы устойчивости нагрузки изложены в [1], где отмечается необходимость проверки в нормальном режиме системы при малых его возмущениях статической устойчивости синхронных двигателей, синхронных компенсаторов и больших групп асинхронных двигателей (АД), которые могут оказаться неустойчивыми, причём эта неустойчивость проявляется в виде специфического явления, называемого лавиной напряжения. Под малыми возмущениями в [1] понимаются воздействия технологических процессов, в которых участвуют двигатели, которые оказывают влияние на поведение собственно нагрузки, а также на работу других потребителей и режим системы. Например, мигание ламп при колебаниях напряжения в сети, порча продукции при изменении скорости двигателей во время изменения напряжения или частоты, снижение качества выдаваемой потребителям энергии при колебаниях напряжения и частоты в системе, вызванных толчками в нагрузке, содержащей мощные двигатели прокатных станов.

Как отмечается в [1], основную часть нагрузки (обычно от 50 до 80%) составляют АД, свойства которых существенно проявляются в характере переходных процессов всего узла системы. Для них, так же как и для синхронных двигателей, различают статические характеристики, т.е. зависимости тока I или вращающего момента M двигателя от медленно меняющегося скольжения его ротора s , и динамические характеристики – зависимости быстро меняющегося скольжения, напряжения и скорости их изменения от тока. Между тем, в [1] уточняется, что процессы при медленных отклонениях от установившегося состояния могут всегда рассматриваться только на основе статических характеристик. Для изучения же процессов при быстрых изменениях, т.е. «в динамике», должны применяться динамические характеристики. Однако в ряде случаев и при рассмотрении динамических процессов можно пользоваться квазидинамическими, а иногда и статическими характеристиками. Природа динамического момента в значительной мере определяется тем, что при достаточно быстром изменении скорости двигателя момент его не успевает принять значения, соответствующего статической механической характеристике, – статическая характеристика искажается. Однако, как доказывается в [1], во многих случаях данным искажением можно пренебречь, в частности – при больших маховых массах GD^2 и больших мощностях динамические характеристики ближе к статическим, т.е. эта разница тем меньше, чем больше мощность двигателя и чем тяжелее его ротор.

В дисциплинах электрических машин и электропривода обычно отмечают, что АД имеют большие запасы устойчивости и, поэтому, обеспечение статической устойчивости отдельных двигателей, входящих в нагрузку, не вызывают затруднений. Если запас устойчивости характеризовать отношением максимального вращающего момента к рабочему, то коэффициент запаса составит 1,5 – 1,7. Следовательно, даже значительные снижения напряжения на шинах двигателей не могут привести к нарушению их устойчивости. Однако это относится к единичному двигателю или группе

двигателей, питаемых от шин напряжения, значение которого не зависит от режима двигателя [1].

Если двигатель или группа двигателей питается от генератора или группы генераторов, заменённых эквивалентным генератором соизмеримой мощности, то напряжение на шинах двигателя зависит от режима двигателя (от его скольжения). Условия нарушения устойчивости (опрокидывания) двигателя получаются при этом существенно иными. В этом случае качественные изменения условий устойчивости обусловлены изменением количества двигателей, подключённых к узлу нагрузки. В принятой постановке задачи вся масса двигателей (эквивалентный двигатель), входящих в нагрузку, должна рассматриваться как единое целое, причём и параметры этих двигателей, и их рабочие режимы известны очень приближённо [1].

В комплексную нагрузку могут также входить и синхронные двигатели, и различного рода статические устройства, что ещё более осложняет задачу в отношении точности. Пытаться оперировать с параметрами отдельных двигателей и по ним отыскивать «эквивалентный», в таких условиях, очевидно, безнадежно, и решение задачи определения запаса статической устойчивости в [1] предложено проводить в два этапа.

1. Получение качественных характеристик и основных математических соотношений в предположении, что для эквивалентного (всей нагрузке) АД известны параметры схемы замещения. При этом, так как речь идёт о качественных – физических – характеристиках, необходимых для обоснования рабочей методики, грубость схемы замещения не может быть существенна.

2. Получение на основе характеристик нагрузки расчётной практической методики для выявления возможности появления лавины напряжения и оценки имеющегося запаса.

В схеме системы (рисунок 1.1, а), рассматриваемой в [1], сопротивление генератора x_G , сети x_C и эквивалентного двигателя, заменяющего все двигатели нагрузки x_S , соизмеримы по величине. Схема замещения

представляется так, как это показано на рисунке 1.1,б. Затем приближённо упрощается посредством переноса x_μ в точку 1, к месту приложения э.д.с. E (рисунок 1.1, в).

Ток, обусловленный э.д.с. в цепи 1 – 2 (рисунок 1.1, в):

$$I = E / \sqrt{x^2 + (R/s)^2}, \quad (1.1)$$

где $x = x_\Gamma + x_C + x_S$.

Далее в [1] предполагается, что механический момент сопротивления АД $M_{\text{МЕХ}}$ не зависит от угловой скорости, а также что в относительных единицах он численно (приближённо) равен потребляемой из сети мощности P :

$$M_{\text{МЕХ}} = M \approx P / (\omega_0 + \Delta\omega), \quad (1.2)$$

где $\omega_0 = 1$, $\Delta\omega \ll \omega_0$.

Далее в [1] следуют преобразования:

$$M \approx P = I^2 R/s = E^2 R s / [(x s)^2 + R^2] = \text{const}. \quad (1.3)$$

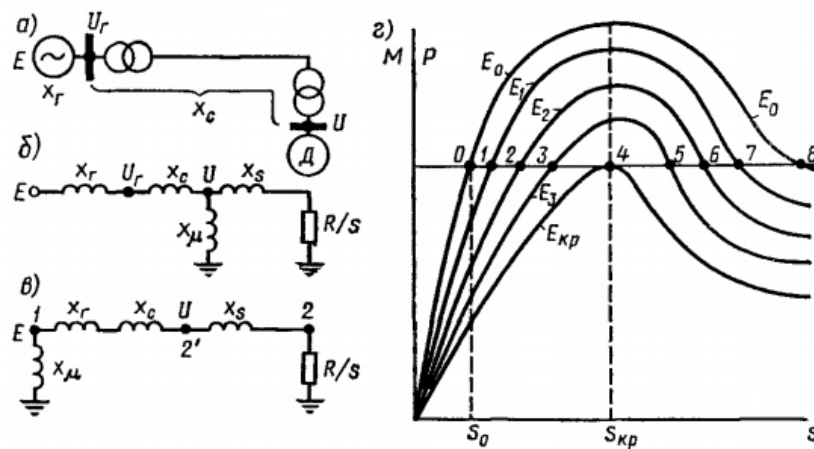


Рисунок 1.1. Схема замещения системы: а – схема системы; б – схема замещения; в – упрощенная схема замещения; г – характеристики

$$M = P = f(E_\Gamma, s)$$

Характеристики $P = f(E, s)$ построены на рисунке 1.1, г, где значение критического скольжения двигателя определяется из условия $dP/ds = 0$. Дифференцируя и приравнявая к нулю (1.3), в [1] получено:

$$E^2 R (R^2 - x^2 s_{\text{кр}}^2) / [R^2 + (x s_{\text{кр}})^2]^2 = 0, \quad (1.4)$$

откуда $s_{кр} = R/x$. Подставляя значение $s_{кр}$ в (1.3), в [1] находят значение P_m , отвечающее $s_{кр}$:

$$P_m = E^2 / (2x). \quad (1.5)$$

Напряжение на шинах нагрузки рассматриваемой группы АД, как отмечается в [1], не остаётся постоянным при изменении режима двигателей:

$$U = I \sqrt{x_s^2 + (R/s)^2} = E \sqrt{(x_s s)^2 + R^2} / \sqrt{(x_s)^2 + R^2}. \quad (1.6)$$

Реактивная мощность, потребляемая двигателями и сетью:

$$Q = Q_\mu + Q_S, \quad (1.7)$$

где $Q_\mu = E^2 / x_\mu$ – мощность, потребляемая ветвью намагничивания x_μ .

В ветви 1 – 2 мощность

$$Q_S = I^2 x = [I^2 R s / R s] x = P (s/R) x = P s / s_{кр}. \quad (1.8)$$

Таким образом, слагающая $Q_S \equiv s$ (при $P = const$, $s_{кр} = const$). Пользуясь характеристиками, показанными на рисунке 1.1, г, можно установить характер зависимости скольжения $s = f(E)$. Очевидно, что точки 0, 1, 2, 3 образуют ветвь характеристики, на которой величина s будет возрастать с уменьшением E , т.е. $ds/dE < 0$ (рисунок 1.2). Точка 4 на рисунке 1.1, г, где $dP/ds = 0$, даст на кривой $s = f(E)$ экстремум, в котором $ds/dE = -\infty$. Точки 5, 6, 7, 8 кривой $P = f(s)$ будут соответствовать ветви характеристики $s = f(E)$, где s будет возрастать с ростом E и $ds/dE > 0$ [1].

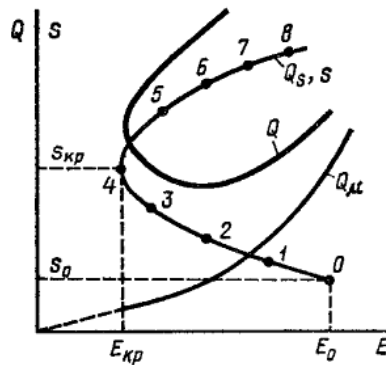


Рисунок 1.2. Изменение скольжения s и реактивной мощности Q при изменении э.д.с. E в схеме, представленной на рисунке 1.1

Согласно (1.8), величина $Q_s \equiv s$ и, следовательно, зависимость $Q_s = f(E)$ будет отличаться от $s = f(E)$ только масштабом. Зависимость $Q = Q_\mu + Q_s$ будет иметь экстремальное значение ($dQ/dE = -\infty$) при том же значении $E_{кр}$, что и $s = f(E)$, как это показано на рисунке 1.2. В точке 2' напряжение $U < E$ и, кроме того, U уменьшается с ростом скольжения. Однако если бы напряжение U было постоянным, то момент (мощность) двигателей был бы больше, чем при $E = const$. На рисунке 1.3 показаны примерные характеристики мощности (момента) при постоянстве различных напряжений и э.д.с. в схеме замещения [1]:

$$M_E = \frac{E^2}{2x}, \quad (1.9)$$

$$M_{U_\Gamma} = \frac{U_\Gamma^2}{2(x_C + x_s)}, \quad (1.10)$$

$$M_U = \frac{U^2}{2x_s}. \quad (1.11)$$

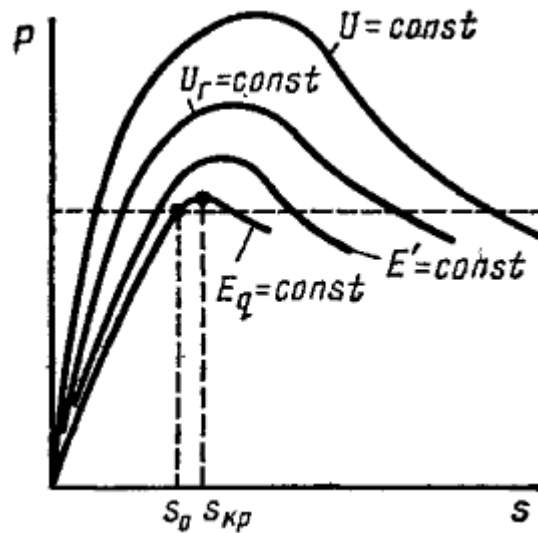


Рисунок 1.3. Характеристика мощности при поддержании постоянным напряжения и э.д.с. в различных точках схемы замещения

Здесь $M_U > M_{U_\Gamma} > M_E$, причём момент, определённый из условия постоянства E , больше момента, определённого из условия постоянства E_q :

$$(E')^2 / [2(x'_d + x_C + x_s)] > E_q^2 / (2x). \quad (1.12)$$

Полученные выражения являются приближёнными, отвечающими грубому преобразованию схемы, представленной на рисунке 1.1, б, в схему, представленную на рисунке 1.1, в. Однако это обстоятельство не меняет общих качественных закономерностей [1].

Здесь существенно, что критическое скольжение

$$s_{кр} = R/x = R/(x_\Gamma + x_C + x_s) \quad (1.13)$$

оказывается намного меньше, чем критическое скольжение, которое имел бы единичный АД, подключённый к шинам неизменного напряжения, т.е. если бы было $U = const$. В этом случае $s_{кр} = R/x_s$. Из соображений, высказанных относительно характеристик (рисунок 1.1), следует, что опрокидывание АД (или группы АД), питающегося от генератора соизмеримой мощности, может произойти при сравнительно небольших изменениях скольжения и снижения э.д.с., питающей эквивалентный двигатель, и, тем более, при небольших изменениях напряжения U , зависящего от режима двигателя (рисунок 1.3) [1].

Определение критических условий нельзя в этом случае проводить исходя из напряжения на зажимах двигателя, которое не является независимой переменной. Эти условия должны определяться исходя из той э.д.с. генератора E , которую в данной схеме можно считать не зависящей от изменений режима. Снижение э.д.с., особенно в зоне, где dQ/dE отрицательно, приводит к росту реактивной мощности Q , соответственному увеличению токов, потребляемых двигателями нагрузки, и увеличению потерь напряжения в питающей сети, а следовательно, способствует дальнейшему снижению напряжения [1].

Таким образом, вблизи режима опрокидывания двигателей процесс прогрессирующего снижения напряжения оказывается очень заметным. Персонал станции и системы не может судить непосредственно о росте токов роторов, статоров и скольжениях АД, входящих в состав комплексной нагрузки в то время, когда они приближаются к опрокидыванию. Персонал наблюдает только резкое, лавинообразное снижение напряжения. Процесс этот поэтому и

получил название лавины напряжения. Появлению лавины напряжения обычно предшествуют режимы при недостаточно высоком возбуждении генераторов или увеличении реактивных сопротивлений связи. Наблюдаемое при этом снижение Q , приходящей к потребителю, показывает, что причиной лавины напряжения является так называемый дефицит Q (генерируемая Q в системе меньше той, которая соответствует желательному уровню напряжения) [1].

Схема, изображенная на рисунке 1.1, а, могла бы отвечать и сложной системе с несколькими генераторами и нагрузками, если только в этой системе все генераторы можно заменить одним эквивалентным генератором с постоянной э. д. с. и объединить все нагрузки в один эквивалентный двигатель. Однако, как отмечается в [1], поскольку нагрузка ЭС обычно состоит из потребителей электрической энергии различного рода и АД составляют в ней только некоторую (хотя и значительную) долю, определить сколько-нибудь надежно параметры эквивалентного двигателя невозможно.

Целесообразным предлагается в [1] вместо критерия устойчивости $dP/ds = 0$ или эквивалентного ему критерия $dQ/dE_{\mathcal{E}} = -\infty$ пользоваться практическим критерием устойчивости нагрузки $dE_{\mathcal{E}}/dU = 0$, который не требует эквивалентирования двигателей нагрузки; при этом оперируют только с её внешними характеристиками $P_H = f(U)$; $Q_H = f(U)$. Смысл этого критерия пояснён на рисунке 1.4, где показано, что при снижении напряжения на шинах двигателя до значения $U_{кр}$, отвечающего границе устойчивого режима, производная от эквивалентной э.д.с. $E_{\mathcal{E}}$ по напряжению проходит через нуль. Таким образом, нарушение устойчивости связано с тремя соотношениями:

$$dQ/dE_{\mathcal{E}} = -\infty ; \quad (1.14)$$

$$dP/ds = 0 ; \quad (1.15)$$

$$dE_{\mathcal{E}}/dU = 0 . \quad (1.16)$$

В справедливости последнего критерия можно убедиться исходя из эквивалентной схемы замещения (рисунок 1.1, а), если напряжение на шинах комплексной нагрузки рассматривать как величину, зависящую от режима

двигателя, а эквивалентную э.д.с. $E = E_{\mathcal{D}}$ – как независимую переменную. При этом условии между напряжением на шинах двигателя и эквивалентной э.д.с. существует очевидное соотношение [1]

$$U = \sqrt{(E_{\mathcal{D}} - Q_{\mathcal{D}}x_{\mathcal{D}}/E_{\mathcal{D}})^2 + (Px_{\mathcal{D}}/E_{\mathcal{D}})^2} \approx E_{\mathcal{D}} - Q_{\mathcal{D}}x_{\mathcal{D}}/E_{\mathcal{D}}. \quad (1.17)$$

Здесь значения $Q_{\mathcal{D}}$ являются значениями внутренней реактивной мощности генератора. Далее в [1] выражение (1.17) дифференцируется по $E_{\mathcal{D}}$:

$$dU/dE_{\mathcal{D}} = 1 - (E_{\mathcal{D}} dQ_{\mathcal{D}}/dE_{\mathcal{D}} - Q_{\mathcal{D}})x_{\mathcal{D}}/E_{\mathcal{D}}^2. \quad (1.18)$$

Из соотношения (1.18) очевидно, что при $-dQ_{\mathcal{D}}/dE_{\mathcal{D}} \rightarrow \infty$ величина $dU/dE_{\mathcal{D}} \rightarrow \infty$ или $dE_{\mathcal{D}}/dU \rightarrow 0$. Таким образом, подтверждается равноценность критерия $dQ_{\mathcal{D}}/dE = -\infty$ критерию $dE/dU = 0$, а так как известно, что условие $dQ_{\mathcal{D}}/dE = -\infty$ равноценно $dP/ds = 0$, то доказана равноценность всех трёх критериев, показанных на рисунке 1.4 [1].

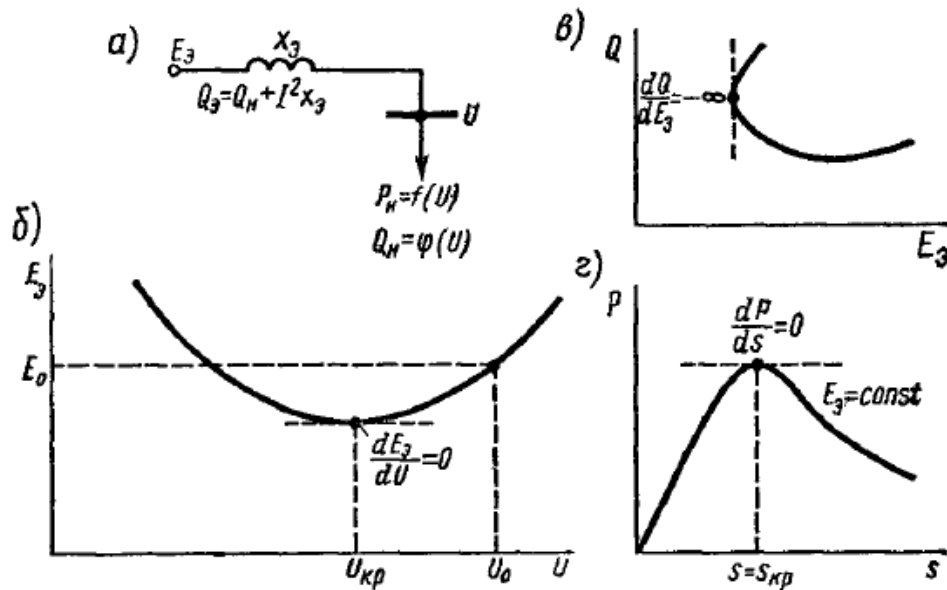


Рисунок 1.4. Критерии устойчивости нагрузки: а – схема замещения; б – зависимость $E_{\mathcal{D}} = \varphi(U)$; в – зависимость $Q = \varphi(E_{\mathcal{D}})$; г – зависимость $P = \varphi(s)$

В [1] отмечается также, что при расчётах устойчивости нагрузки в системе, имеющей нагрузку, сосредоточенную в узловой точке, удобно воспользоваться практическим критерием: $d\Delta Q/dU > 0$, тогда

$$\Delta Q = \sum Q_H - \sum Q_G. \quad (1.19)$$

Задаваясь напряжением на шинах U , можно построить характеристику мощности $\sum Q_G = f(U)$, притекающей в узловую точку, и характеристику суммарной мощности нагрузки $\sum Q_H = f(U)$ [1].

Разумеется, для схемы, представленной на рисунке 1.1, а, также можно применить критерий $d\Delta Q/dU > 0$, рассматривая любую точку схемы как узловую и строя зависимость подходящего к ней потока мощности $\sum Q_G$ и потока мощности, отходящего от неё в нагрузку. Именно построением характеристик $\Delta Q = f(U)$ можно наиболее просто и наглядно выявить факторы, благоприятно или отрицательно влияющие на устойчивость нагрузки [1].

Возникновение и характер протекания процесса нарушения устойчивости нагрузки показаны на рисунке 1.5, где видно влияние отключения части генераторов и форсировки возбуждения. При уменьшении сопротивления между генератором и двигателем, применении регуляторов возбуждения, обеспечивающих постоянство э.д.с. E'_q или постоянство напряжения на зажимах генератора, критическое напряжение $U_{кр}$ будет уменьшаться, стремясь к значению $U_{кр}$, определённому непосредственно на шинах АД [1].

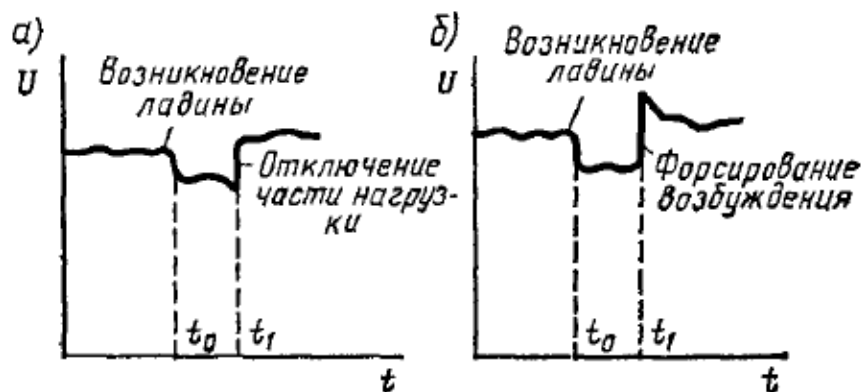


Рисунок 1.5. Борьба с лавиной напряжения:

а – отключение части нагрузки при возникновении лавины; б – форсирование возбуждения генераторов и синхронных компенсаторов

При рассмотрении лавины напряжения предполагалось, что тормозящиеся двигатели остаются подключенными к сети. Это возможно, если рассматривается небольшой промежуток времени. В зависимости от времени (быстроты) протекания процесса лавины напряжения, темпа его снижения, уставок максимально-токовых защит двигателей возможны случаи отключения двигателей от сети в процессе опрокидывания до их остановки или сразу же после остановки (при пониженном напряжении двигатель может быть сильно перегружен по току). Эти факторы могут существенно влиять на процесс нарушения устойчивости группы двигателей. Кроме того, имеется ряд причин, вызывающих самоотключение двигателей при снижении напряжения, безотносительно к тому, затормозились они или нет. Так как напряжения, при которых происходит самоотключение двигателей, близки значениям критического напряжения, то возможны любые сочетания опрокидывания и отключения двигателей. Признаком самоотключения двигателей без лавины напряжения является снижение и активной и реактивной нагрузок при понижении напряжения до $0,7 U_{ном}$ и ниже [1].

Наибольшая опасность нарушения устойчивости нагрузки может иметь место в случаях, когда нагрузка оказывается в электрическом центре качаний системы или вблизи от него. В связи с этим в [1] даётся понятие электрического центра. Во время качаний генераторов или во время асинхронного хода напряжения в различных точках электрических сетей и электропередач, связывающих эти генераторы, изменяются. При этом в каждой системе при данном ее исходном режиме существует точка, где напряжение оказывается минимальным. Эта точка называется электрическим центром системы.

Длительные медленные понижения напряжения в распределительных и питающих сетях, как отмечается в [1], приводят к ряду явлений, с которыми приходится считаться при анализе переходных процессов в системах электроснабжения. Так, понижение напряжения от U_0 до U_1 ведёт к снижению запаса статической устойчивости двигателей. У асинхронных двигателей запас

снижается от $K_{з1ac} = (P_{m1} - P_0)/P_0$ до $K_{з2ac} = (P_{m2} - P_{01})/P_{01}$, где P_0 не меняется при снижении напряжения.

Полагая, что $P = M$, в [1] принимают $P_{m1} \equiv U_0^2$; $P_{m2} \equiv U_1^2$.

Механический момент нагрузки $M_0 = P_0$ изменяется с изменением скольжения, которое, в свою очередь, зависит от напряжения. Значение P_0 может определяться согласно известному выражению

$$P_0 = c(1 - s_0)^q; P_{01} = c(1 - s_1)^q, \quad (1.20)$$

где c – постоянный коэффициент; s_0 и s_1 – скольжения в нормальном режиме и режиме сниженного напряжения; q – показатель, характеризующий вид статической характеристики [1].

Для любого режима двигателя существует соотношение

$$U^2 R_s / [R^2 + (xs)^2] = 2P_m s_{кр} s / [s^2 + s_{кр}^2] = c(1 - s)^q, \quad (1.21)$$

где $s_{кр}$ – критическое скольжение.

Следовательно, скольжение s_1 может быть найдено из соотношения

$$U_0^2 s_0 / [(1 - s_0)^q (s_{кр}^2 + s_0^2)] = U_1^2 s_1 / [(1 - s_1)^q (s_{кр}^2 + s_1^2)]. \quad (1.22)$$

Для определения s_1 в [1] преобразуется (1.22), и при $q=1$ получается уравнение вида

$$s_1^3 - s_1^2 + As_1 - B = 0. \quad (1.23)$$

Пусть, например, при напряжении U_0 имеются следующие данные: $s_0 = 4\%$; $q = 1$; $s_{кр} = 0,2$; $U_1 = 0,7U_0$. Из (1.22) получаем $A = 0,53$, $B = 0,04$. Решая (1.23), получаем $s_1 = 0,1$, т.е. 10%. Зная s_1 , можно найти $P_{01} = (0,9/0,96)P_0$ и далее определить коэффициент запаса $K_{з2}$ [1].

Рассматривая процессы в двигателях нагрузки при снижении напряжения, необходимо заметить, что происходящий при этом рост тока приводит к более интенсивному снижению напряжения в питающей сети, что, с одной стороны, неблагоприятно сказывается на работе всей системы, а с другой – приводит к увеличению нагрева оборудования. Особенно это относится к асинхронным

двигателям, у которых токи статора I_1 и ротора I_2 резко возрастают со снижением напряжения.

У асинхронного двигателя, как отмечается в [1], имеется только одна область устойчивой работы – область, лежащая между синхронной скоростью и скоростью, отвечающей критическому скольжению. Область между критическим скольжением и скольжением, равным единице, оказывается неустойчивой.

В нормальных условиях двигатель работает на устойчивой части характеристики (участок $0-s_{кр}$ на рисунке 1.6, а) при скольжении меньше критического. Однако при снижении напряжения или при увеличении механического вращающего момента двигатель может оказаться в критическом режиме (точка a_2). При дальнейшем снижении напряжения точка, характеризующая режим, перейдёт на спадающую часть характеристики (участок a_3a_4); двигатель будет тормозиться, ток и реактивная мощность (рисунок 1.9, б) будут резко расти, а затем двигатель остановится – «опрокинется» (точка a_5). При неизменном напряжении, равном критическому, процесс остановки идёт так, как это показано на рисунке 1.6, б, в. Обычно двигатели, подключенные к шинам напряжения, не зависящего от их режима, работают с большим запасом устойчивости. Их рабочее скольжение значительно меньше критического, а максимальный вращающий момент намного больше рабочего: $(1,5 \div 1,7)M_0$. В этих условиях отклонения напряжения на шинах единичного двигателя не опасны с точки зрения устойчивости двигателей и только очень большие снижения напряжения на их шинах (порядка 20-30%) приводят к опрокидыванию. При питании группы двигателей от источника соизмеримой мощности в результате лавины напряжения может произойти опрокидывание и при малых (2 – 3%) отклонениях напряжения [1].

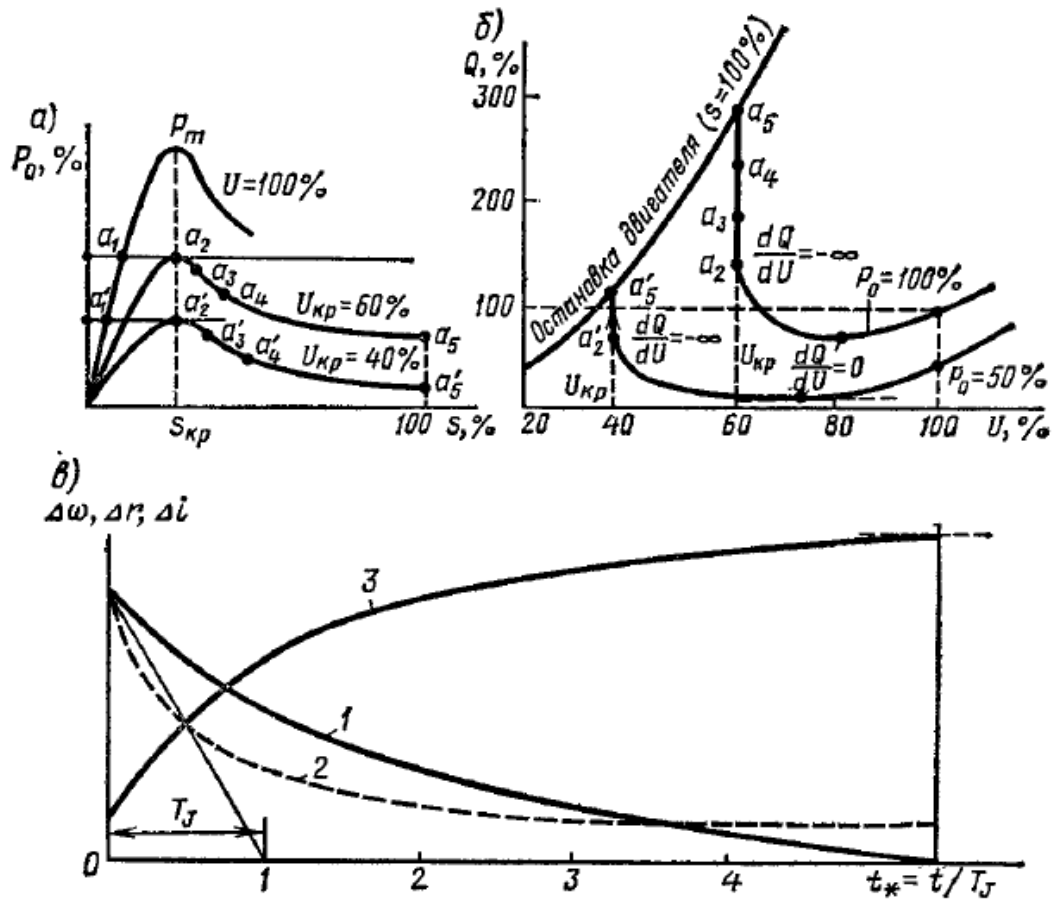


Рисунок 1.6. Характеристики асинхронного двигателя при различных значениях питающего напряжения, не зависящего от режима:

- а – характеристика $P_0 = f(s)$ при $P_0 = 100\%$ и $P_0 = 50\%$, когда напряжение не зависит от режима двигателя; б – характеристики $Q = \varphi(U)$ при $P_0 = 100\%$ и $P_0 = 50\%$, соответствующие характеристикам $P_0 = f(s)$; в – протекание процесса опрокидывания во времени; 1 – изменение частоты вращения $n/n_0 = f(t)$; 2 – изменение сопротивления; 3 – изменение тока

Изменение активной и реактивной мощностей при изменениях частоты подведённого напряжения влияет на условия опрокидывания двигателей. При неизменных напряжении и механическом моменте $M_{мех}$ на валу двигателя активная мощность, потребляемая двигателем, меняется пропорционально частоте согласно выражению $P = \omega M$. Снижение частоты приводит к уменьшению скольжения, которое можно найти качественно из выражения

$$M = U^2 R_2 s / \left\{ \left[R_2^2 + (x_{s0} \omega s / \omega_0)^2 \right] \omega \right\}, \quad (1.24)$$

где $x_{s0} = x_s$ при $\omega = \omega_0$ [1].

При $M = const$ можно грубо заменить зависимость $s = f(\omega)$ прямой, т.е. принять $s \equiv f$. Однако критическое скольжение при снижении частоты оказывается больше, так как $s_{кр} = R_2 \omega_0 / (\omega x_{s0})$. Это является благоприятным в смысле устойчивости фактором, тем более что и максимальное значение M несколько увеличивается [1].

Таким образом, в [1] предложена методика оценки запаса статической устойчивости асинхронной двигательной нагрузки, основанная, однако, на качественных физических характеристиках нагрузки в предположении, что для эквивалентного (всей нагрузке) асинхронного двигателя известны параметры схемы замещения. Практическое применение приведённой в [1] методики сопряжено с рядом трудностей и недостатков, такими как: отсутствие, как правило, информации о параметрах схемы замещения эквивалентной нагрузки в узле энергосистемы, изменяемость параметров схемы замещения нагрузки при изменении режима работы сети и, как следствие, невозможность адекватной оценки актуального существующему режиму запаса статической устойчивости нагрузки.

Исключение вышеперечисленных трудностей при оценке запаса статической устойчивости нагрузки стало возможным благодаря созданию системы мониторинга переходных режимов (СМПР), известной за рубежом как VAMS (Wide Area Measurement System), которое было инициировано ОАО «Системный оператор Единой энергетической системы» (ОАО «СО ЕЭС») в 2005 году в рамках проекта «Технико-экономическое обоснование: Синхронное объединение ЕЭС/ОЭС с УСТЕ». Суть СМПР заключается в использовании технологии векторных измерений, обеспечивающей регистрацию синхронизированных по времени измерений режимных параметров энергосистемы в однозначно определённые моменты времени благодаря привязке к глобальным навигационным спутниковым системам. Внедрение

технологии векторных измерений способствует повышению достоверности измерений, обеспечивает объективную оценку текущего состояния энергосистемы, по сравнению со стандартными современными системами мониторинга. Конечной целью внедрения системы мониторинга переходных режимов является снижение чрезмерных запасов устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС) и избыточности воздействия систем режимного и противоаварийного управления, снижающих эффективность ЭЭС. Основными научными задачами на пути достижения этой цели являются: исследование потенциала и возможностей применения технологии векторных измерений для мониторинга запасов устойчивости и допустимости режимов ЭЭС, исследование и разработка моделей и алгоритмов идентификации системных ограничений, а также постановка и решение задачи наблюдаемости применительно к системе мониторинга переходных режимов. Основными технологическими задачами являются: развитие структуры СМНР в соответствии с условиями наблюдаемости мониторинга переходных режимов, а также программное сопровождение СМНР. Развитию технологий векторной регистрации параметров режима в ЭЭС России посвящён ряд работ [2, 3, 4].

1.2. Теоретические основы идентификации параметров асинхронных машин

Развитие технологии векторных измерений послужило основой для исследований в области идентификации параметров расчётной схемы замещения ЭС для определения запасов её устойчивости в режиме реального времени. Так, в [5] изложены теоретические основы идентификации асинхронных электродвигателей, приведены основные термины и понятия.

Под *идентификацией* понимается определение структуры и параметров математической модели динамического объекта, которые обеспечивают наилучшую близость значений выходных величин модели и объекта по заданному критерию подобия при одних и тех же входных воздействиях.

В теории управления принято, что состояние объекта управления в каждый момент времени определяется некоторой совокупностью его координат (*вектор состояния*), в качестве которых могут быть использованы выходные и промежуточные переменные величины объекта и их производные, которые изменяются во времени в функции от входных воздействий. При знании структуры и значений параметров объекта управления вектор состояния вместе с входным сигналом полностью определяют его дальнейшее поведение. В реальных объектах, как отмечается в [5], обычно часть переменных состояния недоступна для измерения, поэтому приходится их вычислять.

Под *параметрической идентификацией* понимается определение параметров и переменных состояния математической модели при её известной структуре.

Под *параметрами* подразумеваются коэффициенты перед *зависимыми переменными* (токи и частота вращения ротора) в уравнениях электромеханического преобразования энергии: активные сопротивления, индуктивности, взаимные индуктивности обмоток и момент инерции ротора. *Независимыми переменными* при этом являются напряжения на обмотках и момент сопротивления на валу, а совокупность текущих значений выходных и промежуточных величин, которые недоступны непосредственному измерению (потокосцепления статора и ротора, электромагнитный момент и частота вращения ротора), будет определять его состояние.

Динамическая идентификация позволяет в реальном времени определять текущие значения параметров и состояние электродвигателя непосредственно в процессе его работы.

Под *режимом реального времени* понимается режим обработки информации, при котором обеспечивается взаимодействие системы обработки информации с внешними по отношению к ней процессами в темпе, соизмеримом со скоростью протекания этих процессов.

При значительном разнообразии существующих методов идентификации, динамическую идентификацию целесообразно проводить с помощью

пассивных методов, основанных на регистрации реально возникающих в объекте сигналов в режимах его рабочего функционирования с последующей статистической обработкой сигналов, которые в реальных условиях могут быть сильно зашумлены. Этим требованиям, как отмечается в [5], соответствует идентификация на основе методов оценивания, в которых задача оценивания рассматривается как задача стохастической оптимизации с минимизацией ошибки, полученной в результате оценивания.

Оцениванием в математической статистике принято называть обработку измеренных данных для уменьшения влияния случайных факторов (ошибок, погрешностей, шумов).

В [5] рассматриваются основные методы оценивания с позиций их требований к априорной информации о случайных составляющих процесса.

1. *Метод наименьших квадратов*. Не требуется никакой априорной информации.

2. *Марковские оценки (обобщённый метод наименьших квадратов)*. Необходимо знание ковариационной матрицы погрешностей измерения.

3. *Метод максимального правдоподобия*. Требуется знание совместных распределений вероятностей вектора выходных величин и оцениваемых параметров.

4. *Байесовские оценки*. Необходимо знание плотностей распределения вероятностей неизвестных параметров, совместной плотности распределения вероятности параметров и вектора выходных величин, а так же знание потерь, связанных с численной величиной оценки вектора параметров, при истинном значении этого вектора.

5. *Фильтр Калмана*. Требуется знание ковариационных матриц погрешностей измерения и возмущения.

Очевидно, что с рассмотренных позиций для идентификации электродвигателей, работающих в изменяющихся условиях со случайной резкопеременной нагрузкой, наиболее предпочтительным является *метод наименьших квадратов* (МНК), который позволяет решить задачу оценивания

параметров с минимизацией ошибки по среднеквадратичному критерию. Однако, как отмечается в [5], решение в этом случае возможно, если рассматриваемый процесс в электродвигателе может быть с достаточной точностью описан алгебраическими уравнениями.

Для анализа динамических процессов электромеханического преобразования энергии в настоящее время в основном применяется универсальная математическая модель на основе теории обобщённой электрической машины (ОЭМ), сочетающая в себе основные положения теории электромагнитного поля на основе уравнений Максвелла и теории цепей на основе уравнений Кирхгофа. С помощью ОЭС может быть получена математическая модель любой индуктивной электрической машины с круговым полем в воздушном зазоре. Математическая модель АД в комплексной форме, полученная на основе ОЭМ, имеет следующий вид [5]:

$$U_1 = I_1 R_1 + \dot{\Psi}_1 + j\omega_k \Psi_1, \quad (1.25)$$

$$0 = I_2 R_2 + \dot{\Psi}_2 + j(\omega_k - p\omega) \Psi_2, \quad (1.26)$$

$$M = pI_m (\Psi_1^* I_1), \quad (1.27)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} (M - M_C), \quad (1.28)$$

$$\Psi_1 = I_1 L_1 + I_2 L_m, \quad (1.29)$$

$$\Psi_2 = I_2 L_2 + I_1 L_m, \quad (1.30)$$

$$L_1 = L_m + L_{\sigma 1}, \quad (1.31)$$

$$L_2 = L_m + L_{\sigma 2}, \quad (1.32)$$

где $U_1, U_2, I_1, I_2, \Psi_1, \Psi_2$ – соответственно векторы напряжений, токов и потокосцеплений обмоток статора и ротора; ω_k, ω_r – угловые частоты вращения координатных осей и ротора; R_1, R_2, L_1, L_2 – активные сопротивления и индуктивности обмоток статора и ротора; L_m – индуктивность цепи намагничивания; $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; M – электромагнитный момент; M_C – момент сопротивления на валу; J – момент инерции ротора; p – число пар полюсов. Индекс 1 соответствует

принадлежности параметра или переменной к статору, а индекс 2 – к ротору. Индекс (*) показывает, что вектор является сопряжённым, а точка над переменной обозначает её производную. Обмотка ротора является приведённой к обмотке статора.

Данная математическая модель получена с учётом следующих допущений: 1) статор и ротор имеют симметричные обмотки; 2) сосредоточенные в пазах проводники с током заменяются синусоидальными токовыми слоями, эквивалентными по магнитодвижущей силе первым гармоникам соответствующих реальных обмоток; 3) неоднородность магнитной проводимости, обусловленная наличием пазов и неравномерностью воздушного зазора машины по расточке статора, не учитывается; 4) в магнитопроводе, имеющем очень высокую магнитную проницаемость, не учитываются гистерезис, насыщение и вихревые токи; 5) магнитное поле АД состоит из плоскопараллельного рабочего поля и полей рассеяния статора и ротора [5].

1.3. Опыт параметрической идентификации асинхронных машин

Математическая модель (1.25) – (1.32) используется в качестве базовой при идентификации параметров асинхронных двигателей в работах [6 – 10].

Так, в [6] используется модель:

$$\begin{cases} u_s(t) = R_s i_s(t) + L_s \frac{di_s(t)}{dt} + L_m \frac{di_r(t)}{dt}, \\ 0 = R_r i_r(t) + L_m \frac{di_s(t)}{dt} + L_r \frac{di_r(t)}{dt} - j\omega(t)L_m i_s(t) - j\omega(t)L_r i_r(t), \\ J(t) \frac{d\omega(t)}{dt} \cdot \frac{1}{p_\tau} = \frac{3}{2} p_\tau L_m I_m (i_s^*(t) \cdot i_r(t)) - M_c(t), \end{cases} \quad (1.33)$$

где R_s , R_r – сопротивления обмоток статора и ротора; L_s , L_r , L_m – индуктивности обмоток статора, ротора и индуктивность намагничивания; p_τ – число пар полюсов; $J(t)$ – момент инерции; $M_c(t)$ – момент сопротивления; $u_s(t)$ – напряжение питания; $i_s(t)$, $i_r(t)$ – токи статора и ротора.

Поскольку в [6] идентификация параметров асинхронной машины производится в установившемся режиме (на интервалах коммутации силовых ключей автономного инвертора), скорость вращения вала изменяется незначительно $\omega(t) = \omega = const$, поэтому третье уравнение системы (1.33) исключается из рассмотрения. Из системы исключается ненаблюдаемая переменная состояния $i_r(t)$, осуществляется разложение по ортогональным осям (α, β) , выполняется ряд промежуточных математических операций, позволяющих применить к системе преобразование Лапласа и получить выражение в операторной форме. В конечном счёте, операторные токи определяются по следующим формулам:

$$I_{s\alpha}(p) = \frac{-W_{21}(p)}{D(p)} \cdot U_1(p) + \frac{W_{11}(p)}{D(p)} \cdot U_2(p), \quad (1.34)$$

$$I_{s\beta}(p) = \frac{-W_{22}(p)}{D(p)} \cdot U_1(p) - \frac{W_{12}(p)}{D(p)} \cdot U_2(p), \quad (1.35)$$

$$D(p) = W_{11}(p) \cdot W_{22}(p) - W_{12}(p) \cdot W_{21}(p). \quad (1.36)$$

В качестве модели выбраны передаточные функции вида:

$$I_{s\alpha m}(p) = \frac{K_1 \cdot U_2 + K_2 \cdot U_1}{p(T \cdot p + 1)}, \quad (1.37)$$

$$I_{s\beta m}(p) = \frac{-K_2 \cdot U_2 + K_1 \cdot U_1}{p(T \cdot p + 1)}, \quad (1.38)$$

$$\text{где: } K_1 = \frac{R_r \cdot R_s \cdot L_m}{(R_r \cdot R_s)^2 - (\omega \cdot L_r \cdot R_s)^2}, \quad K_2 = \frac{\omega \cdot L_r \cdot R_s \cdot L_m}{(R_r \cdot R_s)^2 - (\omega \cdot L_r \cdot R_s)^2},$$

$$T = \frac{2 \cdot R_r \cdot R_s \cdot (L_r \cdot R_s + L_s \cdot R_r) - 2 \cdot \omega^2 \cdot L_r \cdot R_s \cdot (L_m^2 - L_r \cdot L_s)}{(R_r \cdot R_s)^2 - (\omega \cdot L_r \cdot R_s)^2}.$$

Найденные значения K_1 , K_2 и T являются функциями пяти физических параметров электродвигателя: R_s , R_r , L_s , L_r , L_m . Предложенный в [6] метод идентификации в реальном времени состоит в определении эквивалентной постоянной времени на основе анализа экспериментальной «трубки» тока. Процедурой, предваряющей идентификацию в реальном времени, является определение параметров классическими методами в процессе предварительной

идентификации. По изменению постоянной времени T в процессе работы однозначно может быть оценено изменение активных сопротивлений электропривода в функции температуры, то есть математически обоснованной является корреляция изменяющихся параметров в реальном времени.

Задача определения постоянной времени в [6] сводится к решению неоднородного линейного дифференциального уравнения для цепи постоянного тока при известных: напряжении, двух отсчётах времени (длительность интервала коммутации) и значениях тока в начале и в конце интервала коммутации. Для решения неоднородной задачи применён метод вариации постоянной с учётом неизменности напряжения на интервале коммутации. Решением уравнения является выражение:

$$T = \frac{t}{\ln\left(\frac{I_0 - K \cdot U}{I(t) - K \cdot U}\right)}, \quad (1.39)$$

где t – длительность интервала коммутации, I_0 – величина тока в начале интервала коммутации, $I(t)$ – величина тока в конце интервала коммутации, U – величина постоянного напряжения на интервале коммутации. Значение коэффициента K вычисляется по установившимся значениям тока и напряжения $K = I_{уст} / U_{уст}$.

Для определения постоянной времени T по выражению (1.39) в [6] предлагается использование процедуры сплайсинга, предполагающего исключение из кривой «трубки» тока, представляющей собой разрывную во времени кусочно-экспоненциальную функцию, интервалов времени, на которых значение тока уменьшается, и восстановление непрерывной экспоненциальной функции.

Таким образом, в [6] предлагается алгоритм для идентификации параметров асинхронной машины в режиме реального времени:

1. Фиксация и сохранение мгновенных значений токов и напряжений любой из фаз статора на нарастающем участке квазисинусоиды фазного тока;

2. Сплайсинг переходного процесса по сохранённым значениям «трубки» тока фазы статора;

3. Вычисление теоретического установившегося значения тока $I_{уст}$ фазы статора путём решения экстраполяционной задачи;

4. Вычисление коэффициента K и постоянной времени T при известных L_{ϑ} , $I_{уст}$, $U_{уст}$;

5. Вычисление величины текущего сопротивления фазы статора по двум выражениям: $R_{sr}^1 = \frac{1}{K}$, $R_{sr}^2 = \frac{L_{\vartheta}}{T}$.

6. Проверка совпадения вычисленных значений R_{sr}^1 и R_{sr}^2 с заранее заданной точностью (в случае существенной невязки повторное выполнение пункта 1);

7. Вычисление среднего значения R_{sr} при соблюдении требований точности и передача вычисленных значений R_{sr} и T на уровень системы управления.

Таким образом, в [6] подтверждена возможность параметрической идентификации асинхронных машин в реальном времени, однако среди недостатков предлагаемого алгоритма можно отметить:

1. Сложность математических преобразований (необходимость разложения исходной системы уравнений по ортогональным осям (α, β) , применение к системе преобразования Лапласа и переход к выражениям в операторной форме, применение процедуры сплайсинга) затрудняет процесс идентификации;

2. Предлагаемый алгоритм применим только при допущении, что скорость вращения вала изменяется незначительно $\omega(t) = \omega = const$, то есть в установившихся режимах работы. Данное обстоятельство не позволяет использовать алгоритм в аварийных режимах, представляющих наибольший интерес с точки зрения возможностей управления электродвигателем.

Ряд работ посвящён идентификации различных схем, динамических систем, идентификации в системах управления [13 – 17, 27 – 31, 80, 82 – 85, 89, 92 – 95, 113, 114], а также идентификации непосредственно асинхронных двигателей [18 – 26, 32 – 79, 81, 86 – 88, 90 – 91, 96 – 111].

В [105] изложен существующий метод управления режимами активно-адаптивных электрических сетей на основе моделирования и параметрической идентификации узлов нагрузки, отличающийся применением фазных координат и позволяющий решить задачу моделирования несинусоидальных режимов, возникающих при наличии частотно-регулируемых приводов.

1.4. Опыт определения критических напряжений узлов нагрузки в результате идентификации при мониторинге запасов статической устойчивости энергосистемы

Мониторингу запасов статической устойчивости энергосистемы с контролем напряжения на шинах нагрузки посвящена работа [11]. Контроль напряжения на шинах нагрузки в процессе утяжеления режима, как отмечается в [11], позволяет определить предельный режим энергосистемы не только по устойчивости параллельной работы электростанций, но и с учетом допустимого снижения напряжения в нагрузочных узлах. Для этого могут быть использованы коэффициенты передачи напряжения. Идентификацию коэффициентов передачи напряжения от генераторных узлов к нагрузочным также можно выполнить, используя информацию СМНР, при этом регистраторы переходных процессов необходимо установить не только на шинах станций, но и на узловых подстанциях энергосистемы, представляющих интерес с точки зрения устойчивости нагрузки.

В общем случае, когда в схеме действует несколько источников ЭДС, под коэффициентами передачи напряжения в [11] понимаются коэффициенты пропорциональности между напряжением в узле нагрузки и ЭДС генераторов. Основное допущение, принимаемое в [11] при идентификации коэффициентов

передачи напряжения, – представление нагрузки в виде постоянной проводимости, что обеспечивает линейность модели электрической сети. Линейная аппроксимация характеристик электрической сети позволяет использовать принцип наложения для определения напряжения в узле нагрузки:

$$\dot{U}_H = \dot{E}_1 k_1 + \dot{E}_2 k_2 + \dots + \dot{E}_i k_i + \dots + \dot{E}_n k_n = \sum_{i=1}^n \dot{E}_i k_i, \quad (1.40)$$

где \dot{U}_H – вектор напряжения на нагрузке, \dot{E}_i – вектор ЭДС i -го генератора, k_i – коэффициент передачи напряжения от i -го генераторного узла, в котором приложена ЭДС \dot{E}_i , к узлу нагрузки. Коэффициент передачи напряжения для i -го генераторного узла численно равен отношению взаимной проводимости между рассматриваемым генераторным узлом и узлом нагрузки Y_{iH} к собственной проводимости нагрузочного узла Y_{HH} :

$$k_i = \frac{Y_{iH}}{Y_{HH}}, \quad (1.41)$$

причём

$$Y_{HH} = Y_H + \sum_{i=1}^n Y_{iH}. \quad (1.42)$$

Таким образом, коэффициент передачи напряжения представляет собой комплексную величину: $k_i = k'_i + jk''_i$. Также (1.40) можно переписать в виде:

$$U'_H + jU''_H = \sum_{i=1}^n (E'_i + jE''_i)(k'_i + jk''_i). \quad (1.43)$$

В результате разделения мнимых и действительных частей уравнения (1.43), в [11] получают уравнения:

$$\begin{aligned} U'_H &= \sum_{i=1}^n (E'_i k'_i - E''_i k''_i), \\ U''_H &= \sum_{i=1}^n (E''_i k'_i + E'_i k''_i). \end{aligned} \quad (1.44)$$

Идентификация коэффициентов передачи напряжения в схеме с числом источников ЭДС равным n может быть выполнена на основе уравнений (1.44), которые необходимо записать для n временных срезов режимных параметров:

$$\begin{bmatrix} U_H^{(1)'} \\ U_H^{(1)''} \\ \vdots \\ U_H^{(n)'} \\ U_H^{(n)''} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1^{(1)'} & -E_1^{(1)''} & \dots & E_n^{(1)'} & -E_n^{(1)''} \\ E_1^{(1)''} & E_1^{(1)'} & \dots & E_n^{(1)''} & E_n^{(1)'} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ E_1^{(n)'} & -E_1^{(n)''} & \dots & E_n^{(n)'} & -E_n^{(n)''} \\ E_1^{(n)''} & E_1^{(n)'} & \dots & E_n^{(n)''} & E_n^{(n)'} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1' \\ k_1'' \\ \vdots \\ k_n' \\ k_n'' \end{bmatrix}, \quad (1.45)$$

где верхний индекс для напряжения и ЭДС соответствует номеру среза режимных параметров, а нижний индекс для ЭДС и коэффициентов передачи – номеру генератора.

В [11] отмечается, что для идентификации коэффициентов передачи напряжения необходимо выполнять регистрацию следующих режимных параметров энергосистемы:

- в генераторных узлах – модуль и фазу напряжения, активную и реактивную мощности, выдаваемые генератором, которые будут использованы для расчёта модуля и фазы вектора ЭДС генератора;
- в нагрузочных узлах и на ШБМ достаточно контролировать модуль и фазу напряжения.

Проверка адекватности линейной аппроксимации характеристик электрической сети для контроля напряжения в узле нагрузки, а также оценка погрешности идентификации коэффициентов передачи напряжения и косвенного расчёта напряжения в узле нагрузки через них, производится в работе [11] экспериментально. Расчёт переходных процессов для простейшей 3-узловой энергосистемы (генератор – узел нагрузки – ШБМ) производится в промышленной программе для расчёта электромеханических переходных процессов с учётом различных моделей нагрузки:

- представление нагрузки в виде постоянной проводимости,
- моделирование нагрузки с учётом средних статических характеристик нагрузки (СХН) по напряжению для комплексного состава нагрузки,

- моделирование нагрузки с учётом динамических характеристик нагрузки (ДХН), т.е. динамическая часть нагрузки представлена в виде обобщённого асинхронного двигателя, а статическая часть нагрузки, для которой зависимость активной мощности от напряжения близка к квадратичной, представлена постоянной проводимостью.

В работе [11] отмечается, что для определения оптимального интервала времени на выполнение идентификации коэффициентов передачи напряжения, необходимо рассмотреть поведение нагрузки на всём протяжении переходного процесса с учётом СХН и ДХН, поскольку, как известно, при самом переходном процессе, сопровождающемся глубоким снижением напряжения и существенным изменением скольжения асинхронных двигателей, следует учитывать ДХН, тогда как СХН наиболее правильно отражают изменение мощности нагрузки при различных уровнях напряжения в режимах, устанавливающихся в конце переходного процесса. По полученным в [11] графикам переходных процессов сделан вывод, что для всех рассмотренных способов представления нагрузки можно выделить интервал времени, для которого характерна стабильность значений коэффициентов передачи напряжения – этот интервал времени соответствует так называемому окну идентификации и составляет около 2 – 3 секунд. Также в [11] отмечено, что в начале переходного процесса, когда становится существенным влияние факторов, зависящих от скорости протекания процесса, и в конце переходного процесса, когда изменения режимных параметров, входящих в систему уравнений (1.45), становятся незначимыми и матрица значений ЭДС генераторов вырождается, стабильность в определении коэффициентов передачи напряжения отсутствует. Кроме того, внутри окна идентификации периодически возникают «всплески» значений коэффициентов, что связано с периодическим уменьшением скорости переходного процесса, при котором изменение режимных параметров незначительно.

Результаты произведённого в [11] расчётного эксперимента показали, что среднеквадратическое отклонение полученных в результате идентификации

коэффициентов передачи напряжения (их среднеарифметических значений) при различном представлении нагрузки от значений коэффициентов напряжения, рассчитанных через СВП нагрузочного узла по формулам (1.41) и (1.42), составляет:

- при представлении нагрузки в виде постоянной проводимости – не более 5,5%,
- при представлении нагрузки с учётом СХН – не более 7,47%,
- при представлении нагрузки с учётом ДХН – не более 10,17%.

Результаты произведённого в [11] расчётногo эксперимента также показали, что относительная погрешность определения модуля напряжения на нагрузке, найденного через коэффициенты передачи напряжения при различном представлении нагрузки от значений напряжения на нагрузке, полученных в результате расчёта на промышленной программе для расчёта электромеханических переходных процессов, составляет:

- при представлении нагрузки в виде постоянной проводимости – не более 2,24%,
- при представлении нагрузки с учётом СХН – не более 1,31%,
- при представлении нагрузки с учётом ДХН – не более 1,53%.

Таким образом, в результате проведённых исследований в [11] делается вывод, что представление нагрузки постоянной проводимостью, принятое для идентификации коэффициентов передачи напряжения, достаточно хорошо согласуется с моделями нагрузки, учитывающими СХН и ДХН, и может быть использовано для косвенного контроля напряжения на нагрузке. При этом идентификация коэффициентов передачи напряжения может производиться совместно с процедурой идентификации матрицы СВП ЭДС генераторов. Это позволит осуществить мониторинг запасов статической устойчивости энергосистемы с учётом локальных ограничений по устойчивости узлов нагрузки и допустимости напряжения. Между тем, в [11] отмечено, что косвенный контроль напряжения с использованием коэффициентов передачи напряжения имеет следующие составляющие погрешности: 1) модельная

погрешность, которая связана с использованием линейной аппроксимации реальных процессов, происходящих в энергосистеме; 2) погрешность идентификации коэффициентов передачи, связанная с вырождением матрицы СВП ЭДС, используемой для идентификации, при малом изменении режимных параметров; 3) измерительная погрешность и погрешность синхронизации, связанная с реализацией предлагаемой процедуры идентификации на базе регистраторов СМПР.

Существуют узлы нагрузки в энергосистеме, доля двигательной нагрузки в которых велика, и влияние её на напряжение узла в переходном процессе и послеаварийном режиме значительно. Такими узлами, в частности, могут быть узлы промышленной нагрузки, нарушение устойчивости которых влечёт за собой нарушение сложных технологических процессов и серьёзные потери для собственника, потребителей и энергосистемы. Для таких узлов представление их нагрузки постоянной проводимостью не отражает адекватным образом физических процессов, свойственных двигательной нагрузке, и может внести значительную погрешность в результаты идентификации и определения предела статической устойчивости с учётом напряжения на шинах нагрузки. Работа [12] посвящена идентификации параметров схемы замещения нагрузки по данным СМПР и определению критических напряжений. Модель нагрузки в [12] представлена уравнениями асинхронного двигателя и имеет следующие допущения:

1) не учитываются электромагнитные переходные процессы. При этом асинхронный момент зависит от величины модуля напряжения и величины скольжения s , но не зависит от величины ds/dt ,

2) уравнение АД соответствует Г-образной схеме замещения (рисунок 1.7, а) без учёта активного сопротивления цепи статора. Вытеснение тока в роторе и насыщение главной магнитной цепи описываются упрощенно.

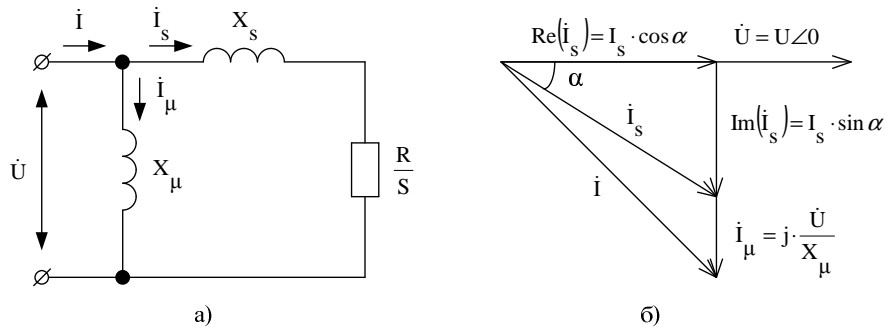


Рисунок 1.7. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) асинхронной двигательной нагрузки

Для приведённой на рисунке 1.7 схемы замещения и векторной диаграммы асинхронного двигателя справедливы следующие выражения:

$$P = I_S^2 \cdot R/S = \left(\frac{U}{\sqrt{(R/S)^2 + X_S^2}} \right)^2 \cdot R/S = \frac{U^2 \cdot R/S}{(R/S)^2 + X_S^2}, \quad (1.46)$$

$$I = \sqrt{P^2 + Q^2} / \sqrt{3} \cdot U = \sqrt{(I_S \cdot \cos \alpha)^2 + (I_S \cdot \sin \alpha + I_\mu)^2} = \sqrt{\left(\frac{U}{\sqrt{(R/S)^2 + X_S^2}} \cdot \cos \left(\arctg \frac{X_S}{R/S} \right) \right)^2 + \left(\frac{U}{\sqrt{(R/S)^2 + X_S^2}} \cdot \sin \left(\arctg \frac{X_S}{R/S} \right) + \frac{U}{X_\mu} \right)^2}. \quad (1.47)$$

После преобразований выражений (1.46) и (1.47), в [12] получается система уравнений:

$$\begin{cases} P_i = \frac{U_i^2 \cdot R/S_i}{(R/S_i)^2 + X_S^2}, \\ \frac{\sqrt{P_i^2 + Q_i^2}}{\sqrt{3} \cdot U_i} = \sqrt{\left(\frac{U_i}{\sqrt{(R/S_i)^2 + X_S^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{X_S}{R/S_i} \right)^2}} \right)^2 + \left(\frac{U_i}{\sqrt{(R/S_i)^2 + X_S^2}} \cdot \frac{X_S}{R/S_i} + \frac{U_i}{X_\mu} \right)^2}. \end{cases} \quad (1.48)$$

На рисунке 1.7 и в формулах (1.46), (1.47), (1.48) подлежащими идентификации параметрами схемы замещения нагрузки являются R – активное сопротивление асинхронного двигателя, X_S – сопротивление рассеивания асинхронного двигателя, X_μ – сопротивление намагничивания асинхронного двигателя, S_i – текущее значение скольжения асинхронного

двигателя в момент времени i интервала идентификации. Идентификация производится на основе данных СМНР – активной мощности нагрузки P_i , реактивной мощности нагрузки Q_i , и модуля напряжения на шинах нагрузки U_i .

Система уравнений (1.48) решается в [12] с использованием нескольких замеров режимных параметров нагрузки таким образом, чтобы число уравнений в системе было равно числу неизвестных в ней. Далее, по известным формулам определяется критическое скольжение $S_{\text{кр}}$ и критическое напряжение $U_{\text{кр}}$ двигательной нагрузки:

$$S_{\text{кр}} = \frac{R}{X_S}, \quad (1.49)$$

$$U_{\text{кр}} = \sqrt{P \cdot S_{\text{кр}} \cdot \frac{(R/S_{\text{кр}})^2 + X_S^2}{R}}. \quad (1.50)$$

Предложенный в [12] алгоритм подтверждает возможность идентификации параметров схемы замещения двигателей и критических напряжений на их основе. Однако, представление нагрузки только лишь Г-образной схемой замещения асинхронного двигателя весьма спорно с точки зрения соответствия реальному составу нагрузки, который, как известно, в большинстве случаев является комплексным и содержит как двигательную, так и статическую нагрузку. Кроме того, решение переопределённой системы уравнений (1.48) возможно позволило бы получить более точный результат идентификации, чем при решении системы уравнений (1.48) с числом уравнений равным числу неизвестных.

Предложенный в [12] алгоритм позволяет производить идентификацию параметров схемы замещения двигателей и критических напряжений на их основе в случае, когда измерения режимных параметров – активной мощности нагрузки P_i , реактивной мощности нагрузки Q_i , и модуля напряжения U_i – производятся непосредственно на шинах нагрузки. Эта ситуация характерна для потребителя, заинтересованного в устойчивости своей нагрузки для стабильной работы технологических процессов. Мониторинг режимных параметров и определение актуального критического напряжения могут быть

организованы непосредственно в зоне эксплуатационной принадлежности потребителя – на шинах нагрузки. Однако, в устойчивой работе нагрузочных узлов заинтересованы также диспетчерские и сетевые организации, осуществляющие мониторинг режимных параметров в центрах питания (ЦП) нагрузки. В этом случае измерения режимных параметров будут производиться в ЦП нагрузки, и для определения её критического напряжения потребуется идентификация не только параметров схемы замещения нагрузки, но также и электрической сети, соединяющей ЦП с шинами нагрузки.

Таким образом, предложенный в [12] алгоритм идентификации параметров схемы замещения двигателей и критических напряжений на их основе требует дальнейших исследований и доработок в направлении повышения точности и адекватности разработанной модели.

ВЫВОДЫ

Разработка методов определения запасов статической устойчивости нагрузки долгое время осуществлялась в направлении заблаговременной оценки предельных режимных параметров нагрузки на основе её качественных физических характеристик в предположении, что известны параметры схемы замещения для эквивалентного (всей нагрузке) АД. Практическое применение подобных методов сопряжено с рядом недостатков, таких как: отсутствие, как правило, информации о параметрах схемы замещения эквивалентной нагрузки в узле ЭС, их изменяемость при изменении режима работы сети и, как следствие, невозможность адекватной оценки актуального существующему режиму запаса статической устойчивости нагрузки.

В контексте стремительно развивающихся в России и в мире технологий СМНР, развитие которых обусловлено постоянно усиливающимися требованиями к эффективности работы энергосистемы, проведены исследования в области идентификации схемы замещения нагрузки и определения предела её устойчивости. Однако, данное направление в настоящий момент остаётся недостаточно развитым, при всей своей важности и актуальности, которая постоянно возрастает по мере увеличения ответственности и усложнения технологических процессов в металлургической, нефтегазовой и других отраслях промышленности, в которых нарушение устойчивости нагрузки может повлечь за собой тяжёлые последствия и убытки. Разработке методов и алгоритмов определения устойчивости нагрузки в режиме реального времени и их внедрению на практике следует уделить особое внимание – данные технологии представляют интерес для широкого круга субъектов энергосистемы.

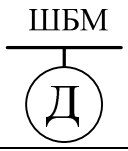
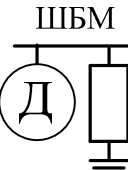
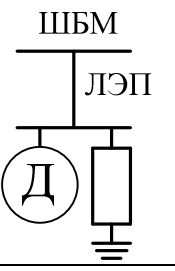
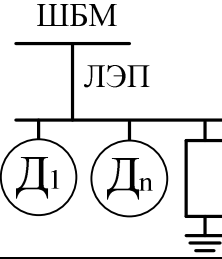
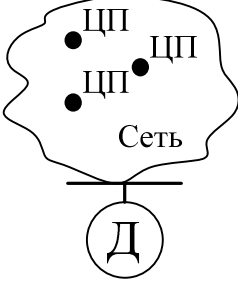
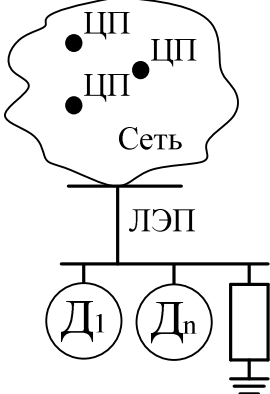
Алгоритмы идентификации схемы замещения нагрузки и определения её критических параметров могут стать частью глобальных алгоритмов управления режимами энергосистемы, повышая их точность и эффективность.

ГЛАВА 2
РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ, МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УЗЛОВ
ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

**2.1. Определение критических параметров на шинах комплексной
нагрузки в режиме реального времени**

Критические режимные параметры асинхронных двигателей, работающих в ЭС, определяются как их собственными характеристиками, так и характеристиками электрической сети, составом нагрузок в узле. Всё многообразие ситуаций может быть представлено следующим образом (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Возможные схемные ситуации асинхронных двигателей, работающих в ЭС

№	Схема	Особенности	Параметры, определяющие критические параметры АД (узла нагрузки)
1		Двигатель подключён к ШБМ	$S_{\text{КР}} = f(R, X_S),$ $U_{\text{КР}} = f(R, X_S)$
2		Комплексная нагрузка (АД и прочая нагрузка, представленная шунтом) подключёна к ШБМ	$S_{\text{КР}} = f(R, X_S),$ $U_{\text{КР}} = f(R, X_S)$
3		Комплексная нагрузка (АД и прочая нагрузка, представленная шунтом) подключёна к ШБМ через внешнее сопротивление (ЛЭП)	$S_{\text{КР}} = f(R, X_S, R_L, X_L, R_{\text{СТ}}, X_{\text{СТ}}),$ $U_{\text{КР}} = f(R, X_S, R_L, X_L, R_{\text{СТ}}, X_{\text{СТ}})$
4		Комплексная нагрузка (группа АД и прочая нагрузка, представленная шунтом) подключёна к ШБМ через внешнее сопротивление (ЛЭП)	$S_{\text{КР}} = f(Z_{\text{ДВЭКВ}}, R_L, X_L, R_{\text{СТ}}, X_{\text{СТ}}),$ $U_{\text{КР}} = f(Z_{\text{ДВЭКВ}}, R_L, X_L, R_{\text{СТ}}, X_{\text{СТ}})$
5		Двигатель подключён к виртуальному ЦП (сети, имеющей сложную конфигурацию)	$S_{\text{КР}} = f(R, X_S, Z_{\text{ЛЭКВ}}),$ $U_{\text{КР}} = f(R, X_S, Z_{\text{ЛЭКВ}})$
6		Комплексная нагрузка (группа АД и прочая нагрузка, представленная шунтом) подключёна к виртуальному ЦП (сети, имеющей сложную конфигурацию) через внешнее сопротивление (ЛЭП)	$S_{\text{КР}} = f(Z_{\text{ДВЭКВ}}, Z_{\text{ЛЭКВ}}, R_{\text{СТ}}, X_{\text{СТ}}),$ $U_{\text{КР}} = f(Z_{\text{ДВЭКВ}}, Z_{\text{ЛЭКВ}}, R_{\text{СТ}}, X_{\text{СТ}})$

Для комплексной нагрузки, состоящей из асинхронного двигателя и статической нагрузки (схема №2 таблица 2.1), рассматривается схема замещения (рисунок 2.1) и система уравнений (2.1).

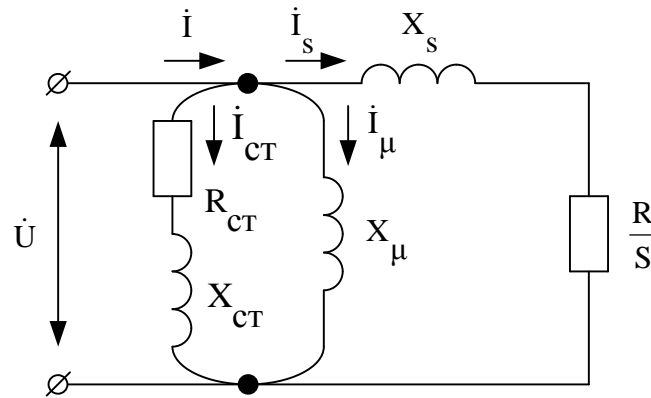


Рисунок 2.1. Схема замещения комплексной нагрузки, состоящей из асинхронного двигателя и статической нагрузки

$$\begin{cases} P_{\text{нагр.}i} = I_{S_i}^2 R/S_i + I_{ct_i}^2 R_{ct} = \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{(R/S_i)^2 + X_S^2}} \right)^2 R/S_i + \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{R_{ct}^2 + X_{ct}^2}} \right)^2 R_{ct}, \\ Q_{\text{нагр.}i} = I_{S_i}^2 X_S + I_{ct_i}^2 X_{ct} + I_{\mu_i}^2 X_{\mu} = \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{(R/S_i)^2 + X_S^2}} \right)^2 X_S + \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{R_{ct}^2 + X_{ct}^2}} \right)^2 X_{ct} + \frac{U_{\text{нагр.}i}^2}{X_{\mu}}. \end{cases} \quad (2.1)$$

$i=1 \dots n$.

В системе уравнений (2.1) по результатам измерений известными являются 3 режимных параметра:

P_i , Q_i – активная и реактивная мощность, потребляемая комплексной нагрузкой из сети в i -ом режиме её работы,

$U_{\text{нагр}i}$ – напряжение на шинах комплексной нагрузки в i -ом режиме её работы.

Неизвестными в системе уравнений (2.1) являются 6 параметров:

R – активное сопротивление асинхронного двигателя,

X_S – индуктивное сопротивление рассеивания асинхронного двигателя,

X_{μ} – индуктивное сопротивление намагничивания АД,

R_{ct} – активное сопротивление статической нагрузки,

$X_{ст}$ – индуктивное сопротивление статической нагрузки,

S_i – значение скольжения ротора асинхронного двигателя в i -ом режиме его работы (число неизвестных S_i соответствует числу независимых режимов двигателя n).

Для определения неизвестных параметров необходимо выполнить комплектные измерения режимных параметров нагрузки ($P_i, Q_i, U_{нагр.i}$) для ряда моментов времени $t_1...t_i$ в независимых режимах (при значимых изменениях режимных параметров). Требуемое число комплектных измерений i определяется как минимум условием равенства в системе уравнений (2.1) количества уравнений количеству искомых величин, то есть, для определения $5+1*n$ неизвестных необходимо выполнить 5 комплектных измерений с независимыми уравнениями, что позволит составить систему из 10 уравнений. Для получения однозначного решения системы уравнений (2.1) численным способом достаточное число комплектных измерений n , как правило, превышает необходимое (т.е. должна решаться переопределенная система уравнений). Для решения может быть использована любая программная среда, обладающая алгоритмами численного решения (например, программная среда Mathcad).

В результате решения системы уравнений (2.1), определяются параметры схемы замещения комплексной нагрузки, на основании которых по известным формулам вычисляются актуальные значения критических параметров и запасов устойчивости комплексной нагрузки в режиме реального времени.

Критическое скольжение АД:

$$S_{кр} = R/X_S, \quad (2.2)$$

критический ток:

$$I_{кр.нагр.} = \frac{U_{нагр.i}}{\sqrt{R/S_{кр}^2 + X_S^2}}, \quad (2.3)$$

критическая мощность АД:

$$P_{кр.нагр.} = I_{кр.нагр.}^2 \cdot R/S_{кр}, \quad (2.4)$$

критическое напряжение АД:

$$U_{\text{КР.НАГР.}} = I_{\text{КР.НАГР.}} \cdot \sqrt{(R/S_{\text{КР}})^2 + X_S^2}. \quad (2.5)$$

Определяются предельное напряжение на шинах двигателя и предельная мощность двигателя с учетом заданных коэффициентов запаса:

$$U_{\text{ПР.НАГР.}} = (1 + K_{\text{зан}}^U) \cdot U_{\text{КР.НАГР.}}, \quad (2.6)$$

$$P_{\text{ПР.НАГР.}} = \frac{P_{\text{КР.НАГР.}}}{1 + K_{\text{зан}}^P}. \quad (2.7)$$

На рисунке 2.2 представлен алгоритм предлагаемого способа.

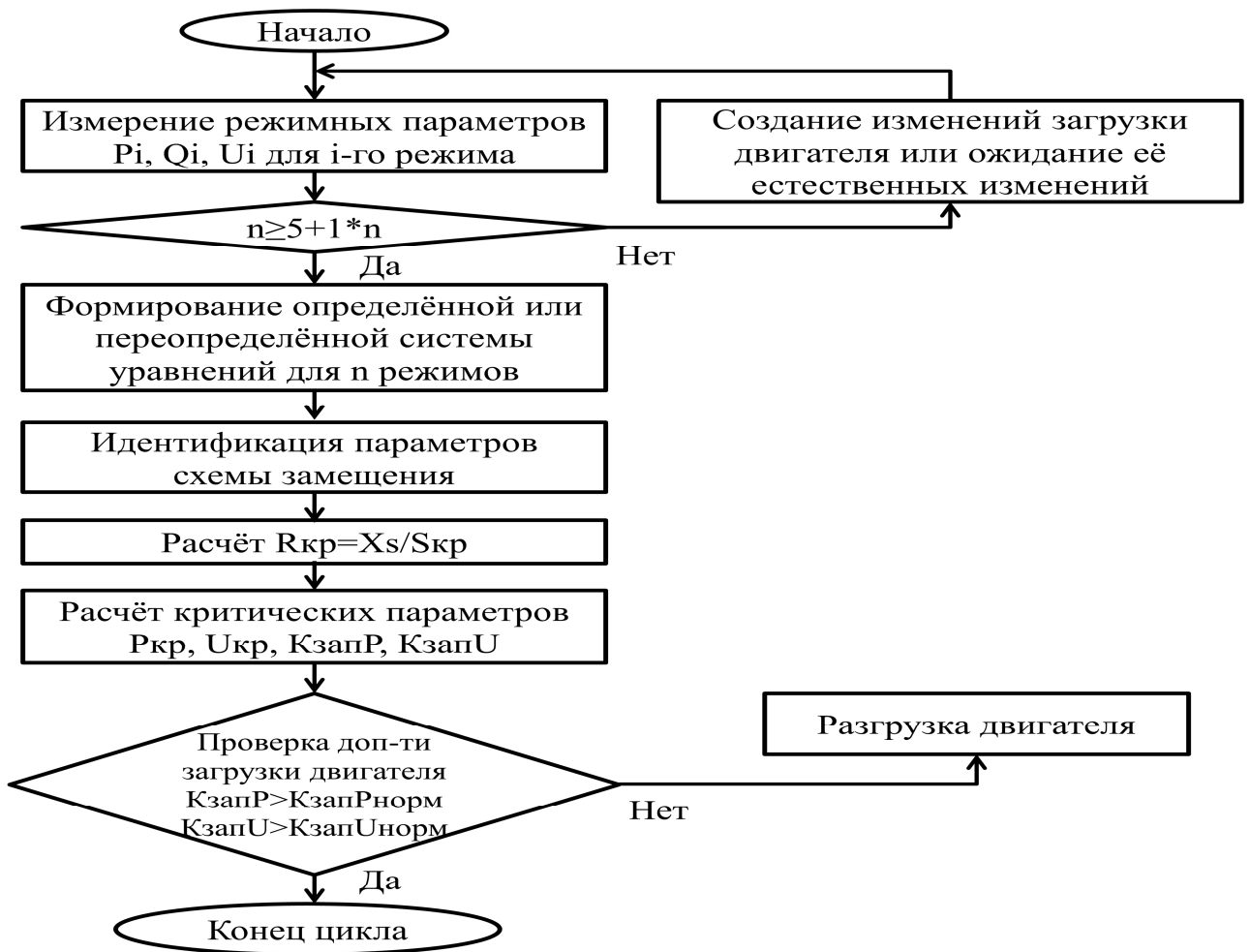


Рисунок 2.2. Алгоритм способа контроля критических параметров и запасов устойчивости для узла комплексной нагрузки с питанием от шин конечной мощности

Вышеприведённая модель и алгоритм нахождения критических параметров удобны для использования в случае, когда регистрация (измерение)

режимных параметров и контроль критических параметров производится на шинах комплексной нагрузки. Этот случай отражает ситуацию, характерную для потребителя, заинтересованного в получении информации о предельных параметрах статической устойчивости своей нагрузки (промышленное производство, содержащие ответственные технологические процессы и пр.).

2.2. Определение критических параметров центра питания комплексной нагрузки в режиме реального времени

В случае питания узла нагрузки от ШБМ (мощного центра питания (ЦП)) через дополнительное сопротивление идентификация параметров схемы замещения и расчёт критических параметров несколько усложняются (схема №3 таблица 1). В системе уравнений (2.8) дополнительными неизвестными параметрами, помимо неизвестных системы (2.1), являются R_L и X_L – активное и реактивное, соответственно, сопротивление реальной или эквивалентной линии, соединяющей шины нагрузки с центром питания. ЦП может быть физический (при известной конфигурации внешней сети) или виртуальный (при неизвестной конфигурации внешней сети). В случае физического ЦП, комплектные измерения режимных параметров могут производиться на шинах нагрузки или со стороны питающего узла, тогда как виртуальный ЦП предполагает возможность измерения только на шинах нагрузки. В случае измерений на шинах нагрузки, напряжение ЦП в (2.8) предполагается постоянным при изменениях режима работы нагрузки. На рисунке 2.3 представлен случай, когда комплектные измерения режимных параметров производятся со стороны физического ЦП.

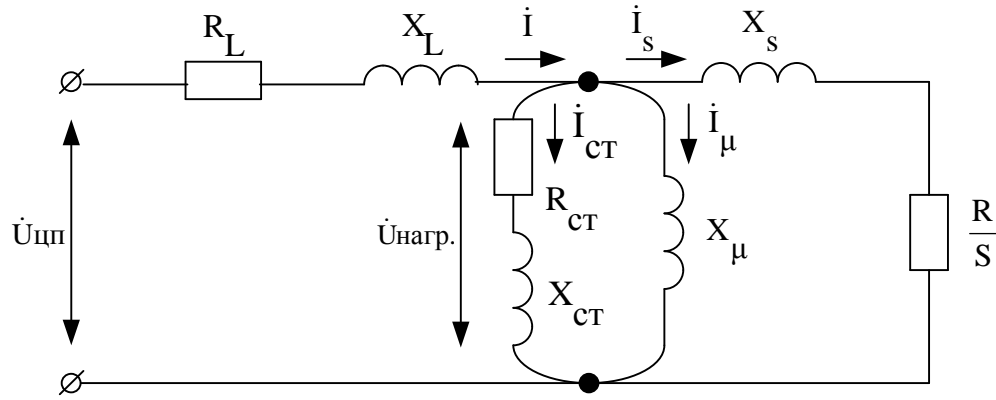


Рисунок 2.3. Схема замещения комплексной нагрузки, питаемой через линию от центра питания

$$\begin{cases} P_{\text{нагр.}i} = P_{\text{ЦП}i} - \frac{\sqrt{P_{\text{ЦП}i}^2 + Q_{\text{ЦП}i}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ЦП}i}} \cdot R_L = \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{(R/S_i)^2 + X_S^2}} \right)^2 \cdot R/S_i + \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{R_{\text{СТ}}^2 + X_{\text{СТ}}^2}} \right)^2 \cdot R_{\text{СТ}}, \\ Q_{\text{нагр.}i} = Q_{\text{ЦП}i} - \frac{\sqrt{P_{\text{ЦП}i}^2 + Q_{\text{ЦП}i}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ЦП}i}} \cdot X_L = \frac{U_{\text{нагр.}i}^2 X_S}{(R/S_i)^2 + X_S^2} + \frac{U_{\text{нагр.}i}^2}{X_\mu} + \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{R_{\text{СТ}}^2 + X_{\text{СТ}}^2}} \right)^2 \cdot X_{\text{СТ}}, \end{cases} \quad (2.8)$$

где $U_{\text{нагр.}i} = \sqrt{\left(U_{\text{ЦП}i} - \frac{P_{\text{ЦП}i} \cdot R_L + Q_{\text{ЦП}i} \cdot X_L}{U_{\text{ЦП}i}} \right)^2 + \left(\frac{P_{\text{ЦП}i} \cdot X_L - Q_{\text{ЦП}i} \cdot R_L}{U_{\text{ЦП}i}} \right)^2}$ (векторная

диаграмма, рисунок 2.4),

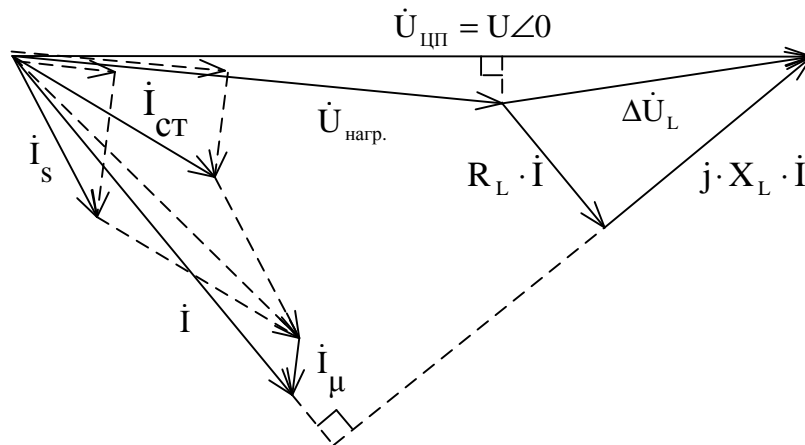


Рисунок 2.4. Векторная диаграмма асинхронного двигателя и питающей линии

Для определения $7+1 \cdot n$ неизвестных в (2.8) необходимо выполнить минимально 7 комплектов измерений, что позволит составить систему из 14 уравнений.

Для условия постоянства напряжения в ЦП определяются критическая активная мощность и запас по мощности текущего режима.

Для этого решается система уравнений (2.8) относительно неизвестных параметров R , X_S , X_μ , S_i , $R_{ст}$, $X_{ст}$, R_L , X_L , $U_{нагр.i}$. Для схемы замещения с известными параметрами определяются:

$$\bar{Z}_{\text{ЭКВ}} = \bar{Z}_L + \frac{\bar{Z}_{\text{ДВ}} \cdot \bar{Z}_{\text{СТ}} \cdot \bar{Z}_\mu \cdot (\bar{Z}_{\text{ДВ}} + \bar{Z}_{\text{СТ}})}{\bar{Z}_{\text{ДВ}} \cdot \bar{Z}_{\text{СТ}} + \bar{Z}_\mu \cdot (\bar{Z}_{\text{ДВ}} + \bar{Z}_{\text{СТ}})}, \quad (2.9)$$

$$I_{\text{ЦП}i} = \frac{U_{\text{ЦП}i}}{\bar{Z}_{\text{ЭКВ}}}, \quad (2.10)$$

$$P_{\text{ЦП}i} = I_{\text{ЦП}i}^2 \cdot \text{Re}(\bar{Z}_{\text{ЭКВ}}), \quad (2.11)$$

$$Q_{\text{ЦП}i} = I_{\text{ЦП}i}^2 \cdot \text{Im}(\bar{Z}_{\text{ЭКВ}}). \quad (2.12)$$

$S_{\text{КР}}$ определяется из условия $\frac{dP_{\text{ЦП}i}}{dS_i} = 0$ при $U_{\text{ЦП}i} = \text{const}$.

$$I_{\text{КР.ЦП}} = \frac{U_{\text{ЦП}}}{\bar{Z}_{\text{ЭКВ}}(S_{\text{КР}})}, \quad (2.13)$$

$$P_{\text{КР.ЦП}} = I_{\text{КР.ЦП}}^2 \cdot \text{Re}(\bar{Z}_{\text{ЭКВ}}(S_{\text{КР}})), \quad (2.14)$$

$$Q_{\text{КР.ЦП}} = I_{\text{КР.ЦП}}^2 \cdot \text{Im}(\bar{Z}_{\text{ЭКВ}}(S_{\text{КР}})), \quad (2.15)$$

$$U_{\text{КР.НАГР.}} = \sqrt{\left(U_{\text{ЦП}} - \frac{P_{\text{КР.ЦП}} \cdot R_L + Q_{\text{КР.ЦП}} \cdot X_L}{U_{\text{ЦП}}} \right)^2 + \left(\frac{P_{\text{КР.ЦП}} \cdot X_L - Q_{\text{КР.ЦП}} \cdot R_L}{U_{\text{ЦП}}} \right)^2}. \quad (2.16)$$

Определяется предельная мощность узла нагрузки с учетом заданных коэффициентов запаса:

$$P_{\text{ПР.ЦП}} = \frac{P_{\text{КР.ЦП}}}{1 + K_{\text{зан}}^P} \quad (2.17)$$

Для условия постоянства мощности двигателя определяются критическое напряжение в ЦП и запас по напряжению питающего узла текущего режима. При этом $U_{\text{КР.ЦП}}$ определяется путём пошагового снижения его расчётного значения с решением нижеприведённой нелинейной системы уравнений

установившегося режима при закреплении постоянства активной мощности двигателя.

Закреплению постоянства мощности двигателя

$$P_{\text{дв}}(S) = P_0 = \text{const}, \quad (2.18)$$

соответствует уравнение:

$$P_{\text{дв}} = I_{\text{дв}}^2 \frac{R}{S} = \text{const}, \quad (2.19)$$

или:

$$\frac{U_{\text{нагр.и}}^2}{(R/S_i)^2 + X_S^2} \cdot R/S_i = \frac{U_{\text{нагр.и}}^2 \cdot R}{R^2/S_i + X_S^2 S_i} = \text{const}, \quad (2.20)$$

т.е.:

$$X_S^2 \cdot S_i + R/S_i = \frac{U_{\text{нагр.и}}^2 \cdot R}{P_{\text{дв}}}, \quad (2.21)$$

или:

$$X_S^2 \cdot S_i^2 - \frac{U_{\text{нагр.и}}^2 \cdot R \cdot S_i}{P_{\text{дв}}} + R = 0. \quad (2.22)$$

Критическое снижение напряжения ЦП, а затем предельно допустимое с учётом заданного коэффициента запаса определяется по расходимости вычислительного процесса в процессе утяжеления режима

$$U_{\text{пр.ЦП}} = (1 + K_{\text{зан}}^U) \cdot U_{\text{кр.ЦП}}. \quad (2.23)$$

На рисунке 5 представлен обобщённый алгоритм предлагаемого способа.

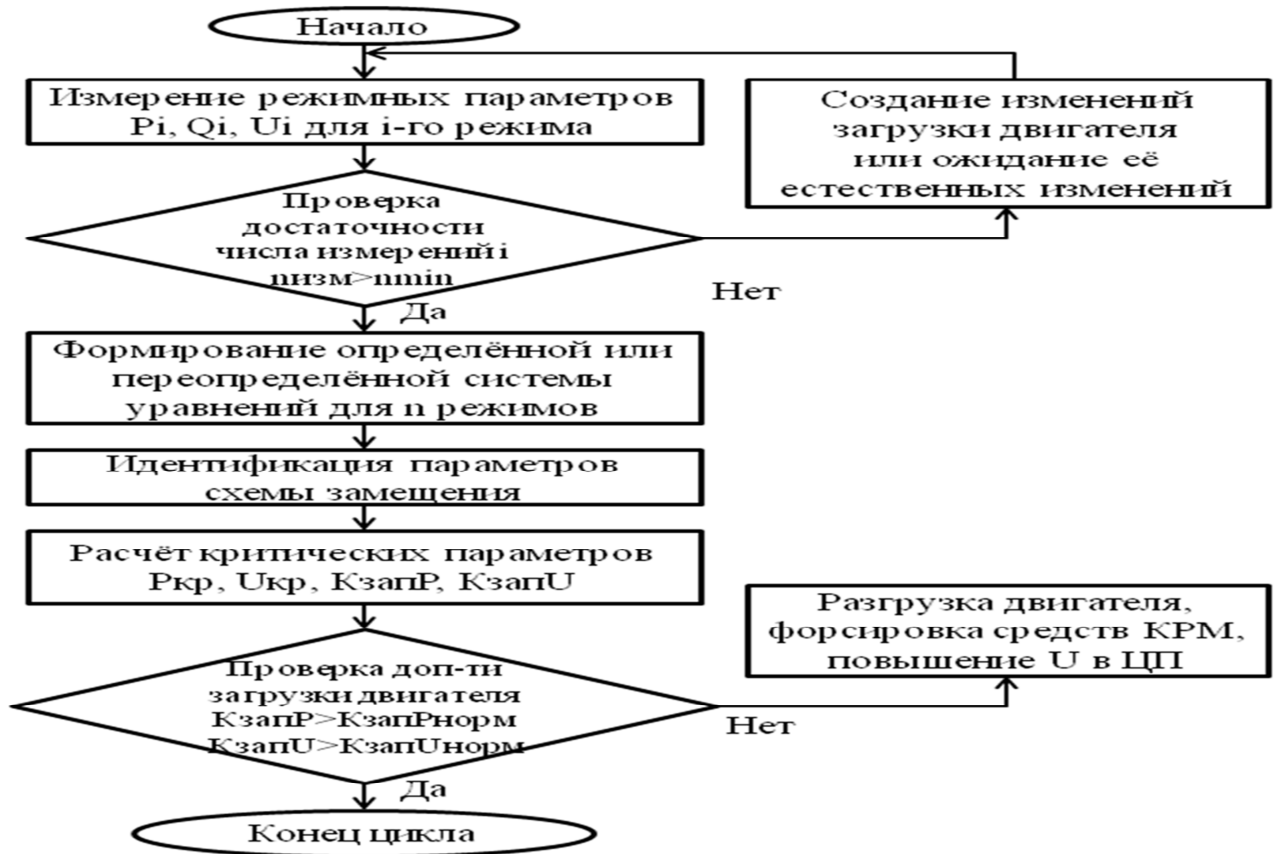


Рисунок 2.5. Алгоритм способа контроля устойчивости узлов комплексной нагрузки для физических или виртуальных ЦП

2.3. Проверка адекватности результатов идентификации посредством экспериментальных исследований на физической модели энергосистем НГТУ

Проверка адекватности результатов идентификации параметров математических моделей узлов нагрузки произведена посредством экспериментальных исследований на физической модели энергосистем НГТУ в сети с комплексной нагрузкой, состоящей из асинхронного двигателя и статической нагрузки.

Описание экспериментального стенда. Экспериментальная установка представляет собой комплексную нагрузку, состоящую из асинхронного двигателя марки АО2-32-4 3 кВт (рисунок 2.7) и статической нагрузки, питающихся через линию электропередач от шин бесконечной мощности

(ШБМ). Принципиальная схема первичных электрических соединений экспериментальной установки представлена на рисунке 2.6.

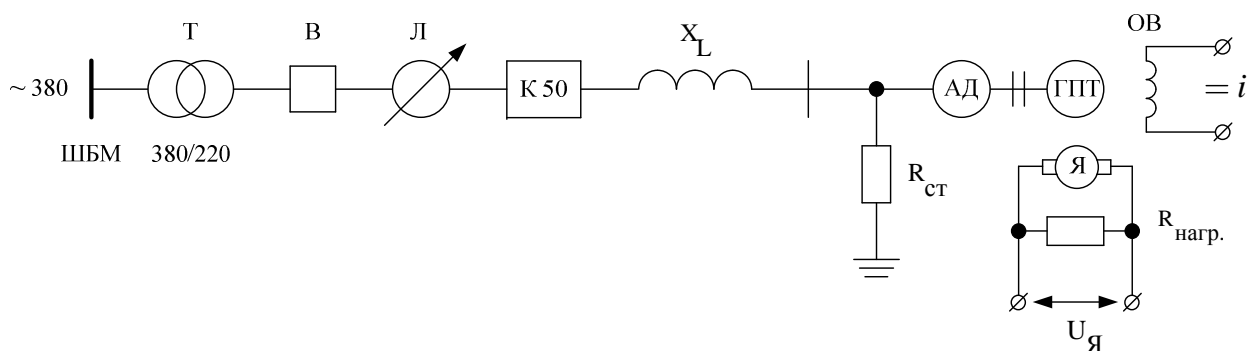


Рисунок 2.6. Схема экспериментальной установки

Пояснения к рисунку 2.6:

ШБМ – шины бесконечной мощности,

Т – силовой трансформатор напряжением 380/220 В,

В – выключатель,

Л – лабораторный трансформатор регулируемый (ЛАТР),

К 50 – измерительный комплект,

X_L – реактивное сопротивление линии, соединяющей шины комплексной нагрузки с центром питания,

$R_{ст}$ – активное сопротивление статической нагрузки,

АД – асинхронный двигатель,

ГПТ – генератор постоянного тока,

ОВ – обмотка возбуждения,

Я – якорь асинхронного двигателя,

$R_{нагр.}$ – активное сопротивление нагрузки на валу асинхронного двигателя постоянного тока.



Рисунок 2.7. Асинхронный двигатель марки АО2-32-4 3 кВт

Асинхронный двигатель марки АО2-32-4 – двигатель трёхфазный короткозамкнутый, треугольник/звезда, 220/380 В, 3000 Вт, 1430 об/мин, 50 Гц, КПД 83,5%, $\cos\varphi=0,84$, $M_{\max}/M_{\text{ном}}=2,2$, $I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}=7$, 1966 г. выпуска. Асинхронные двигатели общепромышленного назначения типа АО2 предназначены для продолжительного режима работы от сети трехфазного переменного тока. Их номинальные характеристики (мощность, ток, напряжение, количество оборотов, коэффициент полезного действия) относятся к номинальным значениям климатических факторов внешней среды и минимальным значениям температуры окружающей среды: -40°C при эксплуатации и -45°C при хранении. Асинхронные двигатели типа АО2 широко используются в различных отраслях промышленности благодаря различному исполнению и степени защиты от воздействий окружающей среды.

Описание эксперимента. Суть эксперимента состоит в последовательном снижении напряжения ЦП (или непосредственно на шинах при $X_L=0$) комплексной нагрузки при помощи ЛАТРа до момента опрокидывания двигателя. В процессе снижения напряжения с приборов измерительного комплекта снимаются значения активной, реактивной мощности и напряжения в ЦП (или непосредственно на шинах) комплексной нагрузки, которые являются известными переменными в системе уравнений (2.1) или (2.8). Исходя из условия равенства в системе уравнений количества уравнений количеству искомых величин, производилось требуемое для идентификации параметров

схемы замещения нагрузки число комплектных измерений режимных параметров – $i=5$ в случае питания нагрузки от шин конечной мощности, и $i=7$ в случае питания нагрузки от физического или виртуального ЦП (таблица 2.2). В результате численного решения системы уравнений определялись параметры схемы замещения комплексной нагрузки, её критическое скольжение и критическое напряжение. Рассчитанное значение критического напряжения проверялось на совпадение с экспериментально определённым критическим напряжением в момент опрокидывания асинхронного двигателя в ходе эксперимента.

Для проверки метода за эталон принимались параметры схемы замещения (R , X_S , X_μ), полученные в результате проведения опыта ХХ и КЗ асинхронного двигателя, а также значения $S_{кр}$, $U_{кр.нагр.}$ и $U_{кр.ЦП}$, при которых происходило опрокидывание АД вследствие последовательного утяжеления условий его работы (снижения напряжения на шинах нагрузки при помощи лабораторного автотрансформатора). Значения $R_{СТ}$, $X_{СТ}$, R_L , X_L известны на основании паспортных данных.

Таблица 2.2 – Экспериментально полученные результаты комплектных измерений режимных параметров на шинах комплексной нагрузки и в центре питания потребителя

Число комплектных измерений режимных параметров i	Экспериментально полученные замеры на шинах комплексной нагрузки			Экспериментально полученные замеры в центре питания потребителя		
	P_i , Вт	Q_i , вар	$U_{нагр_i}$, В	P_i , Вт	Q_i , вар	$U_{ЦП_i}$, В
1	2960	2100	225	2730	2060	229
2	3040	2020	215	2450	1750	206
3	2700	1750	195	2690	1870	208
4	2740	1710	186	2430	1650	189
5	2960	1820	184	2670	1800	188
6	-	-	-	2420	1640	172
7	-	-	-	2660	1840	174

Результаты опытов холостого хода и короткого замыкания асинхронного двигателя:

1) опыт холостого хода:

- напряжение холостого хода $U_{XX} = 220$ В,

- ток холостого хода $I_{XX} = 4,5$ А,

2) опыт короткого замыкания:

- напряжение короткого замыкания $U_{КЗ} = 65$ В,

- ток короткого замыкания $I_{КЗ} = 10$ А,

- активная мощность короткого замыкания (на фазу) $P_{КЗ} = 140$ Вт.

Параметры схемы замещения асинхронного двигателя, рассчитанные на основании опытов холостого хода и короткого замыкания:

$$X_{\mu} = \frac{U_{XX}}{\sqrt{3} \cdot I_{XX}} = \frac{220}{\sqrt{3} \cdot 4,5} = 28,226 \quad \text{Ом} \quad - \quad \text{индуктивное сопротивление}$$

намагничивания асинхронного двигателя,

$$z = \frac{U_{КЗ}}{\sqrt{3} \cdot I_{КЗ}} = \frac{65}{\sqrt{3} \cdot 10} = 3,753 \quad \text{Ом} \quad - \quad \text{полное сопротивление ветви рассеивания}$$

асинхронного двигателя,

$$R = \frac{P_{КЗ}}{I_{КЗ}^2} = \frac{140}{10^2} = 1,4 \quad \text{Ом} \quad - \quad \text{активное сопротивление асинхронного двигателя,}$$

$$X_S = \sqrt{z^2 - R^2} = 3,482 \quad \text{Ом} \quad - \quad \text{индуктивное сопротивление рассеивания}$$

асинхронного двигателя.

Параметры схемы замещения статической нагрузки, известные на основании её паспортных данных:

$$R_{СТ} = 58 \quad \text{Ом} \quad - \quad \text{активное сопротивление статической нагрузки,}$$

$$X_{СТ} = 0 \quad \text{Ом} \quad - \quad \text{индуктивное сопротивление статической нагрузки.}$$

Параметры схемы замещения линии электропередач, известные на основании её паспортных данных:

$R_L = 0$ Ом – активное сопротивление линии, соединяющей шины комплексной нагрузки с центром питания,

$X_L = 1,6$ Ом – индуктивное сопротивление линии, соединяющей шины комплексной нагрузки с центром питания.

В таблице 2.3 представлена погрешность значений параметров схемы замещения комплексной нагрузки, критического скольжения асинхронного двигателя и критического напряжения комплексной нагрузки, полученных в результате идентификации, относительно экспериментальных значений, полученных на основании серии опытов с комплексной нагрузкой на физической модели энергосистем НГТУ.

Таблица 2.3 – Погрешность результатов идентификации относительно экспериментальных значений

Эталонные значения		Значения, полученные в результате идентификации					
		Схема «узел нагрузки – ШБМ»		Схема «узел нагрузки – линия – ЦП»			
				R_L, X_L известны		R_L, X_L неизвестны	
Параметр	Значение	Значение	Погрешность, %	Значение	Погрешность, %	Значение	Погрешность, %
Опыт XX и КЗ		-	-	-	-	-	-
R , Ом	1,400	1,408	0,571	2,084	48,857	1,034	26,143
X_S , Ом	3,482	3,234	7,122	10,901	213,067	5,043	44,831
X_μ , Ом	28,226	27,870	1,261	27,665	1,988	25,469	9,768
Паспортные данные		-	-	-	-	-	-
R_{CT} , Ом	58,000	57,774	0,390	58,095	0,164	186,819	222,102
X_{CT} , Ом	0	0,080	-	2,655	-	22,814	-
R_L , Ом	0	-	-	9,866	-	5,222	-
X_L , Ом	1,600	-	-	-0,380	123,750	-2,245	240,313
Опыт утяжеления		-	-	-	-	-	-
S_{KP} , о.е.	0,402	0,435	8,209	0,191	52,488	0,205	49,005
$U_{KP,HAГP.}$, В	135,660	131,216	3,276	-	-	-	-
$U_{KP,ЦП.}$, В	149,057	-	-	258,721	73,572	168,423	12,992

Как видно из таблицы 2.3, решение системы уравнений, в которой количество уравнений равно количеству искомых величин, даёт допустимую погрешность определения $U_{KP} < 5\%$ в случае схемы «узел нагрузки – ШБМ». В случае схемы «узел нагрузки – линия – ЦП» погрешность определения $U_{KP} > 5\%$, что является недопустимым. Для получения удовлетворительного

решения системы уравнений необходимо применение дополнительных методов повышения достоверности результатов идентификации.

2.4. Определение критических параметров узла нагрузки традиционными методами с использованием программных средств моделирования режимов энергосистем

Проблема снижения уровней напряжения ниже допустимого уровня в нормальных и послеаварийных режимах часто встречается в слабой распределительной сети 110 кВ и ниже, особенно при наличии в ней длинных односторонне питаемых транзитов. Потери напряжения оказываются наиболее значимыми в конце таких транзитов, в том числе из-за промежуточных отборов мощности в нагрузку. Примером является остро дефицитный Кызыльский узел Тывинской ЭС (рисунок 2.8).

Снижение напряжения в сети 110 кВ Тывинской ЭС ниже аварийно-допустимого уровня возможно при аварийных ситуациях с разрывом связей 220 кВ с Красноярской или Хакасской ЭС, а именно при отключении любой из ВЛ 220 кВ Шушенская – Ергаки, Ергаки – Арадан, Арадан – Туран, Туран – Кызыльская, Степная – Абаза, Абаза – Ак-Довурак, Ак-Довурак – Чадан [112]. Согласно [112], для поднятия напряжения требуется отключение шунтирующих реакторов в сети 220-110 кВ и отключение нагрузки локальными устройствами АОСН. В случаях глубокого снижения напряжения целесообразно также выполнять деление сети по связям 110 кВ Кызыльская ЦЭС – ПС Кызыльская с целью недопущения погашения электростанции из-за нарушения работы механизмов собственных нужд. Для поддержания уровня напряжения в Тывинской ЭС согласно [112] требуется заведение под отключение от АОСН нагрузки в объеме порядка 60 МВт (30 % от общего объема нагрузки зимнего максимума).

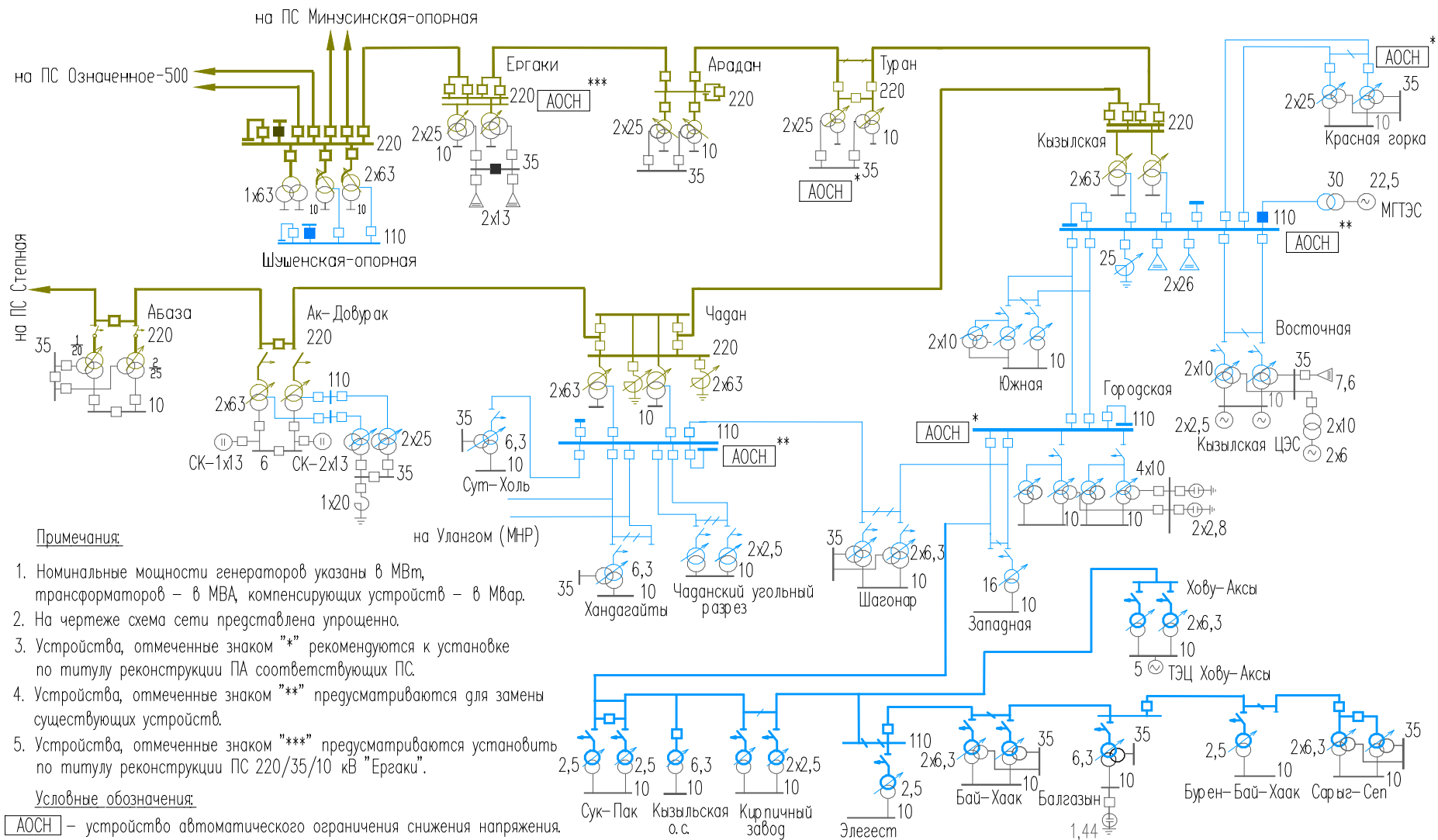


Рисунок 2.8. Схема размещения устройств автоматики ограничения снижения напряжения (АОСН), рекомендуемых к установке по титулу строительства ВЛ 220 кВ Кызыльская – Чадан

Определение критических параметров узла нагрузки традиционными методами произведено с использованием программного комплекса «Мустанг». При моделировании с участием автора различных схемно-режимных ситуаций, приводящих к снижению уровней напряжения Кызыльского узла ниже допустимых, в [112] выявлено, что наиболее низкие уровни напряжения наблюдаются на ПС 110 кВ Сарыг-Сеп, находящейся в конце одноцепного транзита 110 кВ.

В программном комплексе «Мустанг» на шинах 10 кВ ПС Сарыг-Сеп смоделирован узел с нагрузкой различного состава:

1) асинхронной двигательной нагрузкой, представленной двигателем 4А3М-5000/10000 УХЛ4 (производства ОАО «Научно-производственное объединение ЭЛСИБ») – двухполюсный короткозамкнутый двигатель 5000 Вт, 10000 В, 2976 об/мин, КПД 97%, $\cos\varphi=0,89$, $I_{ном}=334$ А, $S_{ном}=0,8\%$, $I_{хх}=192,45$ А, $M_{max}/M_{ном}=2,1$, $M_{п}/M_{ном}=0,9$, $I_{п}/I_{ном}=5,6$;

2) асинхронной двигательной нагрузкой и статической (шунтовой) нагрузкой, представленной активным сопротивлением 58 Ом;

3) статической (шунтовой) нагрузкой, представленной активным сопротивлением 58 Ом.

Параметры схемы замещения асинхронного двигателя, рассчитанные на основании паспортных данных:

$$X_{\mu} = \frac{U_{хх}}{\sqrt{3} \cdot I_{хх}} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 192,45} = 30 \quad \text{Ом} \quad - \quad \text{индуктивное сопротивление}$$

намагничивания АД,

$$\begin{cases} I_{\Pi} = \frac{U_{\Pi}}{\sqrt{(R/S_{\Pi})^2 + X_S^2}} = \frac{10000}{\sqrt{(R/1)^2 + X_S^2}} = 334 \cdot 5,6 \\ I_{НОМ} = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{(R/S_{НОМ})^2 + X_S^2}} = \frac{10000}{\sqrt{(R/0,008)^2 + X_S^2}} = 334 \end{cases} \quad - \text{ из чего следует, что}$$

$R = 0,241$ Ом – активное сопротивление АД,

$X_S = 5,341$ Ом – индуктивное сопротивление рассеивания АД,

$S_{кр} = R/X_S = 0,0045 = 4,5\%$ – критическое скольжение АД.

Моделирование асинхронной двигательной нагрузки произведено посредством задания в программном комплексе «Мустанг» ее моментоскоростной характеристики (таблица 2.4). Соответствующее каждому заданному значению скольжения значение момента и тока вычислялись по выражению (2.24) и (2.25) соответственно:

$$M_i(s_i) = U^2 \cdot R / s_i / ((R / s_i)^2 + X_S^2) \cdot \omega, \quad (2.24)$$

$$I_i(s_i) = U / \sqrt{(R / s_i)^2 + X_S^2}, \quad (2.25)$$

где $R = 0,241$ Ом, $X_S = 5,341$ Ом, $\omega = 300$ рад/с для 4АЗМ-5000/10000 УХЛ4.

Таблица 2.4 – Моментоскоростная характеристика моделируемой асинхронной двигательной нагрузки

S, %	M(S), о.е.	i(S), о.е.
0.008	1.000	1.000
0.010	1.229	1.239
0.015	1.741	1.807
0.020	2.155	2.321
0.025	2.466	2.776
0.030	2.682	3.171
0.035	2.817	3.511
0.040	2.887	3.800
0.045	2.908	4.045
0.050	2.893	4.253
0.055	2.852	4.429
0.060	2.794	4.578
0.065	2.725	4.706
0.070	2.649	4.815
0.075	2.569	4.908
0.080	2.489	4.989
0.085	2.409	5.060
0.090	2.330	5.121
0.095	2.254	5.174
0.100	2.181	5.221
0.200	1.249	5.588
0.300	0.855	5.665
0.400	0.648	5.692
0.500	0.521	5.705
0.600	0.435	5.712
0.700	0.373	5.716
0.800	0.327	5.719
0.900	0.291	5.721
1.000	0.262	5.722

На рисунке 2.10 представлена моментно-скоростная характеристика, моделируемая в программном комплексе «Мустанг» в соответствии со значениями таблицы 2.4.

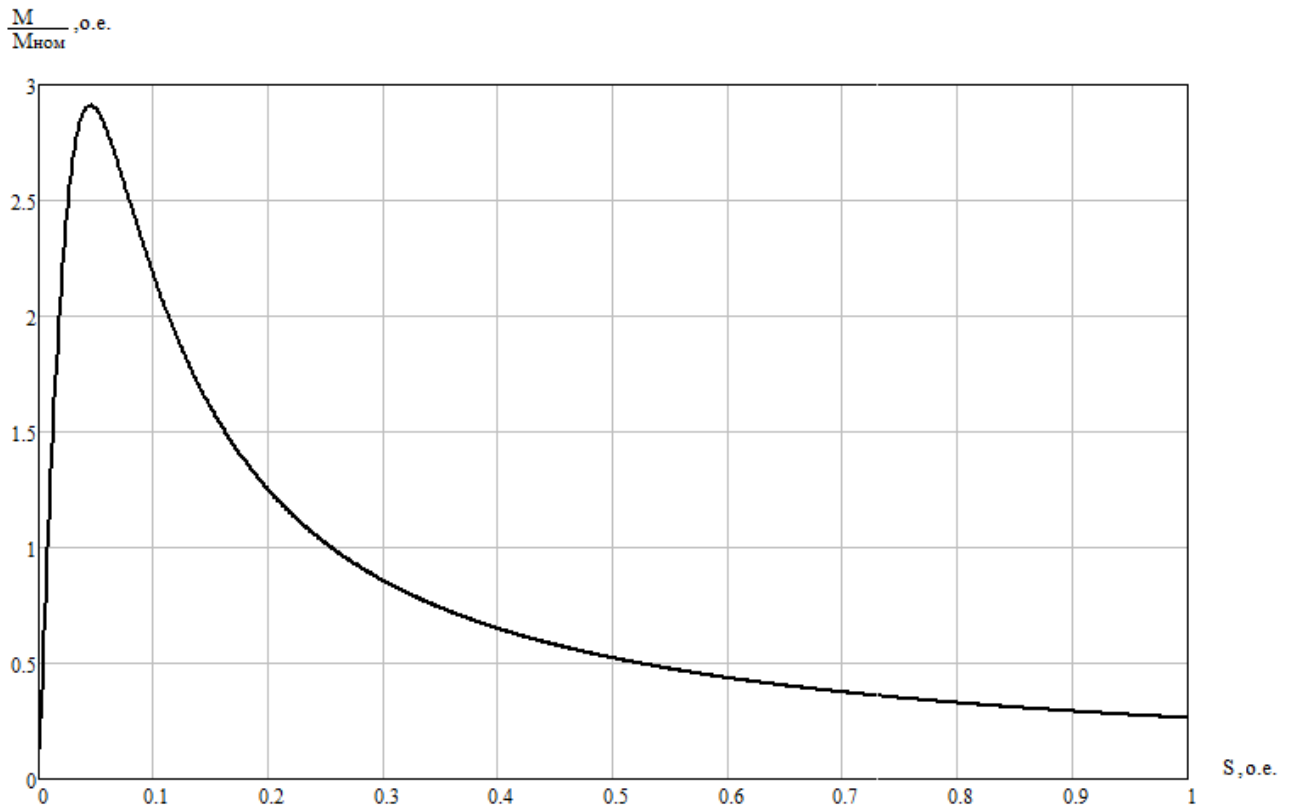


Рисунок 2.9. Моментно-скоростная характеристика моделируемой асинхронной двигательной нагрузки

На рисунке 2.10 представлены полученные осциллограммы напряжения на шинах 10 кВ ПС Сарыг-Сеп (на шинах нагрузки) и скольжения АД, а также напряжения на шинах 110 кВ ПС Городская (в центре питания нагрузки) при моделировании пошагового снижения. Пошаговое снижение напряжения производилось посредством изменения коэффициента трансформации АТ 220/110 кВ ПС Кызыльская и Чадан. Суммарное сопротивление участка ВЛ 110 кВ Сарыг-Сеп – Городская и трансформаторной ветви 110/10 кВ ПС Сарыг-Сеп $X_L=286,75$ Ом.

Рисунок 2.10 отражает случай представления нагрузки на шинах 10 кВ ПС Сарыг-Сеп асинхронной двигательной и статической (шунтовой) нагрузкой как наиболее распространённый комплексный состав нагрузки в реальной ЭС.

В таблице 2.5 представлен сравнительный анализ уровней критических и допустимых напряжений для рассматриваемых случаев различного состава нагрузки. Допустимые уровни напряжения рассчитаны в соответствии с Методическими указаниями по устойчивости энергосистем (утв. Приказом Минэнерго России от 30.06.2003 №277) по формуле:

$$U_{\text{доп}} = \frac{U_{\text{кр}}}{1 - K_U}, \quad (2.26)$$

где K_U коэффициент запаса по напряжению, равный 0,1 для вынужденных, и 0,15 для нормальных и утяжелённых режимов. Моделируемое пошаговое снижение напряжения считалось утяжелённым режимом.

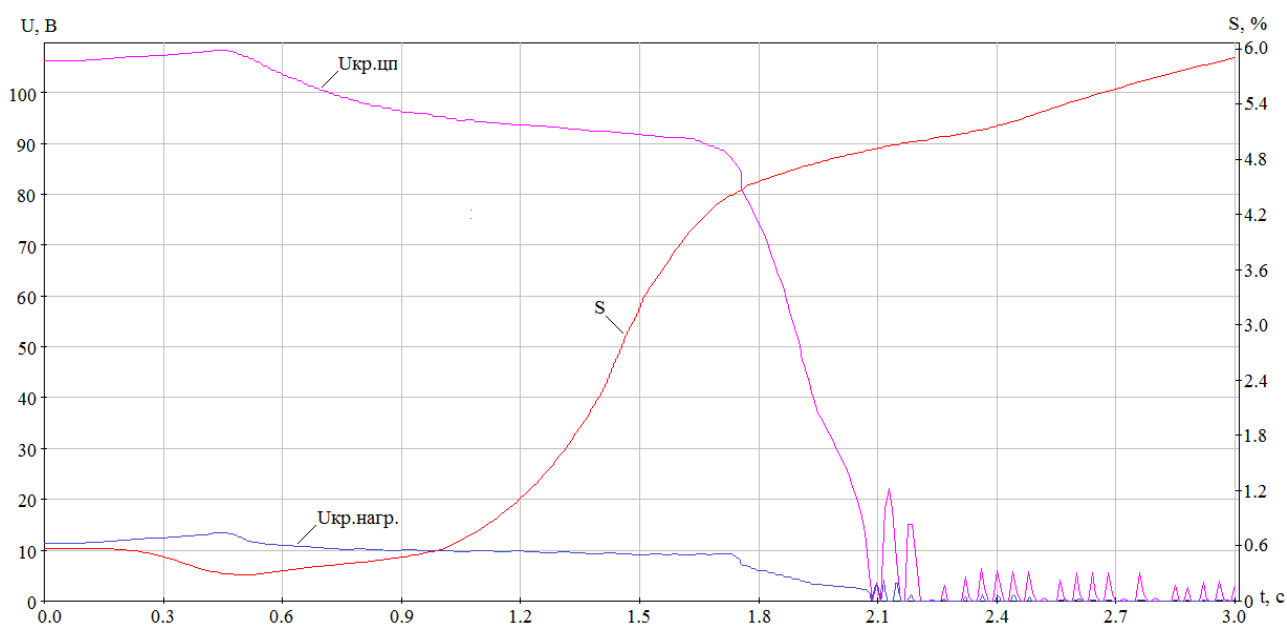


Рисунок 2.10. Осциллограммы напряжения на шинах и в центре питания комплексной нагрузки, скольжения АД при моделировании пошагового снижения напряжения

Таблица 2.5 – Критические и допустимые напряжения при различном составе нагрузки

Состав нагрузки	Укр. (по данным осциллограммы), кВ		Удоп. (в соотв. С МУ по устойчивости ЭС), кВ	
	шины 10 кВ ПС Сарыг-Сеп	шины 110 кВ ПС Городская (ЦП)	шины 10 кВ ПС Сарыг-Сеп	шины 110 кВ ПС Городская (ЦП)
1) асинхронная двигательная	8,4	88,7	9,9	104,4
2) асинхронная двигательная + статическая (шунтовая)	8,1	84,7	9,5	99,6
3) статическая (шунтовая)	7,4	78,5	8,7	92,3

Как видно из таблицы 2.5, наиболее высокие уровни критического и допустимого напряжения получены при моделировании нагрузки асинхронным двигателем, что подтверждает неблагоприятное влияние нагрузки асинхронного характера на режим энергосистемы в сравнении со статическими нагрузками, оказывающими положительный эффект на поддержание уровня напряжения. Полученные допустимые уровни напряжений, рассчитанные заблаговременно в соответствии с Методическими указаниями по устойчивости ЭС, имеют нормативные коэффициенты запаса и могут являться завышенными в иных схемно-режимных ситуациях. Расчёт в соответствии с разработанным методом актуального значения критического напряжения может способствовать актуализации объёмов отключаемой устройствами ПА нагрузки и повышению эффективности противоаварийного управления.

ВЫВОДЫ

1. Определённые традиционными методами критические параметры узлов двигательной нагрузки имеют высокую методическую погрешность, обусловленную использованием упрощенного моделирования статических характеристик нагрузки, недостоверного представления их реального состава. Следствием являются необходимость использования больших коэффициентов запаса и избыточность противоаварийных управляющих воздействий.

2. Регистрограммы изменения режимов в узлах с комплексной нагрузкой позволяют производить идентификацию параметров схем замещения нагрузки и определение критических параметров на их основе.

3. Разработанные алгоритмы дают возможность в темпе процесса вычислять критические параметры для узлов комплексной нагрузки и обеспечивать устойчивость нагрузки.

4. Идентификация параметров схемы замещения комплексной нагрузки на основе системы уравнений, в которой количество уравнений равно количеству искомых величин, может давать недопустимую погрешность результатов идентификации и критических параметров. Для повышения достоверности решения системы уравнений необходимо использовать избыточность измерений.

ГЛАВА 3

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УЗЛОВ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАДЁЖНОСТИ

3.1. Разработка рекомендаций по повышению достоверности результатов идентификации и определения критических параметров на шинах комплексной нагрузки

Как показали расчёты, проведённые в Главе 2, решение в процессе идентификации системы уравнений, в которой число уравнений равно числу неизвестных, может давать значительную погрешность идентификации. Основным способом повышения качества идентификации параметров модели объектов является решение переопределённой системы уравнений, в которой число уравнений больше числа неизвестных.

Рассмотрим влияние увеличения числа измерений режимных параметров на устойчивость численного решения системы уравнений, используемой при идентификации параметров расчетной схемы замещения для определения критических параметров режима узлов двигательной нагрузки. Обратимся к случаю, когда измерения режимных параметров производятся на шинах комплексной нагрузки. Для оценки погрешностей используем ряд понятий теории измерений.

Абсолютная погрешность приближения – модуль разности между истинным значением величины X (в данном случае за истинные будем принимать значения, полученные в результате физических опытов по определению параметров схемы замещения) и её приближённым значением X_{Π} (значением, полученным в результате идентификации):

$$\Delta X_{\text{АБС.}} = |X - X_{\Pi}|. \quad (3.1)$$

Относительная погрешность приближения – отношение абсолютной погрешности к модулю истинного значения величины X :

$$\Delta X_{\text{отн.}} = |X - X_{\text{п}}|/|X| \cdot 100\% . \quad (3.2)$$

Для оценки влияния увеличения числа комплектных измерений режимных параметров на стабильность результатов идентификации, к используемым в главе 2 минимально необходимым по количеству экспериментальным результатам измерений активной, реактивной мощности и напряжения на шинах комплексной нагрузки будем добавлять дополнительные (избыточные) комплектные измерения. В таблице 3.1 $i=6, i=7$ являются избыточными измерениями.

Таблица 3.1 – Экспериментальные результаты комплектных измерений параметров квазиустановившихся режимов на шинах комплексной нагрузки

Номер набора режимных параметров, i	$P_{\text{нагр.}i}$, Вт	$Q_{\text{нагр.}i}$, вар	$U_{\text{нагр.}i}$, В
1	2960	2100	225
2	3040	2020	215
3	3000	1990	212
4	2730	1800	198
5	2700	1750	195
6	2740	1710	186
7	2960	1820	184

Для оценки погрешности экспериментально полученных измерений режимных параметров используем систему уравнений (2.1):

$$\begin{cases} P_{\text{нагр.}i} = \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{(R/S_i)^2 + X_S^2}} \right)^2 R/S_i + \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{R_{\text{ст}}^2 + X_{\text{ст}}^2}} \right)^2 R_{\text{ст}}, \\ Q_{\text{нагр.}i} = \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{(R/S_i)^2 + X_S^2}} \right)^2 X_S + \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{R_{\text{ст}}^2 + X_{\text{ст}}^2}} \right)^2 X_{\text{ст}} + \frac{U_{\text{нагр.}i}^2}{X_{\mu}}, \end{cases}$$

где в качестве известных принимаются параметры схемы замещения комплексной нагрузки ($R, X_S, X_{\mu}, R_{\text{ст}}, X_{\text{ст}}, S_i$), полученные в результате опытов, а неизвестными принимаются значения режимных параметров $P_{\text{нагр.}i}, Q_{\text{нагр.}i}$ при

вариации $U_{\text{нагр}i}$. Определённые таким образом «истинные» значения режимных параметров представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – «Истинные» значения режимных параметров

Номер набора режимных параметров, i	$P_{\text{истин.нагр}i}$, Вт	$Q_{\text{истин.нагр}i}$, вар	$U_{\text{истин.нагр}i}$, В
1	2831	2008	220
2	2900	1935	210
3	2875	1905	207
4	2850	1875	203
5	2837	1834	200
6	2855	1784	190
7	2833	1742	180

Относительная погрешность экспериментально полученных результатов измерений режимных параметров представлена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Относительная погрешность экспериментально полученных режимных параметров относительно их «истинных» значений

Номер набора режимных параметров, i	$\Delta P_{\text{нагр}i}$, %	$\Delta Q_{\text{нагр}i}$, %
1	4,557	4,582
2	4,828	4,393
3	4,348	4,462
4	4,211	4,000
5	4,829	4,580
6	4,028	4,148
7	4,483	4,478

Таким образом, погрешность экспериментально полученных результатов измерений режимных параметров относительно их «истинных» значений не превышает 4,829%, что является допустимой погрешностью для лабораторных экспериментов.

Представленная в таблице 3.4 погрешность значений параметров схемы замещения, полученных в результате идентификации, относительно значений, полученных в результате опытов, рассчитана по формулам согласно определению абсолютной и относительной погрешности.

Таблица 3.4 – Влияние числа избыточных комплектных измерений режимных параметров на шинах комплексной нагрузки на достоверность результатов идентификации

«Эталонные» значения		Значения, полученные в результате идентификации		
		Число избыточных комплектных измерений режимных параметров		
Параметр	Значение	$i=2$	$i=1$	$i=0$
R , Ом	1,400	1,396	1,389	1,387
X_S , Ом	3,482	3,483	3,463	3,500
X_μ , Ом	28,226	27,790	28,433	28,517
R_{CT} , Ом	58,000	58,342	59,271	59,396
X_{CT} , Ом	0	2,149	0,515	0,543
Погрешность значений, полученных в результате идентификации, относительно «эталонных» значений				
Относительная погрешность R , %		0,286	0,786	0,929
Относительная погрешность X_S , %		0,029	0,546	0,517
Относительная погрешность X_μ , %		1,545	0,733	1,031
Относительная погрешность R_{CT} , %		0,590	2,191	2,407
Абсолютная погрешность X_{CT} , Ом		2,149	0,515	0,543

На рисунке 3.1 представлены зависимости погрешностей параметров схемы замещения нагрузки R , X_S , X_μ , R_{CT} , X_{CT} , полученных в результате идентификации, относительно «эталонных» значений при увеличении числа избыточных комплектных измерений режимных параметров.

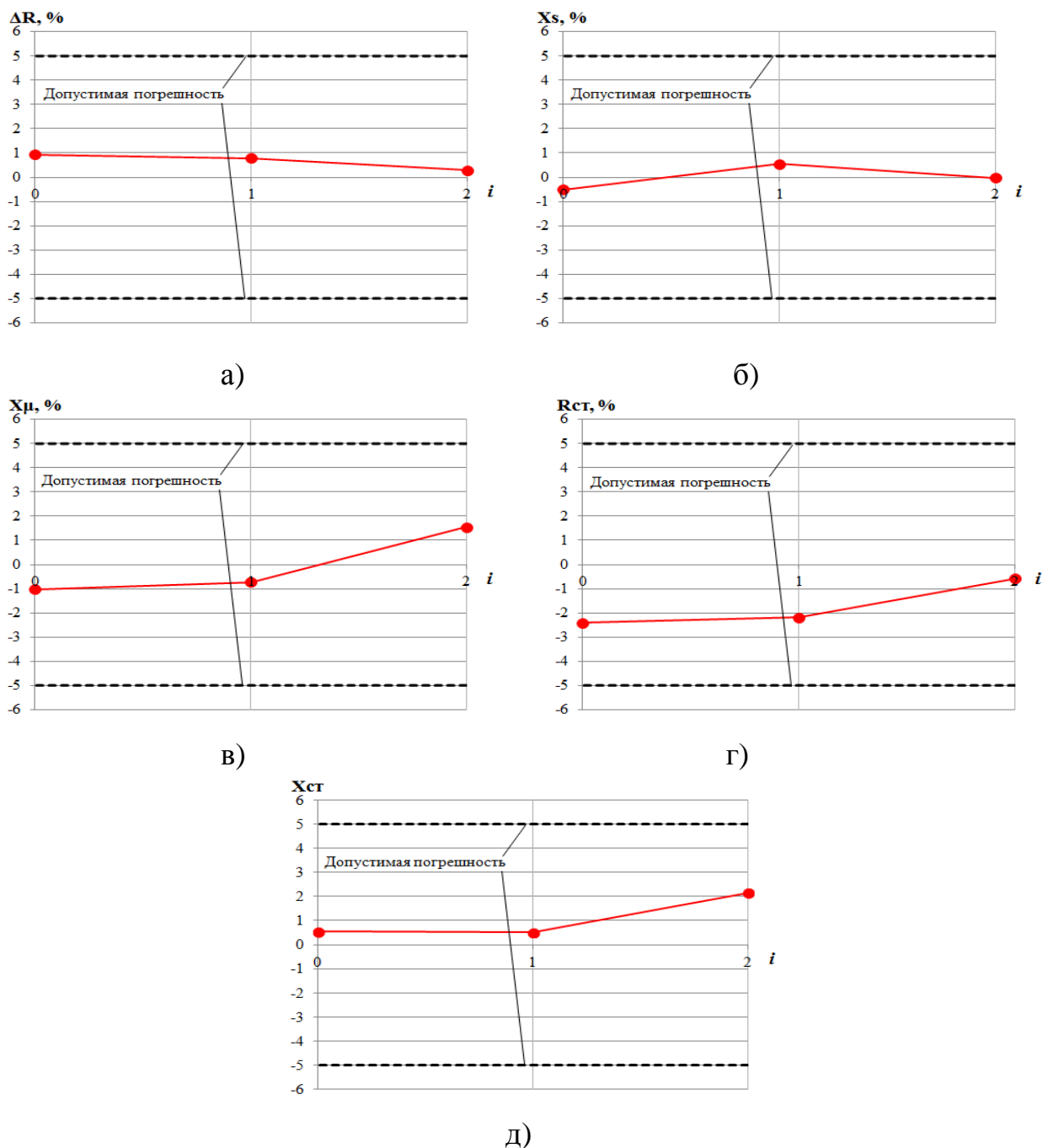


Рисунок 3.1. Влияние числа избыточных комплектных измерений (режимов) i на погрешность результатов идентификации R (а), X_S (б), X_μ (в), $R_{ст}$ (г), $X_{ст}$ (д).

Схема «узел нагрузки – ШБМ»

Анализ влияния числа избыточных комплектных измерений i режимных параметров на погрешности значений R , X_S , X_μ , $R_{ст}$, $X_{ст}$ показал, что в случае схемы «узел нагрузки – ШБМ» погрешность идентификации является допустимой (<5%) при минимально необходимом количестве комплектных

измерений (5), а также остаётся допустимой при их увеличении. Необходимым и достаточным числом комплектных измерений режимных параметров является 5 измерений.

3.2. Разработка рекомендаций по повышению достоверности результатов идентификации и определения критических параметров в центре питания комплексной нагрузки

Рассмотрим влияние увеличения числа измерений режимных параметров на устойчивость численного решения системы уравнений в случае, когда измерения режимных параметров производятся в центре питания потребителя.

Для оценки влияния увеличения числа комплектных измерений режимных параметров на стабильность получения и погрешность идентификации, к используемым в главе 2 экспериментальным результатам измерений активной, реактивной мощности и напряжения в ЦП комплексной нагрузки будем добавлять избыточные измерения ($i=8\dots 13$), таблица 3.5.

Таблица 3.5 – Экспериментальные результаты измерений активной, реактивной мощности и напряжения в центре питания комплексной нагрузки

Номер набора режимных параметров, i	$P_{ЦПi}$, Вт	$Q_{ЦПi}$, вар	$U_{ЦПi}$, В
1	2730	2060	229
2	2450	1750	206
3	2690	1870	208
4	2440	1700	196
5	2680	1850	202
6	2675	1830	200
7	2430	1650	189
8	2670	1800	188
9	2420	1640	172
10	2660	1840	174
11	2410	1720	161
12	2660	1990	164
13	2410	1950	153

Для оценки погрешности экспериментально полученных измерений режимных параметров используем систему уравнений (2.8):

$$\begin{cases} P_{\text{нагр.}i} = P_{\text{ЦП}i} - \frac{\sqrt{P_{\text{ЦП}i}^2 + Q_{\text{ЦП}i}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ЦП}i}} \cdot R_L = \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{(R/S_i)^2 + X_S^2}} \right)^2 \cdot R/S_i + \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{R_{\text{ст}}^2 + X_{\text{ст}}^2}} \right)^2 \cdot R_{\text{ст}}, \\ Q_{\text{нагр.}i} = Q_{\text{ЦП}i} - \frac{\sqrt{P_{\text{ЦП}i}^2 + Q_{\text{ЦП}i}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ЦП}i}} \cdot X_L = \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{(R/S_i)^2 + X_S^2}} \right)^2 \cdot X_S + \frac{U_{\text{нагр.}i}^2}{X_\mu} + \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{R_{\text{ст}}^2 + X_{\text{ст}}^2}} \right)^2 \cdot X_{\text{ст}}, \end{cases}$$

$$U_{\text{нагр.}i} = \sqrt{\left(U_{\text{ЦП}i} - \frac{P_{\text{ЦП}i} \cdot R_L + Q_{\text{ЦП}i} \cdot X_L}{U_{\text{ЦП}i}} \right)^2 + \left(\frac{P_{\text{ЦП}i} \cdot X_L - Q_{\text{ЦП}i} \cdot R_L}{U_{\text{ЦП}i}} \right)^2},$$

где в качестве известных принимаются параметры схемы замещения комплексной нагрузки ($R, X_S, X_\mu, R_{\text{ст}}, X_{\text{ст}}, R_L, X_L, S_i$), полученные в результате опытов, а неизвестными принимаются значения режимных параметров $P_{\text{ЦП}i}, Q_{\text{ЦП}i}$ при вариации $U_{\text{ЦП}i}$. Определённые таким образом «истинные» значения режимных параметров представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – «Истинные» значения режимных параметров

Номер набора режимных параметров, i	$P_{\text{истин.ЦП}i}$, Вт	$Q_{\text{истин.ЦП}i}$, вар	$U_{\text{истин.ЦП}i}$, В
1	2600	1957	224
2	2579	1841	211
3	2562	1782	203
4	2550	1780	200
5	2570	1770	198
6	2570	1750	196
7	2558	1736	193
8	2544	1712	184
9	2533	1718	176
10	2532	1751	170
11	2531	1803	165
12	2529	1893	160
13	2527	2017	156

Относительная погрешность экспериментально полученных результатов измерений режимных параметров представлена в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Относительная погрешность экспериментальных результатов измерений режимных параметров относительно их «истинных» значений

Номер набора режимных параметров, i	$\Delta P_{ЦП}$, %	$\Delta Q_{ЦП}$, %
1	5,000	5,263
2	5,002	4,943
3	4,996	4,938
4	4,314	4,494
5	4,280	4,520
6	4,086	4,571
7	5,004	4,954
8	4,953	5,140
9	4,461	4,540
10	5,055	5,083
11	4,781	4,603
12	5,180	5,124
13	4,630	3,322

Таким образом, погрешность экспериментальных результатов измерений режимных параметров не превышает 5,263%, что является допустимой погрешностью для лабораторных экспериментов.

Представленная в таблицах 3.8, 3.9 погрешность значений, полученных в результате идентификации, относительно значений, полученных в результате опытов, рассчитана по формулам согласно определению абсолютной и относительной погрешности. В таблице 3.8 представлен частный случай, когда параметры линии R_L , X_L , соединяющей шины нагрузки с ЦП, а значит и $U_{НАГР.}$ – известны. На практике определение $U_{НАГР.}$ при известных измерениях режимных параметров в ЦП может быть осуществлено при помощи фантомной схемы. Для этого в цепь трансформатора тока фидера включается сопротивление Z , пропорциональное по величине R_L и X_L . Сопротивление присоединяется также к выходному зажиму трансформатора напряжения. Тогда вольтметр, включённый за данным сопротивлением, покажет напряжение в ЦП за вычетом падения напряжения на сопротивлении R_L и X_L , т.е. напряжение на шинах нагрузки.

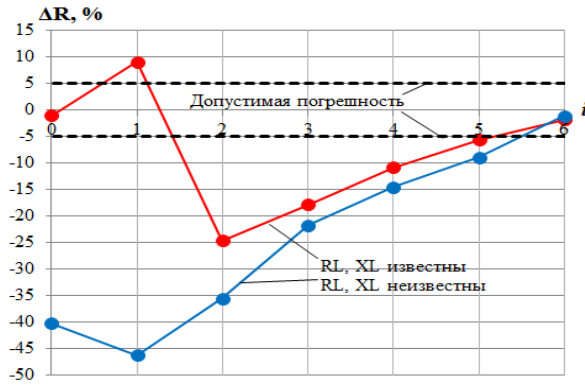
Таблица 3.8 – Влияние числа избыточных комплектных измерений режимных параметров в ЦП ($U_{\text{НАГР}}$, известно) на достоверность результатов идентификации

«Эталонные» значения		Значения, полученные в результате идентификации						
		Число избыточных комплектных измерений режимных параметров						
Параметр	Значение	$i=6$	$i=5$	$i=4$	$i=3$	$i=2$	$i=1$	$i=0$
R , Ом	1,400	1,416	1,525	1,604	1,705	1,898	2,048	1,964
X_S , Ом	3,482	3,603	4,075	4,363	4,588	5,309	2,047	9,069
X_{μ} , Ом	28,226	28,351	28,422	28,025	28,546	29,046	30,604	27,297
R_L , Ом	0	0,275	1,642	2,459	3,288	4,959	4,364	8,199
X_L , Ом	1,600	1,622	1,916	2,174	2,623	3,040	6,928	0,136
R_{CT} , Ом	58,000	57,579	54,655	52,717	50,531	48,388	42,973	56,375
X_{CT} , Ом	0	0,235	-0,452	-2,401	-1,288	-0,381	-2,365	0,814
Погрешность значений, полученных в результате идентификации, относительно «эталонных» значений								
Относительная погрешность R , %		1,143	8,929	14,571	21,786	35,571	46,286	40,286
Относительная погрешность X_S , %		3,475	17,030	25,302	31,763	52,470	41,212	160,454
Относительная погрешность X_{μ} , %		0,443	0,694	0,712	1,134	2,905	8,425	3,291
Абсолютная погрешность R_L , Ом		0,275	1,642	2,459	3,288	4,959	4,364	8,199
Относительная погрешность X_L , %		1,375	19,750	35,875	63,938	90,000	333,000	108,500
Относительная погрешность R_{CT} , %		0,726	5,767	9,109	12,878	16,572	25,909	2,802
Абсолютная погрешность X_{CT} , Ом		0,235	0,452	2,401	1,288	0,381	2,365	0,814

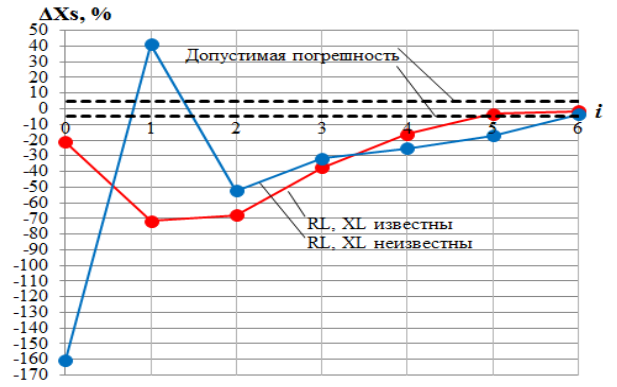
Таблица 3.9 – Влияние числа избыточных комплектных измерений режимных параметров в ЦП ($U_{\text{НАГР}}$, неизвестно) на достоверность результатов идентификации

«Эталонные» значения		Значения, полученные в результате идентификации						
		Число избыточных комплектных измерений режимных параметров						
Параметр	Значение	$i=6$	$i=5$	$i=4$	$i=3$	$i=2$	$i=1$	$i=0$
R , Ом	1,400	1,426	1,479	1,552	1,650	1,745	1,273	1,415
X_S , Ом	3,482	3,538	3,592	4,045	4,787	5,852	5,973	4,225
X_{μ} , Ом	28,226	27,895	28,158	28,609	28,907	29,454	25,637	28,272
R_L , Ом	0	-0,078	-0,195	-0,122	0,129	0,757	4,609	0,814
X_L , Ом	1,600	1,649	1,658	0,994	-0,012	-1,307	-2,736	0,233
R_{CT} , Ом	58,000	55,801	53,248	54,330	56,193	59,399	98,747	61,960
X_{CT} , Ом	0	-1,803	-1,181	-1,529	-2,749	-2,318	-5,474	2,906
Погрешность значений, полученных в результате идентификации, относительно «эталонных» значений								
Относительная погрешность R , %		1,857	5,643	10,857	17,857	24,643	9,071	1,071
Относительная погрешность X_S , %		1,608	3,159	16,169	37,478	68,064	71,539	21,338
Относительная погрешность X_{μ} , %		1,173	0,241	1,357	2,413	4,351	9,172	0,163
Абсолютная погрешность R_L , Ом		0,078	0,195	0,122	0,129	0,757	4,609	0,814
Относительная погрешность X_L , %		3,063	3,625	37,875	100,750	181,688	271,000	85,438
Относительная погрешность R_{CT} , %		3,791	8,193	6,328	3,116	2,412	70,253	6,828
Абсолютная погрешность X_{CT} , Ом		1,803	1,181	1,529	2,749	2,318	5,474	2,906

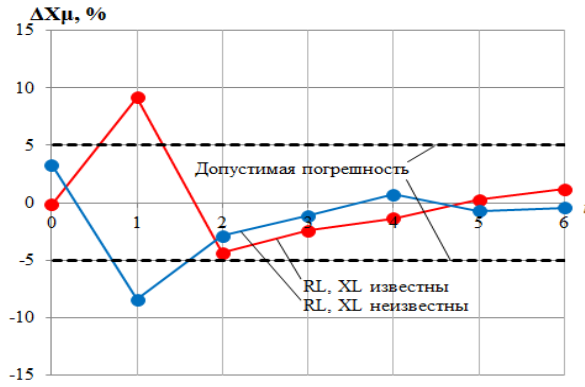
На рисунке 3.2 представлены зависимости погрешностей значений R , X_S , X_{μ} , R_L , X_L , R_{CT} , X_{CT} , полученных в результате идентификации, относительно «эталонных» значений при увеличении числа избыточных комплектных измерений режимных параметров (красная линия – $U_{\text{НАГР}}$, известно, синяя линия – $U_{\text{НАГР}}$, неизвестно).



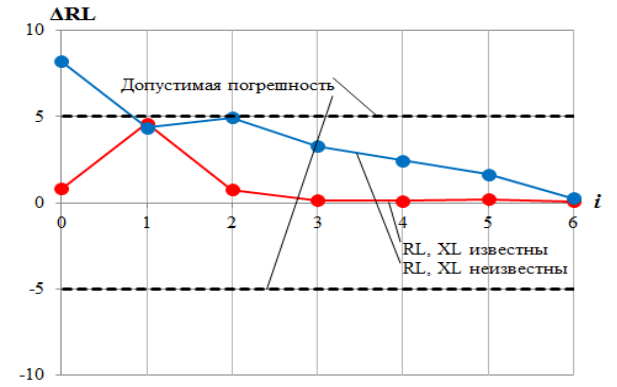
а)



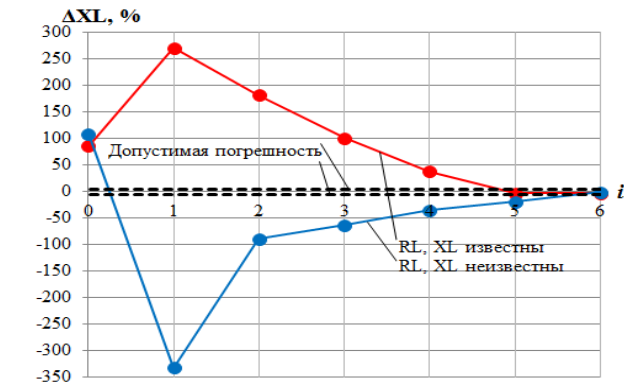
б)



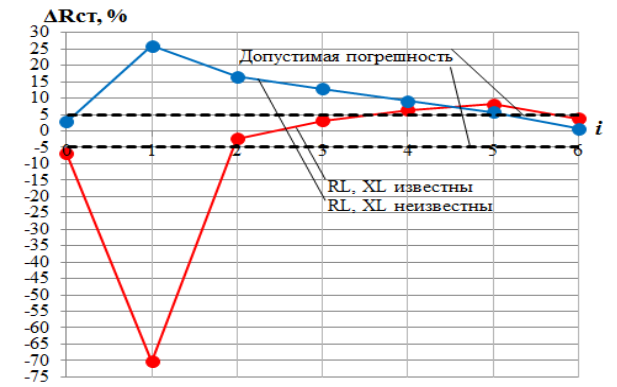
в)



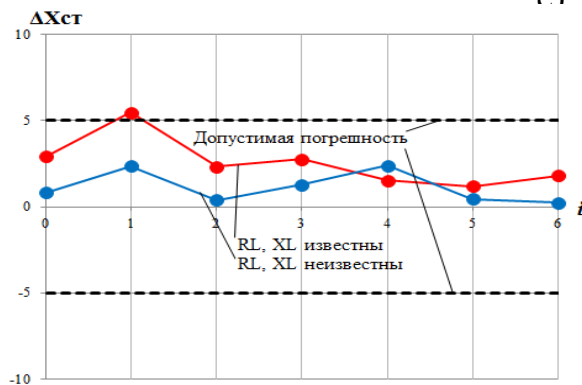
г)



д)



е)



ж)

Рисунок 3.2. Влияние числа избыточных комплектных измерений (режимов) i на погрешность результатов идентификации R (а), X_S (б), X_μ (в), R_L (г), X_L (д), R_{CT} (е), X_{CT} (ж). Схема «узел нагрузки – линия – ЦП»

Анализ влияния числа избыточных комплектных измерений i режимных параметров на погрешности значений R , X_S , X_μ , R_L , X_L , R_{CT} , X_{CT} показал, что в случае схемы «узел нагрузки – линия – ЦП» при минимально необходимом количестве комплектных измерений (7) погрешность идентификации является недопустимой ($>5\%$), и начинает постепенно снижаться при их увеличении, достигая допустимого значения ($<5\%$) при 6 избыточных комплектных измерениях ($i=6$). Таким образом, необходимым и достаточным числом комплектных измерений режимных параметров является 13, т.е. двукратная избыточность.

3.3. Оценка достоверности результатов идентификации с учётом разработанных рекомендаций

3.3.1. Достоверность результатов идентификации при использовании измерений режимных параметров, полученных в ходе эксперимента

В таблице 3.10 представлены значения параметров схемы замещения комплексной нагрузки, критического скольжения асинхронного двигателя и критического напряжения комплексной нагрузки, полученные в результате идентификации на основании серии опытов с комплексной нагрузкой на физической модели энергосистем НГТУ. При нулевой избыточности (для случая контроля режимных параметров на шинах комплексной нагрузки ($i=5$)), при двукратной избыточности (для случая контроля режимных параметров в центре питания ($i=13$)).

Таблица 3.10 – Погрешность результатов идентификации относительно экспериментальных значений

«Эталонные» значения		Значения, полученные в результате идентификации			
		Схема «узел нагрузки – ШБМ»		Схема «узел нагрузки – линия – ЦП» (R_L , X_L неизвестны)	
Параметр	Значение	Значение	Погрешность	Значение	Погрешность
Опыт XX и КЗ		-	-	-	-
R , Ом	1,400	1,396	0,286	1,426	1,857
X_S , Ом	3,482	3,483	0,029	3,538	1,608
X_{μ} , Ом	28,226	27,790	1,545	27,895	1,173
Паспортные данные		-	-	-	-
R_{CT} , Ом	58,000	58,342	0,590	55,801	3,791
X_{CT} , Ом	0	-2,149	2,149	-1,803	1,803
R_L , Ом	0	-	-	-0,078	0,078
X_L , Ом	1,600	-	-	1,649	3,063
Опыт утяжеления		-	-	-	-
S_{KP} , о.е.	0,402	0,396	1,493	0,403	0,249
$U_{KP.NAGR.}$, В	135,660	136,146	0,358	-	-
$U_{KP.CP.}$, В	149,057	-	-	148,688	0,248

Как было показано в таблицах 3.4 и 3.9, погрешности параметров схемы замещения, полученных в результате идентификации, относительно их опытных значений, составляют для случая контроля режимных параметров на шинах комплексной нагрузки – не более 1,545% (относительная погрешность) и 2,149 Ом (абсолютная погрешность); для случая контроля режимных параметров в центре питания комплексной нагрузки – не более 3,791% (относительная погрешность) и 1,803 Ом (абсолютная погрешность). Погрешность представленного в таблице 3.10 значения $U_{KP.NAGR.}$ составляет 0,358%, погрешность представленного в таблице 3.10 значения $U_{KP.CP.}$ составляет 0,248%, что позволяет сделать заключение об адекватности предложенного метода.

3.3.2. Достоверность идентификации параметров схем замещения при использовании современных измерительных устройств

Как было установлено в п.п. 3.1 и 3.2, погрешность экспериментальных результатов измерений режимных параметров относительно их «истинных» значений не превышала 4,83% в случае измерений режимных параметров на шинах нагрузки и 5,27% в случае измерений режимных параметров в центре питания нагрузки, что было допустимо для лабораторных экспериментов. Погрешность современных измерительных устройств и трактов измерения режимных параметров значительно меньше погрешностей, имевших место в лабораторных условиях.

В соответствии с Межгосударственным стандартом «Трансформаторы тока. Общие технические условия» и Межгосударственным стандартом «Трансформаторы напряжения. Общие технические условия»:

- предел допускаемой погрешности трансформаторов тока класса точности 0,2 и 0,2S составляет $\pm 0,2\%$ – $\pm 0,75\%$ в зависимости от первичного тока,

- предел допускаемой погрешности трансформаторов напряжения класса точности 0,2 составляет $\pm 0,2\%$.

Погрешность измерительного тракта, помимо погрешностей трансформаторов тока и напряжения, складывается также из погрешности измерительных преобразователей. Выпускаемые Группой предприятий «АЛЕКТО» измерительные преобразователи тока и напряжения имеют погрешность измерения $\pm 0,2\%$, измерительные преобразователи активной и реактивной мощности – $\pm 0,5\%$.

Для оценки влияния измерительной погрешности на результат идентификации создадим искусственные отклонения режимных параметров в пределах 1% от результатов моделирования режимов сети с узлом комплексной нагрузки.

В таблице 3.11 и 3.12 представлены значения «измерений» режимных параметров, «истинные» значения режимных параметров и погрешность измерений режимных параметров относительно их «истинных» значений в случае измерений режимных параметров на шинах нагрузки и в центре питания нагрузки.

Таблица 3.11 – Значения «измерений» и «истинных» значений режимных параметров, погрешность «измерений» режимных параметров относительно их «истинных» значений в случае измерений режимных параметров на шинах нагрузки

Номер набора режимных параметров, i	$P_{\text{нагр.}i}$, Вт	$Q_{\text{нагр.}i}$, вар	$U_{\text{нагр.}i}$, В	$P_{\text{истин.нагр.}i}$, Вт	$Q_{\text{истин.нагр.}i}$, вар	$U_{\text{истин.нагр.}i}$, В	$\Delta P_{\text{нагр.}i}$, %	$\Delta Q_{\text{нагр.}i}$, %	$\Delta U_{\text{нагр.}i}$, %
1	2803	1988	218	2831	2008	220	1	1	1
2	2929	1955	212	2900	1935	210	1	1	1
3	2809	1816	198	2837	1834	200	1	1	1
4	2884	1802	192	2855	1784	190	1	1	1
5	2805	1725	178	2833	1742	180	1	1	1

Таблица 3.12 – Значения «измерений» и «истинных» значений режимных параметров, погрешность «измерений» режимных параметров относительно их «истинных» значений в случае измерений режимных параметров в центре питания нагрузки

Номер набора режимных параметров, i	$P_{\text{ЦП}i}$, Вт	$Q_{\text{ЦП}i}$, вар	$U_{\text{ЦП}i}$, В	$P_{\text{истин.ЦП}i}$, Вт	$Q_{\text{истин.ЦП}i}$, вар	$U_{\text{истин.ЦП}i}$, В	$\Delta P_{\text{ЦП}i}$, %	$\Delta Q_{\text{ЦП}i}$, %	$\Delta U_{\text{ЦП}i}$, %
1	2626	1977	226	2600	1957	224	1	1	1
2	2605	1860	213	2579	1841	211	1	1	1
3	2588	1800	205	2562	1782	203	1	1	1
4	2576	1798	202	2550	1780	200	1	1	1
5	2596	1788	200	2570	1770	198	1	1	1
6	2596	1768	198	2570	1750	196	1	1	1
7	2584	1754	195	2558	1736	193	1	1	1
8	2570	1729	186	2544	1712	184	1	1	1
9	2559	1735	178	2533	1718	176	1	1	1
10	2558	1769	172	2532	1751	170	1	1	1
11	2557	1821	167	2531	1803	165	1	1	1
12	2555	1912	162	2529	1893	160	1	1	1
13	2553	2037	158	2527	2017	156	1	1	1

В таблице 3.13 представлены значения параметров схемы замещения комплексной нагрузки, критического скольжения асинхронного двигателя и критического напряжения комплексной нагрузки, полученные в результате идентификации при величине погрешности измерений режимных параметров 1% относительно «истинных» значений режимных параметров.

Таблица 3.13 – Погрешность результатов идентификации относительно экспериментальных значений при величине погрешности «измерений» режимных параметров 1% относительно их «истинных» значений

«Эталонные» значения		Значения, полученные в результате идентификации			
		Схема «узел нагрузки – ШБМ»		Схема «узел нагрузки – линия – ЦП» (R_L, X_L неизвестны)	
Параметр	Значение	Значение	Погрешность	Значение	Погрешность
Опыт XX и КЗ		-	-	-	-
R , Ом	1,400	1,410	0,714	1,411	0,786
X_S , Ом	3,482	3,450	0,919	3,503	0,603
X_μ , Ом	28,226	27,892	1,183	27,867	1,272
Паспортные данные		-	-	-	-
$R_{СТ}$, Ом	58,000	56,533	2,529	58,639	1,102
$X_{СТ}$, Ом	0	-0,383	0,383	2,613	2,613
R_L , Ом	0	-	-	0,007	0,007
X_L , Ом	1,600	-	-	1,623	1,437
Опыт утяжеления		-	-	-	-
$S_{кр}$, о.е.	0,402	0,409	1,741	0,403	0,249
$U_{кр.нагр.}$, В	135,660	131,290	3,221	-	-
$U_{кр.ЦП}$, В	149,057	-	-	146,856	1,477

Погрешности представленных в таблице 3.13 значений параметров схемы замещения, полученных в результате идентификации, относительно их опытных значений, составляют для случая замеров режимных параметров на шинах комплексной нагрузки – не более 2,529% (относительная погрешность) и 0,383 Ом (абсолютная погрешность); для случая замеров режимных параметров в центре питания комплексной нагрузки – не более 1,437% (относительная погрешность) и 2,613 Ом (абсолютная погрешность). Погрешность

представленного в таблице 3.5 значения $U_{\text{кр.нагр.}}$ составляет 3,221%, погрешность представленного в таблице 3.5 значения $U_{\text{кр.цп}}$ составляет 1,477%, что позволяет сделать заключение об адекватности разработанного метода.

3.4. Оценка влияния состава комплексной нагрузки на достоверность результатов идентификации

Узлы нагрузки в энергосистеме могут быть условно разделены на промышленные и коммунально-бытовые. Следует отметить, что в составе тех и других редко встречается двигательная или статическая нагрузка в чистом виде – как правило, узел нагрузки содержит в своём составе двигатели и прочую нагрузку, которая может быть представлена постоянной проводимостью.

Разработанный метод предназначен для идентификации параметров схемы замещения комплексной нагрузки и определения её критических параметров главным образом в узлах, в составе которых преобладает двигательная нагрузка. Само по себе понятие критического напряжения имеет смысл в первую очередь для двигательной нагрузки, которой свойственно опрокидываться при снижении значения питающего напряжения ниже критического. Сопротивление же статической нагрузки включено в модель (рисунок 2.1, 2.3) лишь по причине наличия в составе узла нагрузки коммунально-бытовой, осветительной и прочей нагрузки, которая может быть представлена эквивалентным шунтом и должна быть учтена при идентификации.

Учитывая вышесказанное, идентификация параметров схемы замещения нагрузки и определение её критических параметров с помощью разработанного алгоритма имеет смысл только при определённом процентном соотношении двигательной нагрузки в составе комплексной нагрузки узла. Можно предположить, что существует некая процентная доля двигательной нагрузки, ниже которой идентификация параметров схемы замещения эквивалентного асинхронного двигателя теряет смысл в силу преобладающей в составе узла

статической нагрузки и её определяющей роли в характере поведения узла нагрузки. Проверим данное предположение посредством оценки влияния состава комплексной нагрузки на достоверность результатов идентификации.

Параметры схемы замещения статической нагрузки, используемой в серии опытов с комплексной нагрузкой на физической модели энергосистем НГТУ, известны на основании её паспортных данных:

$R_{CT} = 58 \text{ Ом}$ – активное сопротивление статической нагрузки,

$X_{CT} = 0 \text{ Ом}$ – индуктивное сопротивление статической нагрузки.

Мощность, потребляемая данной нагрузкой в центре питания:

$$P_{CT} = \left(\frac{U_{ЦПi}}{\sqrt{R_{CT}^2 + X_{CT}^2}} \right)^2 R_{CT} = \frac{U_{ЦПi}^2}{R_{CT}}. \quad (3.3)$$

Экспериментально полученные результаты замеров активной мощности и напряжения в центре питания комплексной нагрузки в соответствии с таблицей 3.5 для 1-го комплектного измерения составляют: $P_{ЦП1} = 2730 \text{ Вт}$, $U_{ЦП1} = 229 \text{ В}$.

Используя выражение (3.3), можно определить мощность, потребляемую статической нагрузкой:

$$P_{CT} = \frac{U_{ЦП1}^2}{R_{CT}} = \frac{229^2}{58} = 904 \text{ Вт}, \quad (3.4)$$

что составляет в процентном соотношении от активной мощности в центре питания комплексной нагрузки:

$$\frac{P_{CT}}{P_{ЦП1}} = \frac{904}{2730} \cdot 100\% = 33,12\%. \quad (3.5)$$

Будем изменять значение активного сопротивления статической нагрузки R_{CT} , заданное равным 58 Ом на основании её паспортных данных, в диапазоне значений от 0,1 Ом до 1000 Ом (последнее фактически равно бесконечно большому сопротивлению, т.е. разрыву ветви сопротивления статической нагрузки, рисунок 2.3).

При каждом значении R_{CT} по выражению (3.4) можно определить мощность, потребляемую статической нагрузкой в центре питания.

В таблице 3.14 для $R_{ст} = 58$ Ом активная мощность, потребляемая двигателем, определена по формуле:

$$P_{двi} = P_{ЦПi} - P_{стi}. \quad (3.6)$$

В таблице 3.14 для $R_{ст} = 0,1...1000$ Ом активная мощность, потребляемая комплексной нагрузкой в центре питания определяется как сумма значения $P_{ст}$ (соответствующего заданному $R_{ст}$) и $P_{двi}$, остающегося неизменным при всех значениях $R_{ст}$. Таким образом, моделируется изменение активной мощности, потребляемой комплексной нагрузкой в центре питания, при изменении только её статической составляющей.

Соответствующие новому значению $R_{ст}$ значения активной мощности, потребляемой в центре питания, получаем для 13 комплектных измерений режимных параметров (таблица 3.14).

Таблица 3.14 – Изменение активной мощности в центре питания комплексной нагрузки при изменении значения $R_{ст}$

Номер набора режимных параметров, i	$R_{ст} = 58$ Ом			$R_{ст} = 0,1$ Ом		...	$R_{ст} = 500$ Ом		...	$R_{ст} = 1000$ Ом		$Q_{ЦПi}$, вар	$U_{ЦПi}$, В
	$P_{ЦПi}$, Вт	$P_{стi}$, Вт	$P_{двi}$, Вт	$P_{ЦПi}$, Вт	$P_{стi}$, Вт		$P_{ЦПi}$, Вт	$P_{стi}$, Вт		$P_{ЦПi}$, Вт	$P_{стi}$, Вт		
1	2730	904	1826	526236	524410	...	1931	105	...	1878	52	2060	229
2	2450	732	1718	426078	424360	...	1803	85	...	1761	42	1750	206
3	2690	746	1944	434584	432640	...	2031	87	...	1987	43	1870	208
4	2440	662	1778	385938	384160	...	1854	77	...	1816	38	1700	196
5	2680	704	1976	410016	408040	...	2058	82	...	2017	41	1850	202
6	2675	690	1985	401985	400000	...	2065	80	...	2025	40	1830	200
7	2430	616	1814	359024	357210	...	1886	71	...	1850	36	1650	189
8	2670	609	2061	355501	353440	...	2131	71	...	2096	35	1800	188
9	2420	510	1910	297750	295840	...	1969	59	...	1940	30	1640	172
10	2660	522	2138	304898	302760	...	2199	61	...	2168	30	1840	174
11	2410	447	1963	261173	259210	...	2015	52	...	1989	26	1720	161
12	2660	464	2196	271156	268960	...	2250	54	...	2223	27	1990	164
13	2410	404	2006	236096	234090	...	2053	47	...	2030	23	1950	153

Задавая полученные при изменении $R_{ст}$ комплектные измерения режимных параметров в качестве известных величин в систему уравнений (2.8), оценим влияние изменения $R_{ст}$ на достоверность результатов идентификации.

Достоверным будем считать результат идентификации с погрешностью не более $\pm 5\%$ от параметров схемы замещения комплексной нагрузки, экспериментально определённых на основании опытов холостого хода и короткого замыкания асинхронного двигателя, а также от параметров схемы замещения линии электропередачи, известных на основании её паспортных данных:

$$R = 1,33 \dots 1,4 \dots 1,47 \text{ Ом},$$

$$X_S = 3,308 \dots 3,482 \dots 3,656 \text{ Ом},$$

$$X_\mu = 26,815 \dots 28,226 \dots 29,637 \text{ Ом},$$

$$X_L = 1,52 \dots 1,6 \dots 1,68 \text{ Ом}.$$

Проведённые исследования показали, что достоверный результат идентификации получается при значениях в диапазоне от 51,1 Ом до 1000 Ом.

Изменение значения $R_{ст}$ производилось дискретно с крупным шагом от 0,1 Ом до 1000 Ом. При получении достоверного результата идентификации при значении $R_{ст}$ 60 Ом, и недостоверного при значении $R_{ст}$ 50 Ом, шаг изменения $R_{ст}$ был уменьшен до 1 Ом. Далее, при получении достоверного результата идентификации при значении $R_{ст}$ 52 Ом, и недостоверного при значении $R_{ст}$ 51 Ом, шаг изменения $R_{ст}$ был уменьшен до 0,1 Ом. Таким образом, было найдено минимальное значение $R_{ст}$ 51,1 Ом.

Используя выражения (3.4) и (3.5), определена мощность, потребляемая статической нагрузкой с сопротивлением $R_{ст}$ 51,1 Ом:

$$P_{ст} = \frac{229^2}{51,1} = 1026,24 \text{ Вт},$$

что составляет в процентном соотношении от активной мощности в центре питания комплексной нагрузки:

$$\frac{P_{ст}}{P_1} = \frac{1026,24}{2730} \cdot 100\% = 37,59\% .$$

Соответственно, минимальная процентная доля двигательной нагрузки, при которой получается достоверный результат идентификации при использовании предложенного алгоритма, составляет:

$$100\% - 37,59\% = 62,41\%.$$

Данный результат можно считать удовлетворительным, поскольку метод предназначен для определения критических параметров узлов нагрузки с преобладанием двигательной нагрузки, статическая же нагрузка при этом менее значима.

Таким образом, разработанный метод идентификации обеспечивает решение поставленной задачи.

3.5. Проверка достоверности идентификации с использованием программных средств моделирования режимов энергосистем

Полученные в п.п. 2.4 допустимые уровни напряжений, рассчитанные в соответствии с Методическими указаниями по устойчивости ЭС, имеют нормативные коэффициенты запаса и могут являться завышенными в схемно-режимных ситуациях, отличных от рассмотренных. Расчёт в соответствии с разработанным методом актуального значения критического напряжения может способствовать снижению объёмов отключаемой устройствами ПА нагрузки и повышению эффективности противоаварийного управления.

Согласно таблице 3.10, решение системы уравнений при двукратной избыточности измерений даёт допустимую погрешность определения $U_{кр} < 5\%$ в случае схемы «узел нагрузки – линия – ШБМ». Следовательно, произведение 13 комплектных измерений режимных параметров в центре нагрузки при моделировании пошагового снижения напряжения в программном комплексе «Мустанг» (посредством изменения коэффициента трансформации) и последующее решение системы уравнений должно приводить к адекватным результатам идентификации.

На рисунках 2.10 (п.п. 2.4) и 3.3 представлены осциллограммы режимных параметров в центре питания комплексной нагрузки при моделировании пошагового снижения напряжения в программном комплексе «Мустанг» (посредством изменения коэффициента трансформации). В таблице 3.15 представлены результаты комплектных измерений режимных параметров (в моменты времени $t=0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0, 1,1, 1,2, 1,3, 1,4, 1,5, 1,6, 1,7$ с на осциллограмме) в центре питания комплексной нагрузки при моделировании медленного снижения напряжения в программном комплексе «Мустанг».

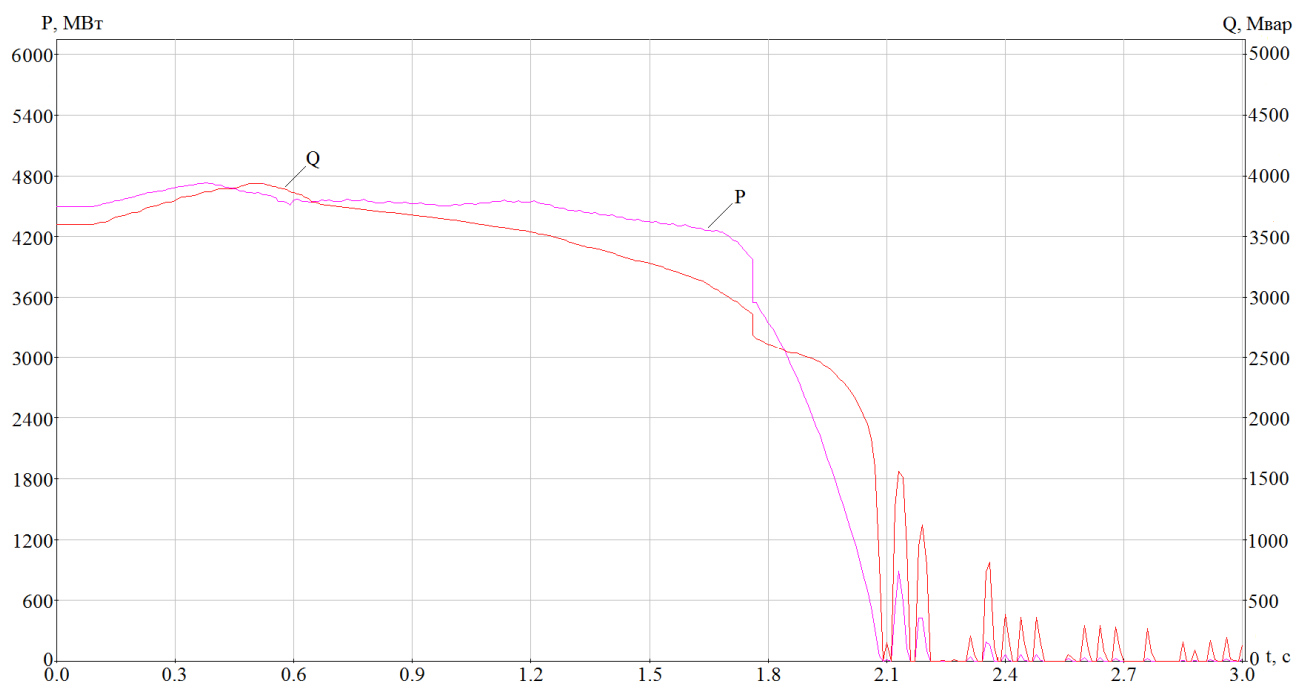


Рисунок 3.3. Осциллограммы активной и реактивной мощности в центре питания комплексной нагрузки при моделировании пошагового снижения напряжения

Таблица 3.15 – Результаты комплектных «измерений» режимных параметров в центре питания комплексной нагрузки при моделировании пошагового снижения напряжения в программном комплексе «Мустанг»

Номер набора режимных параметров, i	$P_{цпн}$, Вт	$Q_{цпн}$, вар	$U_{цпн}$, В
1	4550	3890	106
2	4540	3850	104
3	4540	3760	101
4	4530	3730	98
5	4530	3730	96
6	4540	3650	95
7	4520	3610	94
8	4530	3540	93
9	4500	3450	92
10	4450	3320	92
11	4400	3280	91
12	4320	3190	91
13	4210	2970	89

В таблице 3.16 представлена погрешность значений параметров схемы замещения комплексной нагрузки, критического скольжения асинхронного двигателя и критического напряжения комплексной нагрузки, полученных в результате идентификации при моделировании пошагового снижения напряжения и снятии комплектных измерений режимных параметров в программном комплексе «Мустанг», относительно эталонных значений.

Таблица 3.16 – Погрешность результатов идентификации относительно эталонных значений

«Эталонные» значения		Значения, полученные в результате идентификации. Схема «узел нагрузки – линия – ШБМ»	
Параметр	Значение	Значение	Погрешность, %
Опыт XX и КЗ		-	-
R , Ом	0,241	0,235	2,490
X_S , Ом	5,341	5,282	1,105
X_μ , Ом	30,000	28,504	4,987
Паспортные данные		-	-
$R_{СТ}$, Ом	58,000	55,914	3,597
$X_{СТ}$, Ом	0	0,142	0,142
R_L , Ом	0	4,216	4,216
X_L , Ом	286,750	280,462	2,193
Опыт утяжеления		-	-
$S_{КР}$, о.е.	0,045	0,044	1,132
$U_{КР.ЦП}$, В	84,700	82,088	3,084

Как видно из таблицы 3.16, решение системы уравнений при двукратной избыточности измерений с использованием программных средств моделирования режимов энергосистем даёт допустимую погрешность определения $U_{КР} < 5\%$ при использовании схемы «узел нагрузки – линия – ШБМ», что позволяет судить об адекватности разработанного метода и способа. Значения $U_{КР}$ и $S_{КР}$, полученные в результате идентификации, подтверждаются полученными в программном комплексе «Мустанг» графиками (рисунок 2.10), на которых видно, что в $t \approx 1,75$ с критическое напряжение $U_{КР} \approx 84,5$ В и критическое скольжение $S_{КР} \approx 4,5\%$. На рисунке 3.3 можно наблюдать, что в $t \approx 1,75$ с происходит резкое снижение активной мощности АД и напряжения.

Таким образом, предложенный способ контроля устойчивости узлов двигательной нагрузки, обеспечивая получение актуальных значений критического напряжения, способствует повышению устойчивости узлов нагрузки и снижению объёмов ее отключения.

ВЫВОДЫ

1. Появление возможности мониторинга критического напряжения в узлах комплексной нагрузки может обеспечить объективную оценку текущих запасов устойчивости нагрузки, способствуя надежности режима и эффективности противоаварийного управления.

2. Идентификация параметров схемы замещения комплексной нагрузки на основе переопределённой системы уравнений, в которой количество уравнений превышает количество искомым величин, позволяет получать достоверные результаты идентификации параметров расчетных схем замещения и значений $S_{\text{кр}}$, $U_{\text{кр.нагр.}}$, $U_{\text{кр.цп.}}$.

ГЛАВА 4

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА КОНТРОЛЯ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УЗЛОВ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

4.1. Анализ современного измерительного оборудования для реализации способа

В силу вероятной интеграции данного способа в систему мониторинга переходных режимов (СМНР), целесообразно провести сравнительный анализ технических средств, применяемых в СМНР.

Технические средства, применяемые в СМНР, должны соответствовать требованиям ОАО «СО ЕЭС» и быть сертифицированными устройствами. По инициативе ОАО «СО ЕЭС» в НИУ «МЭИ» проведены тестовые испытания векторных измерительных преобразователей (PMU). Испытания проходили на базе кафедры Релейной защиты и автоматизации энергосистем на программно-аппаратном комплексе RTDS (Real Time Digital Simulator) в соответствии с Методикой сертификационных испытаний устройств PMU, согласованной с ОАО «СО ЕЭС» и производителями устройств PMU.

Целью проведения испытаний являлось определение характеристик PMU в стационарных режимах и при динамических изменениях различных параметров входного сигнала. Сценарии тестов были сформированы на основе положений международного Стандарта IEEE C37.118.1-2011.

В ходе испытаний была произведена проверка на соответствие требованиям Стандарта IEEE C37.118.1-2011 векторных измерительных преобразователей:

- ЭНИП-3 СМНР (ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис»),
- ПАРМА РП-4.11 (ООО «ПАРМА»),
- МИП-01, МИП-02А-40.01 (ЗАО «РТСофт»),

- РЭС-3 СМПР, ТПА-02 (ООО «Прософт-Системы»).

Соответствие РМУ требованиям ОАО «СО ЕЭС» к точности измерения и регистрации параметров представлены в таблице 4.1. и 4.2 соответственно.

Таблица 4.1 – Требования к точности измерения РМУ

№	Параметр	Погрешность измерений	ЗАО «ИЦ «Энерго-сервис»	ООО «Прософт-Системы»	ЗАО «РТСофт»	ООО «ПАРМА»
1	Измерение частоты	+/- 0,001 Гц	+	+	+	+
2	Измерение угла вектора напряжения	+/- 0,1 °	+	+	+	+
3	Измерение напряжения	+/- 0,2 %	+	+	+	+
4	Измерение тока	+/- 0,4 %	+	+	+	+
5	Измерение активной мощности	+/- 0,5 %	+	+	+	+
6	Измерение реактивной мощности	+/- 1,0 %	+	+	+	+
7	Измерение тока возбуждения	+/- 0,5 %	+	+	+	-
8	Измерение напряжения возбуждения	+/- 0,5 %	+	+	+	-

Таблица 4.2 – Требования к регистрации параметров РМУ

№	Требование к производителю	ЗАО «ИЦ «Энерго-сервис»	ООО «Прософт-Системы»	ЗАО «РТСофт»	ООО «ПАРМА»
1	Регистрация всех параметров в один момент времени	+	+	+	+
2	Периодичность регистрации 20 мс	+	+	+	+
3	Метки единого астрономического времени, с дискретностью 1 мс	+	+	+	+
4	Циклический архив данных о параметрах эл-энергетического режима с глубиной хранения не менее 14 суток	+	+	+	+
5	Длительность записи аварийного события ≥ 1200 с	+	+	+	+
6	Запись предшествующего режима не менее 120 с	+	+	+	+
7	Количество записанных событий для каждого контролируемого присоединения не менее 50	+	+	+	+

Исходя из произведенных данных, реализацию разработанного способа целесообразно рассматривать с применением технических средств производства «ИЦ«Энергосервис», ООО«Прософт-Системы» и ЗАО «РТСофт».

Учитывая непосредственную близость расположения технических средств СМПР к силовому оборудованию при регистрации режимных параметров, должна быть обеспечена помехозащищенность оборудования. Испытания по помехозащищенности оборудования и соответствия его требованиям современных руководящих документов проводится при проведении аттестации, с последующей рекомендацией к применению. Данная аттестация проводится ОАО «ФСК ЕЭС». По данным сайта ОАО «ФСК ЕЭС» информация по результатам аттестации технических средств приведена в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Информация об аттестации технических средств

Фирма-производитель	Оборудование	Информация об аттестации
ЗАО «ИЦ «Энергосервис»	ЭНИП-3 СМПР	Аттестован
ООО «Прософт-Системы»	РЭС-3 СМПР	Информации об аттестации нет
ЗАО «РТСофт»	МИП-01, 02	Аттестован

Не смотря на отсутствие аттестации, средства СМПР фирмы ООО «Прософт-Системы» успешно прошли испытания на электромагнитную совместимость.

Лидерами в установке устройств СМПР из рассмотренных вариантов (по сведениям на 2013 год) являются устройства ООО «Прософт-Системы» и ЗАО «РТСофт». Количество установленных СМПР приведено в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Показатель опыта эксплуатации СМПР

№	Показатель	ЗАО «ИЦ «Энергосервис»	ООО «Прософт-Системы»	ЗАО «РТСофт»
1	Установлено на объектах электроэнергетики	0	103	44
2	Опытная эксплуатация не на объектах электроэнергетики	5	0	0

Функции РМУ для регистрации параметров первичной сети через измерительные трансформаторы тока и трансформаторы напряжения,

выполняют интеллектуальные электронные устройства ЭНИП производства ЗАО «ИЦ «Энергосервис». Устройства ЭНИП являются многофункциональными, восстанавливаемыми, ремонтируемыми изделиями и предназначены для круглосуточной эксплуатации в производственных помещениях. Данное устройство осуществляет измерение синхронизированных векторов токов и напряжений, а так же синхронизированные измерения параметров режима энергосистемы по действующим значениям тока и напряжения и по основной гармонике.

Передача параметров в PDC (концентратор векторных данных) осуществляется по цифровому гальванически развязанному интерфейсу Ethernet. Для передачи данных в ЭНИП предусмотрено использование протоколов IEEE C37.118.2 и IEC 60870-5-104. Передача векторных измерений производится 10, 25, 50, 100 раз в секунду.

Устройства ЭНИП соответствуют требованиям стандарта IEEE C37.118.1.

Алгоритмы обработки ЭНИП учитывают нестационарный характер входных сигналов – устройство отстроено от помех в виде свободных составляющих электромагнитных переходных процессов и высших гармоник и обеспечивает требуемую точность измерения векторов тока и напряжения при изменении частоты энергосистемы, а также при изменении огибающих токов и напряжений основной гармонике в условиях электромеханических переходных процессов в энергосистеме, при изменении нагрузки, вследствие работы АРВ и иных устройств автоматики энергосистем.

В ЭНИП за счет внешнего источника синхронизации GPS/ГЛОНАСС-приемника обеспечивается точность поддержания хода часов реального времени не хуже 1 мкс.

Технические характеристики устройства ЭНИП-3-5-220-0:

- аналоговые входы;
- номинальный ток 5 А;
- номинальное напряжение 57,7 В.

- напряжение питания ~100..240 В частотой 45..55 Гц или от сети постоянного тока 120..370 В;
- порт Ethernet 100Base-T с поддержкой протоколов IEEE C37.118.2, МЭК 60870-5-104, МЭК 61850-8-1;
- порт IRIG (подключение внешнего источника синхронизации GPS/ГЛОНАСС-приемника для поддержания хода часов реального времени);
- 5 дискретных входов.

Тепло- и холодоустойчивость устройств ЭНИП-3-5-220-0 – в диапазоне температур от минус 40 до плюс 55°С.

Функции СОЕВ (система обеспечения единого времени) выполняет совокупность технических средств состоящих из антенны коаксиального кабеля и блока коррекции времени. Для связи блока коррекции времени с РМУ предусмотрено использование протокола синхронизации IRIG-A.

Блок коррекции времени ЭНКС.426487.003-01 (IRIG-A) позволяет выполнять коррекцию времени с достаточной точностью и, при этом, питание данного устройства может осуществляться непосредственно от сети постоянного оперативного тока, напряжением 120 – 370 В. Тип применяемой антенны для данного устройства - Bullet GPS/GG antenna.

Передача данных текущих значений времени и даты выполняется через последовательный интерфейс RS-232/RS-422/RS-485 в измерительные преобразователи РМУ для установки или корректировки текущих значений времени и даты.

Достоинства данного оборудования:

- малые габаритные размеры;
- поддержка протокола МЭК 60870-5-104;
- низкая цена оборудования;
- ЭНИП внесен в Госреестр, сертифицирован в ГОСТ Р, аттестован для применения в ОАО «ФСК ЕЭС»;

- учет в PMU и в PDC длинны витой пары для минимизации погрешности СОЕВ.

В ближайшее время оборудование СМПР ЗАО «ИЦ «Энергосервис» планируется к установке на ряде объектов (ПС 220 и 500 кВ, ГЭС и ТЭЦ). Сегодняшний опыт внедрения ограничен установкой в качестве опытных образцов в офисе компаний г. Архангельск и г. Москва – демонстрация векторных измерений, кафедра РЗА НИУ «МЭИ», Институт Систем Энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН и ОАО «СО ЕЭС» (Москва).

Функции PMU для регистрации параметров первичной сети через измерительные трансформаторы тока и трансформаторы напряжения, выполняют интеллектуальные электронные устройства РЭС-3 производства ООО «Прософт-Системы». Устройства РЭС-3 являются многофункциональными, восстанавливаемыми, ремонтируемыми изделиями и предназначены для круглосуточной эксплуатации в производственных помещениях. Данное устройство осуществляет измерение синхронизированных векторов токов и напряжений, а также синхронизированные измерения параметров режима энергосистемы по действующим значениям тока и напряжения и по основной гармонике.

Программное обеспечение, установленное в РЭС-3 СМПР, работает под управлением операционной системы реального времени QNX6 и осуществляет следующие функции:

- работу осциллографа в режиме реального времени;
- отработку уставок по каналам;
- запись аварии и ведение архивов;
- передачу записи зафиксированного события на верхний уровень по протоколу С37.118-2005.

Передача параметров в PDC осуществляется по цифровому гальванически развязанному интерфейсу Ethernet скоростью до 100 Мбит/с по

витой паре (тип 10BASE-T). Для передачи данных предусмотрено использование протокола IEEE C37.118.2005.

Устройства РЭС-3 СМНР соответствуют требованиям стандарта IEEE C37.118.1.

Алгоритмы обработки учитывают нестационарный характер входных сигналов – устройство отстроено от помех в виде свободных составляющих электромагнитных переходных процессов и высших гармоник и обеспечивает требуемую точность измерения векторов тока и напряжения при изменении частоты энергосистемы, а также при изменении огибающих токов и напряжений основной гармоники в условиях электромеханических переходных процессов в энергосистеме, при изменении нагрузки, вследствие работы АРВ и иных устройств автоматики энергосистем.

В РЭС-3 СМНР обеспечивается за счет внешнего источника синхронизации GPS/ГЛОНАСС-приемника точность поддержания хода часов реального времени не хуже 1 мкс.

Технические характеристики устройства РЭС-3-16-00:

- аналоговые входы;
- номинальный ток от 0,5 мА до 5 А;
- номинальное напряжение от 1 мВ до 600 В;
- напряжение питания ~90..264 В частотой 45..55 Гц или от сети постоянного тока 170..370 В;
- порт Ethernet 100Base-T с поддержкой протоколов IEEE C37.118.2005;
- порт IRIG (подключение внешнего источника синхронизации GPS/ГЛОНАСС-приемника для поддержания хода часов реального времени);
- дискретных входов нет;
- гальваническая развязка входных цепей от внутренних схем устройства.

Функция СОЕВ имеет нормированные метрологические характеристики и обеспечивает синхронизацию времени с точностью не хуже $\pm 1 \text{ мкс/с}$. Для обеспечения единства измерений используется единое календарное время.

Для получения достоверной информации в СМПП синхронизация времени системы с астрономическими и общесистемными часами производится от эталонного источника точного времени GPS/ГЛОНАСС (глобальная система позиционирования).

СОЕВ состоит из GPS/ГЛОНАСС-приемников фирмы Meinberg антенно-фидерными устройствами, коаксиальными линиями связи. GPS/ГЛОНАСС - приемник с выходом синхросигнала по протоколу IRIG-B. После включения питания приемник начинает автоматически генерировать поток данных с синхронизацией к UTC в пределах 50 нс.

Основные технические характеристики:

- временной импульс синхронизирован с UTC в пределах 50 нс;
- температура эксплуатации от -40° до $+85^{\circ}$ С;
- интерфейс coaxial.

Достоинства данного оборудования:

- большой опыт в создании СМПП (суммарный опыт эксплуатации РЭС-3 на 103 объектах энергетики);
- использование распространенной операционной системы реального времени.

Функции PMU для регистрации параметров первичной сети через измерительные трансформаторы тока и трансформаторы напряжения, выполняют интеллектуальные электронные устройства МИП-02 производства ЗАО «РТСофт», входящие в комплекс SMART-WAMS 2. Устройства МИП-02 являются многофункциональными измерительными приборами и подразделяются на два типа: МИП-02(Е)А-40.01 и МИП-02(Е)А-40.05. Отличие заключается в функциональности устройств:

- МИП-02(Е)А-40.01 – ввод трех фаз тока и трех фаз напряжения для контроля двух трехфазных сетей (два присоединения) по двум независимым вводам. Каждый ввод включает в себя 3 канала измерения фазных напряжений относительно общей точки и 3 канала измерения фазных токов;
- МИП-02(Е)А-40.05 – ввод трех фаз тока и трех фаз напряжения для контроля одного присоединения, а также резервированные каналы измерения тока обмотки возбуждения генератора, измеряемого при помощи шунта с номинальным выходным напряжением 75 мВ, и напряжения обмотки возбуждения генератора. С целью уменьшения помех, цикл измерений параметров обмотки возбуждения синхронизирован с частотой вращения генератора и составляет 20 мс.

МИП-02 являются восстанавливаемыми, ремонтируемыми и предназначены для круглосуточной эксплуатации в производственных помещениях. Данное устройство осуществляет измерение синхронизированных векторов (синхрофазоров) токов и напряжений, а так же синхронизированные измерения параметров режима энергосистемы по действующим значениям тока и напряжения и по основной гармонике.

Передача параметров в PDC осуществляется по цифровому гальванически развязанному интерфейсу Ethernet. Для передачи данных в PDC предусмотрено использование протоколов IEEE C37.118.2 и IEC 60870-5-104.

Устройства МИП-02 соответствуют требованиям стандарта IEEE C37.118.1.

Алгоритмы обработки МИП-02 учитывают нестационарный характер входных сигналов – устройство отстроено от помех в виде свободных составляющих электромагнитных переходных процессов и высших гармоник и обеспечивает требуемую точность измерения векторов тока и напряжения при изменении частоты ЭС, а также при изменении огибающих токов и напряжений основной гармонике в условиях эл.-мех. переходных процессов в ЭС, при изменении нагрузки, вследствие работы АРВ и иных устройств автоматики ЭС.

В МИП-02 обеспечивается за счет внешнего источника синхронизации GPS/ГЛОНАСС-приемника точность поддержания хода часов реального времени не хуже 1 мкс, в случае неисправности источника синхронизации не хуже 2 мкс.

Технические характеристики данного устройства:

- аналоговые входы;
- номинальный ток 5 А;
- номинальное напряжение 57,7 В.
- напряжение питания ~170..260 В частотой 45..55 Гц или от сети постоянного тока 140..300 В;
- порт Ethernet 100Base-T с поддержкой протоколов IEEE C37.118.2, МЭК 60870-5-104;
- порт IRIG (подключение внешнего источника синхронизации GPS/ГЛОНАСС-приемника для поддержания хода часов реального времени);
- дискретный выход в цепи сигнализации.

Функции СОЕВ выполняет совокупность технических средств, состоящая из приёмного устройства с антенной ГЛОНАСС (GPS), кабелем заказанной длины для приема сигналов точного времени от навигационных спутников и передачи их в PDC, и измерительных преобразователей МИП-02 и конвертора интерфейсов F-4RSC для передачи сигналов от приёмника ГЛОНАСС/GPS на PDC и МИП-02.

Передача данных текущих значений времени и даты выполняется через последовательный интерфейс RS-422 в измерительные преобразователи РМУ для установки или корректировки текущих значений времени и даты.

Достоинства данного оборудования:

- поддержка протокола МЭК 60870-5-104;
- низкая цена оборудования;

- МИП-2 внесен в Госреестр, сертифицирован в ГОСТ Р, аттестован для применения в ОАО «ФСК ЕЭС»;
- большой опыт внедрения и эксплуатации устройств (ГРЭС, ГТЭС, АЭС, ГЭС и ПС 500, 220 кВ).

Исходя из проведённого сравнительного анализа измерительных преобразователей различных производителей, для реализации разработанного способа определения критических параметров узлов двигательной нагрузки рекомендуются РМУ МИП-02 производства ЗАО «РТСофт» (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Основные метрологические характеристики устройства векторных измерений МИП-02 (ЗАО «РТСофт»)

Основная относительная погрешность измерения параметров трехфазной сети	Точность
Переменное напряжение в диапазоне 6..120 В	$\pm 0,15$ %
Переменный ток в диапазоне 0,01..1,2 А или 0,05...6 А	$\pm 0,2$ %
Активная мощность	$\pm 0,2$ %
Реактивная мощность	$\pm 1,0$ %

4.2. Схема и программа эксперимента по исследованию способа контроля критических параметров узлов двигательной нагрузки на физической модели энергосистем НГТУ

Цель проведения испытаний – подтверждение работоспособности разработанного метода определения критических параметров узлов двигательной нагрузки, возможности его реализации в режиме реального времени при снятии измерений режимных параметров устройством векторных измерений МИП-02 производства ЗАО «РТСофт».

Эксперименты проводились на физической модели энергосистем НГТУ в сети с комплексной нагрузкой, состоящей из асинхронного двигателя и статической нагрузки, с последовательным снижением напряжения на шинах комплексной нагрузки при помощи ЛАТРа до момента её опрокидывания (рисунки 4.1).

Реализация метода была осуществлена с помощью ПВК, в состав которого входили измерители МИП-02 и ПК, реализующий алгоритм сглаживания результатов измерений и метод идентификации параметров схемы замещения узла двигательной нагрузки (рисунок 4.2 – 4.4).

Описание экспериментального стенда. Экспериментальная установка представляет собой комплексную нагрузку, состоящую из АД марки АО2-32-4 3 кВт и статической нагрузки, питающихся от шин бесконечной мощности (ШБМ). Принципиальная схема первичных электрических соединений экспериментальной установки представлена на рисунке 4.1.

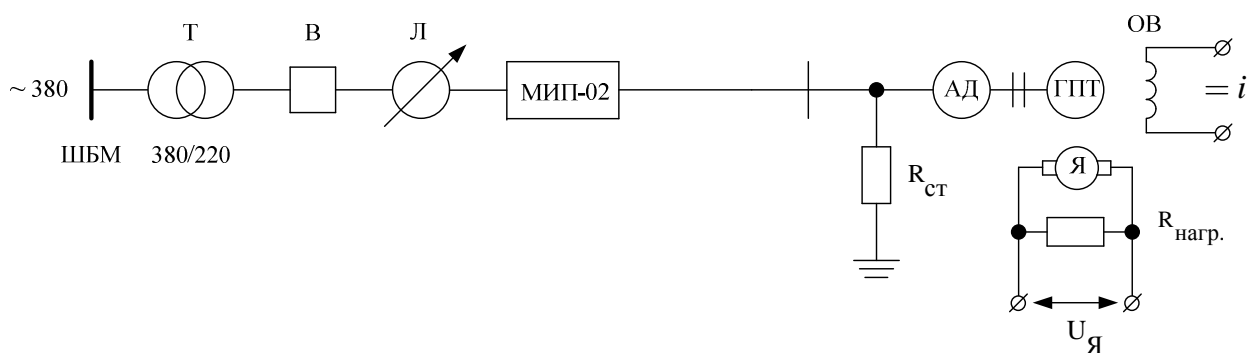


Рисунок 4.1. Схема экспериментальной установки

Пояснения к рисунку 4.1:

ШБМ – шины бесконечной мощности,

Т – силовой трансформатор напряжением 380/220 В,

В – выключатель,

Л – лабораторный трансформатор регулируемый (ЛАТР),

МИП-02 – устройство векторных измерений (PMU) МИП-02 производства ЗАО «РТСофт»,

$R_{ст}$ – активное сопротивление статической нагрузки,

АД – асинхронный двигатель,

ГПТ – генератор постоянного тока,

ОВ – обмотка возбуждения,

Я – якорь асинхронного двигателя,

$R_{нагр.}$ – активное сопротивление нагрузки на валу АД постоянного тока.

Для экспериментального определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя, в целях их дальнейшего сравнения со значениями

параметров схемы замещения, полученных в результате идентификации, проведён опыт холостого хода и короткого замыкания асинхронного двигателя.

Результаты опытов:

1) опыт холостого хода:

- напряжение холостого хода $U_{XX} = 220$ В,

- ток холостого хода $I_{XX} = 4,85$ А,

2) опыт короткого замыкания:

- линейное напряжение короткого замыкания $U_{КЗ} = 47$ В,

- ток короткого замыкания $I_{КЗ} = 9,5$ А,

- активная мощность короткого замыкания (на фазу) $P_{КЗ} = 125$ Вт.

Для регистрации переходных процессов было использовано устройство векторных измерений МИП-02, производства ЗАО «РТСофт». В процессе снижения напряжения РМУ МИП-02 производило измерения активной, реактивной мощности и напряжения на шинах комплексной нагрузки.

Преобразователи МИП-02 имеют два независимых ввода (ВВОД 1 и ВВОД 2), что позволяет измерять параметры в двух точках трехфазных сетей. Вводы имеют каналы измерения напряжения и тока типа ТИ (ТИ100В и ТИ5А).

ТИ100В – канал телеизмерения, предназначенный для измерения действующего значения переменного напряжения с номинальными напряжениями $U_n = 57,7$ В и $U_n = 100,0$ В в соответствии с ГОСТ Р 52320-2005 (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Технические характеристики каналов измерения напряжения типа ТИ100В

Параметр	Типы каналов измерения напряжения ТИ100В
Диапазон измерения напряжения, В	5..140
Предел основной допускаемой относительной погрешности δ , %	$\pm 0,15$
Допускаемый ТК ^[1] , % / °С	$\pm 0,02$
Перенапряжение, длительно (в течение 1 с), В	200 (250)
Мощность потребления входной цепью, не более, ВА (при напряжении, В) ^[2]	0,2 (100)
Сопротивление изоляции ^[3] , не менее, МОм	100 (5) ^[4]
Электрическая прочность изоляции, не менее	2000 В переменного тока
Сечение внешних присоединительных проводов	0,5...2,0

Примечания:

[1] – допускаемый температурный коэффициент (ТК) погрешности в диапазоне рабочих температур за пределами нормальных.

[2] – действующее значение, при котором нормируется параметр.

[3] – измеряется при напряжении 100 В постоянного тока.

[4] – в скобках указана величина сопротивления для крайних значений температуры и влажности.

ТИ5А – канал телеизмерения, предназначенный для измерения действующего значения переменного тока с номинальными токами $I_n = 1$ А и $I_n = 5$ А в соответствии с ГОСТ Р 52320-2005 (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Технические характеристики каналов измерения тока типа ТИ5А

Параметр	Типы каналов измерения напряжения ТИ5А
Диапазон измерения, А	0,01I _н ..2,84I _н
Стартовый ток (чувствительность), А	0,002I _н
Предел основной допускаемой относительной погрешности δ , %	$\pm 0,2 (\pm 0,4)^{[1]}$
Допускаемый ТК ^[2] , % / °С	$\pm 0,02$
Перегрузка по току, длительно (в течение 1 с), А	10 (100)
Мощность потребления входной цепью, не более, ВА (при токе, А) ^[3]	0,2 (5)
Сопротивление изоляции ^[4] , не менее, МОм	100 (5) ^[5]
Электрическая прочность изоляции, не менее	2000 В переменного тока
Сечение внешних присоединительных проводов, мм ²	1,0...4,0
Примечания:	
[1] – в скобках указан предел погрешности δ , для токов в диапазоне $0,01I_n \leq I \leq 0,1I_n$.	
[2] – допускаемый температурный коэффициент (ТК) погрешности в диапазоне рабочих температур за пределами нормальных.	
[3] – действующее значение, при котором нормируется параметр.	
[4] – измеряется при напряжении 1000 В постоянного тока.	
[5] – в скобках указана величина сопротивления для крайних значений температуры и влажности.	



Рисунок 4.2. Основное оборудование ЭДМ, использованное в эксперименте

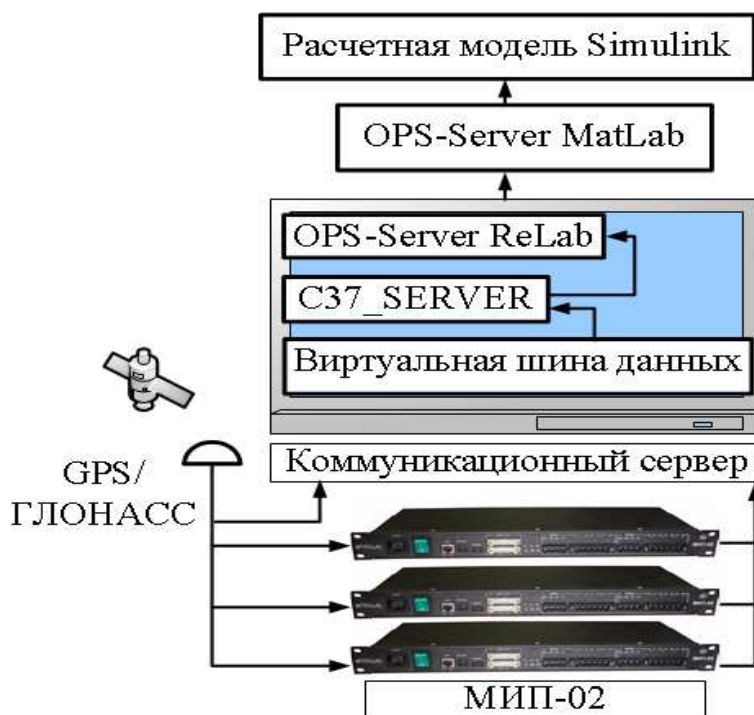


Рисунок 4.3. Схема передачи данных между SMART-WAMS и динамической моделью Simulink



а)



б)

Рисунок 4.4. Реализация прототипа автоматики на базе РМУ МИП-02 (ЗАО «РТСофт»). Контрольная стойка вид спереди (а) и сзади (б)

4.3. Результаты эксперимента и заключение о достоверности результатов идентификации исследуемого метода

Параметры схемы замещения асинхронного двигателя, рассчитанные на основании опытов холостого хода и короткого замыкания:

$$X_{\mu} = \frac{U_{XX}}{\sqrt{3} \cdot I_{XX}} = \frac{220}{\sqrt{3} \cdot 4,85} = 26,2 \quad \text{Ом} \quad - \quad \text{индуктивное сопротивление}$$

намагничивания АД,

$$z = \frac{U_{K3}}{I_{K3}} = \frac{47}{9,5} = 4,95 \quad \text{Ом} \quad - \quad \text{полное сопротивление ветви рассеивания АД,}$$

$$R = \frac{P_{K3}}{I_{K3}^2} = \frac{125}{9,5^2} = 1,39 \quad \text{Ом} \quad - \quad \text{активное сопротивление АД,}$$

$$X_S = \sqrt{z^2 - R^2} = 4,75 \quad \text{Ом} \quad - \quad \text{индуктивное сопротивление рассеивания АД.}$$

Паспортные параметры схемы замещения статической нагрузки:

$R_{CT} = 58 \text{ Ом}$ – активное сопротивление статической нагрузки,

$X_{CT} = 0,8 \text{ Ом}$ – индуктивное сопротивление статической нагрузки.

На рисунке 4.5 представлены исходная регистрограмма активной мощности АД $P_{ср}=950 \text{ Вт}$ (верхняя часть) и усреднённая активная мощность $P_{усред.}$ – результат её сглаживания в процессе статистического накопления значений с вычислением среднего (нижняя часть). Видно, что после набора данных (интервал усреднения) имеем мощность, близкую к средней.

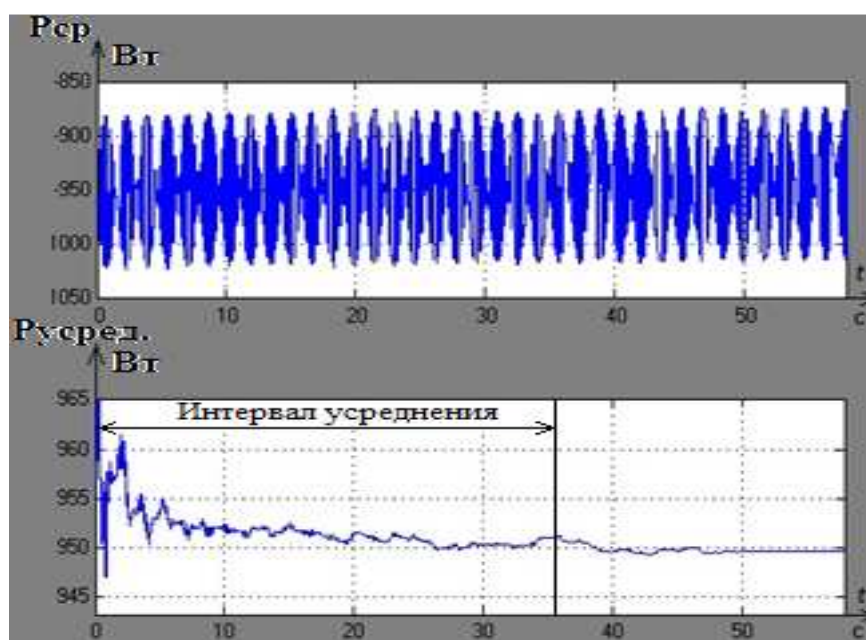


Рисунок 4.5. Усреднение активной мощности

Процесс идентификации параметров схемы замещения комплексной нагрузки в режиме реального времени при медленном снижении напряжения и сглаживании лишь высокочастотной составляющей в измерениях представлен на рисунке 4.6 (а), а расчета критических значений скольжения и напряжения – на рисунке 4.6 (б).

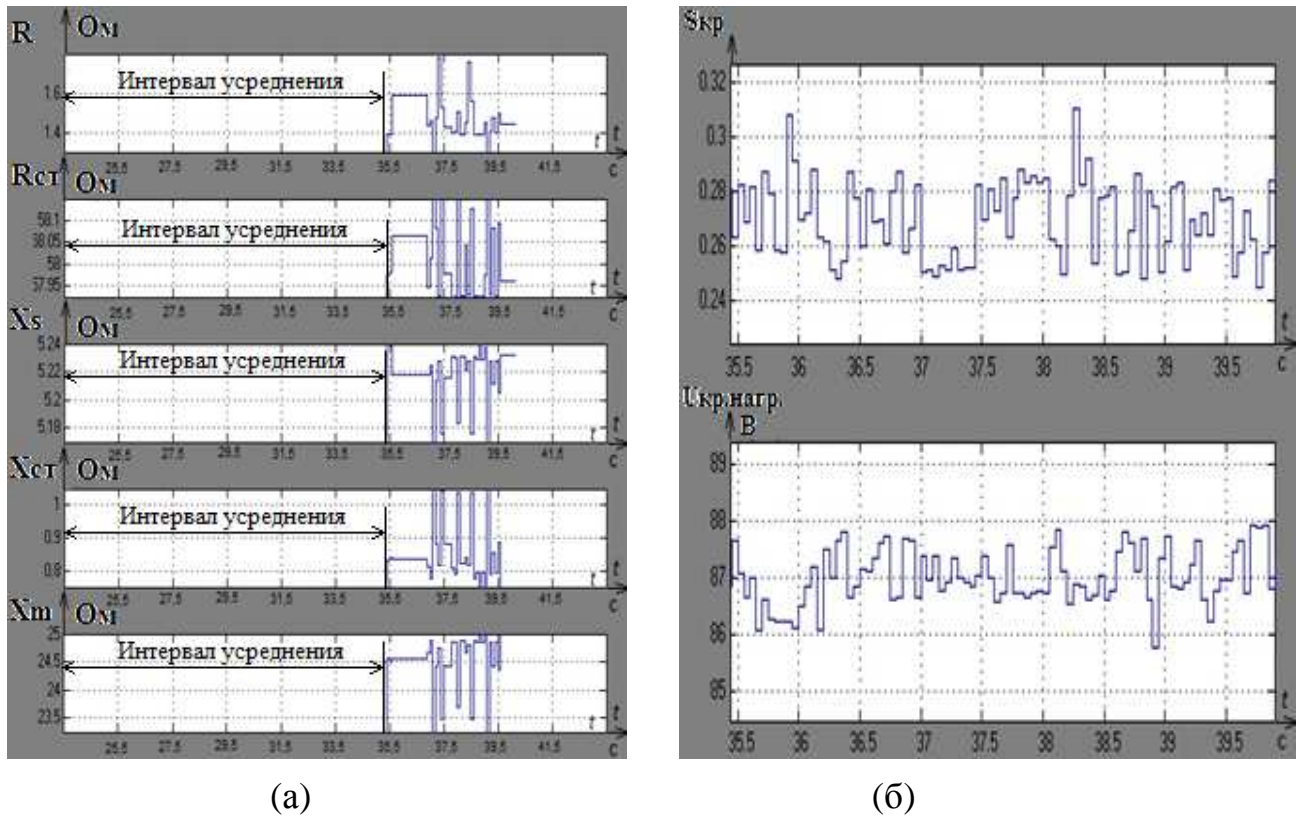


Рисунок 4.6. (а), (б) – Идентификация параметров схемы замещения (а) и расчёт критических параметров (б) on line

В таблице 4.8 представлена погрешность значений параметров схемы замещения комплексной нагрузки, критического скольжения асинхронного двигателя и критического напряжения комплексной нагрузки, полученных в результате идентификации, относительно экспериментальных значений, полученных на основании серии опытов с комплексной нагрузкой на физической модели энергосистем НГТУ.

Таблица 4.8 – Погрешность результатов идентификации относительно экспериментальных значений

«Эталонные» значения		Значения, полученные в результате идентификации. Схема «узел нагрузки – ШБМ»	
Параметр	Значение	Значение	Погрешность, %
Опыт XX и КЗ		-	-
R , Ом	1,39	1,40	0,72
X_S , Ом	4,75	5,20	9,47
X_μ , Ом	26,20	24,50	6,49
Паспортные данные		-	-
$R_{СТ}$, Ом	58,00	58,00	0
$X_{СТ}$, Ом	0,80	0,09	12,50
Опыт утяжеления		-	-
$S_{КР}$, о.е.	0,29	0,27	6,90
$U_{КР.НАГР.}$, В	88,05	87,00	1,19

Как видно из рисунков 4.6 (а), (б) и таблицы 4.8, идентификация параметров схемы замещения и расчёт критического напряжения происходит с приемлемой точностью в режиме реального времени при измерении режимных параметров устройством векторных измерений МИП-02 производства ЗАО «РТСофт», обеспечивая допустимую погрешность определения $U_{КР.НАГР.}$ (<1,5%).

Разработанный алгоритм определения критических параметров в узлах комплексной нагрузки может служить функционально-логической частью работы автоматики ограничения снижения напряжения (АОСН) и автоматической частотной разгрузки (АЧР) с контролем напряжения, в режиме реального времени, определяя актуальное значение критического напряжения и текущего запаса устойчивости нагрузки. Работа АОСН и АЧР в этом случае будет способствовать большей эффективности противоаварийного управления по сравнению с методом заблаговременного расчёта уставок минимального напряжения нагрузки. Разработанный алгоритм может также функционально входить в систему автоматического предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ), в район управления которой входят части энергосистемы, нарушение устойчивости в которых происходит по критерию минимального напряжения в узлах нагрузки. Алгоритм может использоваться для реализации

противоаварийного управления по принципу I-ДО (основанному на методе расчёта послеаварийного режима, запаса статической устойчивости и дозировки управляющих воздействий в ходе единого итерационного вычислительного процесса) с представлением нагрузок в текущей расчётной модели энергосистемы моделью комплексной нагрузки, или непосредственно в режиме реального времени.

ВЫВОДЫ

1. Идентификация параметров схемы замещения комплексной нагрузки и расчёт критического напряжения происходит с приемлемой точностью в режиме реального времени при измерении режимных параметров устройством векторных измерений МИП-02 производства ЗАО «РТСофт», обеспечивая допустимую погрешность определения критического напряжения менее 1,5%.

2. Разработанный алгоритм определения критического напряжения в узлах комплексной нагрузки может функционально являться частью автоматики ограничения снижения напряжения (АОСН), автоматической частотной разгрузки (АЧР), автоматики предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) и определять актуальное значение критического напряжения и текущий запас устойчивости нагрузки при реализации противоаварийного управления по принципу I-ДО или непосредственно в режиме реального времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты выполненной работы состоят в следующем.

1. Предложен новый способ контроля устойчивости узлов двигательной нагрузки, основанный на on line контроле критических параметров и вводе управляющих воздействий (УВ), предотвращающих нарушение устойчивости.

2. Предложен новый метод определения критических параметров в узле комплексной нагрузки с возможностью работы в режиме реального времени.

3. Идентификация параметров схемы замещения комплексной нагрузки на основе переопределённой системы уравнений позволяет получать критические параметры узлов нагрузки с допустимой погрешностью (менее 5%).

4. Разработанный алгоритм определения критического напряжения в узлах комплексной нагрузки может функционально являться частью АОСН, АЧР, АПНУ и определять актуальное значение критического напряжения и текущий запас устойчивости нагрузки при реализации противоаварийного управления по принципу I-ДО или непосредственно в режиме реального времени.

5. Разработаны и предложены рекомендации по повышению достоверности идентификации параметров схемы замещения и определения критических режимных параметров нагрузки.

6. Подготовлена и подана заявка на патент способа контроля устойчивости узлов двигательной нагрузки и разработано техническое задание на устройство для его реализации.

СОКРАЩЕНИЯ

АД:	асинхронный двигатель
АПНУ:	автоматика предотвращения нарушения устойчивости
АЧВР:	автоматический частотный ввод резерва
АЧР:	автоматическая частотная разгрузка
ГЛОНАСС:	глобальная навигационная спутниковая система
ДХН:	динамическая характеристика нагрузки
ЕЭС:	единая энергосистема
ЗАО «ИАЭС» :	ЗАО «Институт автоматизации энергетических систем»
КЗ:	короткое замыкание
КПА-М:	комплекс противоаварийной автоматики многофункциональный, производства ЗАО «ИАЭС»
МЭК:	международная электротехническая комиссия
МЭС:	Магистральные электрические сети
НГТУ:	Новосибирский государственный технический университет
ОЭМ:	обобщённая электрическая машина
СИБНИИЭ:	Сибирский научно-исследовательский институт энергетики
СМНР:	система мониторинга переходных режимов
СОЕВ:	система обеспечения единого времени
СО ЕЭС:	Системный оператор Единой энергетической системы
СО РАН:	Сибирское отделение Российской академии наук
СХН:	статическая характеристика нагрузки
ПАО «ФСК ЕЭС»:	Публичное акционерное общество «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы»
ХХ:	холостой ход
ШБМ:	шины бесконечной мощности
ЭДС:	электродвижущая сила
ЭС:	энергетическая система

- GPS: Global Positioning System, глобальная система позиционирования – спутниковая система навигации, разработанная, реализованная и эксплуатируемая Минобороны США
- PMU: Phasor measurement unit – блок векторных измерений
- UCTE: Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity – Объединённая европейская энергосистема
- WAMS: Wide area measurement system, система распределенных векторных измерений
- 1-ДО: принцип противоаварийного управления, основанный на выборе управляющих воздействий «до» возникновения аварии

ТЕРМИНЫ

Вектор состояния:	вектор, содержащий полную информацию о состоянии системы
Достоверность идентификации параметров нагрузки:	соответствие параметров нагрузки, определённых в результате идентификации, соответствующим реальным параметрам
Идентификация:	определение структуры и параметров математической модели динамического объекта, которые обеспечивают наилучшую близость значений выходных величин модели и объекта по заданному критерию подобия при одних и тех же входных воздействиях
Параметрическая идентификация:	определение параметров и переменных состояния математической модели при её известной структуре
Идентификация состава нагрузки узла:	определение структуры узла нагрузки
Критическое напряжение узла нагрузки:	напряжение узла нагрузки, ниже которого происходит нарушение статической устойчивости двигателей, входящих в состав узла нагрузки
Критическое напряжение центра питания:	напряжение питающего узла нагрузки, ниже которого происходит нарушение статической устойчивости двигателей, входящих в состав узла(-ов) нагрузки, питаемого(-ых) от данного узла
Критическое скольжение АД:	скольжение, при котором АД развивает максимальный вращающий момент
Метод максимального правдоподобия:	метод оценивания неизвестного параметра путём максимизации функции правдоподобия

Метод наименьших квадратов:	метод, основанный на минимизации суммы квадратов отклонений некоторых функций от искомым переменных
Опрокидывание режима АД:	аварийный режим АД, при котором он останавливается или реверсирует
Преобразование Лапласа:	интегральное преобразование, связывающее функцию комплексного переменного (изображение) с функцией вещественного переменного (оригинал)
Сплайсинг:	исключение из разрывной во времени кусочно-экспоненциальной функции интервалов времени, на которых значение функции уменьшается, и восстановление непрерывной экспоненциальной функции
Узел комплексной нагрузки:	узел нагрузки, имеющий в своём составе двигательную и прочую нагрузку, которая может быть представлена эквивалентным шунтом
Фильтр Калмана:	эффективный рекурсивный фильтр, оценивающий вектор состояния динамической системы, используя ряд неполных или зашумлённых измерений

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах : учеб. для электроэнергетич. спец. вузов / В. А. Веников. – 4-е изд., перераб. и доп. / В.А. Веников. – М. : Высш. шк., 1985. – 536 с.
2. Развитие технологий векторной регистрации параметров режима в ЕЭС России / Б. И. [и др.] // Энергетика глазами молодёжи : сб. докл. всерос. науч.-техн. конф. Т. 1. – Екатеринбург, 2010. – С. 58–64.
3. Жуков А. В. Развитие технологий мониторинга и управления в ЕЭС России на базе системы мониторинга переходных режимов / А. В. Жуков, Е. И. Сацук, Д. М. Дубинин // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем : сб. докл. IV междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2013. – С. 45–49.
4. Опыт создания автоматической системы сбора информации с регистраторов системы мониторинга переходных режимов в ОАО «СО ЕЭС» / Ф. Н. Гайдамакин, Д. Н. Топорков, А. В. Данилин, Д. М. Дубинин // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем : сб. докл. IV междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2013. – С. 57–61.
5. Каширских В. Г. Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей : монография / В. Г. Каширских. – Кемерово : Изд-во ГУ КузГТУ, 2005. – 139 с.
6. Андреев М. А. Идентификация параметров асинхронного электропривода на интервалах коммутации силовых ключей автономного инвертора / М. А. Андреев // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – № 3(37). – С. 68–71.
7. Андреев М. А. Параметрическая идентификация асинхронного электропривода в режиме реального времени : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / М. А. Андреев. – СПб, 2010. – 18 с.

8. Глазырин А. С. Идентификация параметров асинхронных электродвигателей с неподвижным короткозамкнутым ротором на основе разностных схем / А. С. Глазырин, Е. В. Боловин // Изв. Томск. политехн. ун-та. – Томск, 2012. – № 5. – С. 101–105.

9. Глазырин А. С. Разработка и лабораторное апробирование метода идентификации параметров электродвигателей на основе разностных схем / А. С. Глазырин, Е. В. Боловин // Изв. Томск. политехн. ун-та. – Томск, 2012. – Т. 321, № 4. – С. 112–115.

10. Glazyrin A. S. Time delay adjustment for the method of parameter identification of dynamic object / A. S. Glazyrin, E. V. Bolovin // Aktualne problemy nowjczesnych nauk-2012: Materialy VIII Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. – Пшемысль, 7–15 czerwca 2012. – Przemysl: Nauka i studia. – 2012. – Т. 45. – С. 79–81.

11. Тутундаева Д. В. Мониторинг запасов статической устойчивости энергосистемы с контролем напряжения на шинах нагрузки / Д. В. Тутундаева, А. Г. Фишов // Энергетика глазами молодёжи : сб. докл. всерос. науч.-техн. конф. Т. 1. – Екатеринбург, 2010. – С. 194–199.

12. Педан А. С. Идентификация параметров схемы замещения нагрузки по данным СМПР и определение критических напряжений / А. С. Педан, А. Г. Фишов // Энергетика глазами молодёжи : сб. докл. всерос. науч.-техн. конф. Т. 1. – Екатеринбург, 2010. – С. 114–116.

13. Фишов А. Г. Мониторинг запасов устойчивости энергосистем по данным СМПР с идентификацией и использованием собственных и взаимных проводимостей ЭДС эквивалентных генераторов / А. Г. Фишов // Энергетика глазами молодёжи : сб. докл. всерос. науч.-техн. конф. Т. 1. – Екатеринбург, 2010. – С. 24–27.

14. Дехтерев А. И. Особенности расчёта запасов статической устойчивости в режиме реального времени / А. И. Дехтерев, А. Г. Фишов // Энергетика глазами молодёжи : сб. докл. всерос. науч.-техн. конф. Т. 1. – Екатеринбург, 2010. – С. 226–231.

15. Соболева М. А. Определение предельных режимов электроэнергетической системы на основе матрицы собственных и взаимных проводимостей ЭДС эквивалентных генераторов / М. А. Соболева, А. Г. Фишов // *Электричество*. – 2013. – № 8. – С. 9–14.

16. Фишов А. Г. Идентификация структуры эквивалентной энергосистемы с учётом взаимных движений роторов генераторов по данным СМПП / А. Г. Фишов, К. Ю. Поляков // *Энергетика глазами молодёжи : сб. докл. всерос. науч.-техн. конф. Т. 1.* – Екатеринбург, 2010. – С. 117–121.

17. Бартоломей П. И. Определение параметров схемы замещения электрической сети по измерениям средствами векторной регистрации / П. И. Бартоломей, А. А. Голиков, А. А. Суворов // *Энергетика глазами молодёжи : сб. докл. всерос. науч.-техн. конф. Т. 1.* – Екатеринбург, 2010. – С. 208–212.

18. Гучапшев Х. М. Идентификация параметров моделей асинхронных двигателей для систем электроснабжения по частотным характеристикам : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Х. М. Гучапшев. – Краснодар, 1998. – 20 с.

19. Идентификация электрических параметров тяговых асинхронных двигателей электровозов / О. Н. Синчук, В. Ю. Захаров, И. О. Синчук, Л. В. Сменова // *Электротехнические и компьютерные системы*. – Одесса, 2013. – № 10(86). – С. 50–59.

20. Устройство оценивания параметров асинхронного двигателя : пат. 2426219 Рос. Федерация: МПК Н 02 Р 7/06 / Макаров В.Г., Афанасьев А.Ю., Яковлев Ю.А.; заяв. и патентообладатель Казань, ГОУ ВПО КГТУ. – № 2010112365/07; заявл. 30.03.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. №22. – 25 с.: ил.

21. Величко Г. В. Метод идентификации параметров асинхронных трёхфазных двигателей ориентированных на использование в автоматизированном электроприводе / Г. В. Величко // *Автоматизация и управление в машиностроении*. – 2000. – № 11. – С. 22–28.

22. Нестеровский А. В. Оперативная идентификация асинхронных электродвигателей в составе электропривода промышленных установок :

автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / А. В. Нестеровский. – Кемерово, 2005. – 20 с.

23. Мирсаитов К. М. Метод идентификации параметров ротора асинхронного двигателя на ходу / К. М. Мирсаитов // Вестн. СевГТУ. – Севастополь, 2008. – № 88. – С. 121–124.

24. Нгуен К. Т. Адаптивная идентификация параметров тяговых асинхронных электродвигателей в реальном масштабе времени / К.Т. Нгуен, В.З. До // Сб. науч. тр. 65-ой междунар.й науч.-техн. конф. ассоц. автомобильных инженеров. – М., 2005. – С. 105–110.

25. Пискунов А. А. Стохастическая параметрическая идентификация электроприводов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / А. А. Пискунов. – СПб., 2006. – 18 с.

26. Однолько Д.С. Синтез и исследование алгоритма оценки активного статорного сопротивления асинхронного двигателя при неподвижном роторе / Д.С. Однолько // Изв. вузов и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2012. – №2. – С. 33–39.

27. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния / П. Эйкхофф. – М. : Мир, 1975. – 687 с.

28. Спици К. Теория управления: Идентификация и оптимальное управление / К. Спици, Р. Браун, Дж. Гудвин. – М. : Мир, 1973. – 248 с.

29. Штейнберг Ш. Е. Идентификация в системах управления / Ш. Е. Штейнберг. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 80 с.

30. Войтенков И. Н. Методы и средства дифференциального оценивания и идентификации моделей / И. Н. Войтенков. – Киев : Нова думка, 1989. – 286 с.

31. Гришин В. Н. Модели, алгоритмы и устройства идентификации сложных схем / В. Н. Гришин, В. А. Дятлов, Л. Т. Милов. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 104 с.

32. Ванг Ю. Динамический метод определения параметров модели асинхронного двигателя / Ю. Ванг [и др.] // Conf. Proc. IEEE Southeastcon 82. – New-York, U.S.A. – 1982. – P. 430–438.

33. Хилленбранд Ф. Метод определения частоты вращения и потока ротора асинхронного электродвигателя посредством измерения только величин на клеммах / Ф. Хилленбранд // IFAC Contr. Power Electron. and Elec.Drives, 3. – 1984. – P. 55–62.

34. Потапенко Е. М. Определение скорости и постоянной времени ротора асинхронного двигателя с помощью адаптивного наблюдателя / Е.М. Потапенко, Е.Е. Потапенко, А.В. Соломаха // Автоматика-2005 : материалы 12 междунар. конф. по автоматическому управлению. – Харьков : Изд-во НТУ «ХПИ». – 2005. – Т. 2. – С. 123–124.

35. Столяров И. М. Определение параметров асинхронной машины / И. М. Столяров, З. Н. Слепцова // Изв. вузов. Горный журнал. – 1984. – № 10 – С. 96–98.

36. Столяров И. М. Метод косвенной оценки параметров и устройство для определения координат асинхронного двигателя / И. М. Столяров, Г. А. Синельников, Н. И. Литвинов // Изв. вузов. Горный журнал. – 1984. – № 10 – С. 102–105.

37. Определение параметров условно-нелинейной модели асинхронной машины / Ю. А. Берюляев [и др.] // Электрическое моделирование. – 1985. – № 5. – С. 89–92.

38. Deleroi W. Определение параметров асинхронных машин по результатам измерений под нагрузкой / W. Deleroi // Etz. Arch. – 1985. – № 10. – С. 329–336.

39. Павлина В. Ф. Способ экспериментального определения параметров электрических машин переменного тока / В.Ф. Павлина, С. В. Семёнова // Техническая электродинамика. – 1986. – №5. – С. 62–66.

40. Лебедев С. К. Алгоритмы синтеза наблюдателей нагрузки электропривода / С. К. Лебедев, А.А. Коротков // Вестн. ИГЭУ. – 2009. – № 3. – С. 5–8.

41. Nene V. D. Optimal Tracking of the Dynamic Performance of an Induction Machine / V. D. Nene // *Electric Machines and Electromechanics*. – 1982. – № 7. – P. 27–34.

42. Alonge F. Parameter Identification of a Mathematical Model of Induction Motors Via Least Square Technics / F. Alonge, F. D`Ippolo, La.S. Barbera, F.M. Raimondi // *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications Trieste, Italy, 1-4 September*. – 1998. – P. 491–496.

43. Moons C. Parameter Identification of Induction Motor Drivers / C. Moons, De.B. Moor // *Automatica*. – 1995. – Vol.31, № 8. – P. 1137–1147.

44. Liu J. Speed estimation of induction motor using a non-linear identification technique / J. Liu, I. Kung, H. Chao // *Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A)*. – 2001. – Vol. 25, № 2. – P. 107–114.

45. Ouhrouche M. A. Estimation of speed, rotor flux and rotor resistance in cage induction motor using the EKF algorithm / M. A. Ouhrouche // *International Journal of Power and Energy Systems*. – 2002. – P. 1–20.

46. Kwynke M. Расчетно-экспериментальный метод определения электромагнитных параметров асинхронного двигателя с широкополосным ротором / М. Kwynke // *Zesz. Nauk. Plodz. Elek.* –1985. – № 78. – С. 5–16.

47. Водовозов А. М. Идентификация параметров асинхронной машины в установившихся режимах / А. М. Водовозов, А. С. Елюков // *Вестн. ИГЭУ*. – Иваново, 2010. – № 2. – С. 69–71.

48. Водовозов А. М. Помехозащищенные алгоритмы параметрической идентификации электромеханических систем / А. М. Водовозов, А. С. Елюков // *Приборостроение*. – 2009. – № 12. – С. 40–43.

49. Пересада С. М. Робастный алгоритм идентификации параметров асинхронного двигателя при неподвижном роторе / С. М. Пересада, С. Н. Ковбаса, М. П. Малько // *Вестн. КДУ им. М. Остроградского*. – Киев, 2010. – №3/2010 (62), Ч. 1 – С.121–124.

50. Переседа С. М. Оценка параметров асинхронного двигателя при известном активном сопротивлении статора / С. М. Переседа, А. Н. Серeda // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ». – Киев, 2004. – № 43. – С. 28–31.

51. Переседа С. М. Новый алгоритм идентификации электрических параметров асинхронного двигателя на основе адаптивного наблюдателя полного порядка / С. М. Переседа, А. Н. Серeda // Техническая электродинамика. – 2005. – №5. – С. 32–40.

52. Переседа С. М. Аналитическое решение проблемы идентификации параметров асинхронного двигателя / С. М. Переседа, С. Н. Ковбаса, А. Н. Серeda // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ». – 2005. – №45. – С. 47–50.

53. Каширских В. Г. Идентификация параметров обмотки статора и цепи намагничивания асинхронного двигателя с помощью расширенного фильтра Калмана / В. Г. Каширских, В. М. Завьялов // Вестн. КузГТУ. – 2002. – № 3. – С. 17–21.

54. Каширских В. Г. Идентификация параметров асинхронного электродвигателя с помощью метода наименьших квадратов / В. Г. Каширских, В. М. Завьялов, Д. В. Соколов // Вестн. КузГТУ. – Кемерово, 2002. – № 2. – С. 17–19.

55. Каширских В. Г. Идентификация параметров асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором / В. Г. Каширских, В. М. Завьялов, Д. В. Соколов // Проблемы развития автоматизированного электропривода : тр. Всерос. науч.-практ. конф. – Новокузнецк : Изд-во СибГИУ, 2002. – С. 81–82.

56. Каширских В. Г. Идентификация параметров и состояния асинхронных электродвигателей в установившемся режиме работы / В. Г. Каширских, В. М. Завьялов // Математические методы в технике и технологиях–ММТТ-17 : сб. тр. 17 международ. науч. конф. – Кострома : Изд-во КГТУ, 2004. – Т. 5. – С. 170–172.

57. Каширских В. Г. Идентификация параметров и состояния асинхронного электродвигателя в реальном времени / В. Г. Каширских, В. М.

Завьялов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-17 : сб. тр. 17 междунаро. науч. конф. – Кострома : Изд-во КГТУ, 2004. – Т. 5. – С. 175–177.

58. Каширских В. Г. Идентификация асинхронных электродвигателей / В. Г. Каширских, В. М. Завьялов // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве : тр. 4 всерос. науч.-практ. конф., 8-10 дек. 2003. – Новокузнецк : Изд-во СибГИУ, 2003. – С. 289–292.

59. Каширских В. Г. Определение кривой намагничивания асинхронного электродвигателя по результатам испытания на холостом ходе / В. Г. Каширских, В. М. Завьялов, Д. В. Соколов // Вестн. КузГТУ. – Кемерово, 2002. – № 2. – С. 14–16.

60. Каширских В. Г. Определение индуктивности ротора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / В. Г. Каширских, В. М. Завьялов // Вестн. КузГТУ. – Кемерово, 2003. – № 1. – С. 20–21.

61. Каширских В. Г. Определение в реальном времени активного сопротивления и потокосцепления ротора асинхронного двигателя при его работе в установившемся режиме / В. Г. Каширских, В. М. Завьялов // Вестн. КузГТУ. – Кемерово, 2003. – № 1. – С. 21–24.

62. Каширских В. Г. Определение кривой намагничивания асинхронного электродвигателя / В. Г. Каширских, В. М. Завьялов, Д. В. Соколов // Проблемы развития автоматизированного электропривода : тр. всерос. науч.-практ. конф. – Новокузнецк : Изд-во СибГИУ, 2002. – С. 85–87.

63. Каширских В. Г. Определение активного сопротивления обмотки статора асинхронного двигателя по опыту пуска / В. Г. Каширских, А. В. Нестеровский // Вестн. КузГТУ, 2004. – № 6. – С. 64–65.

64. Каширских В. Г. Анализ шумовых процессов в измерительной схеме асинхронного двигателя / В. Г. Каширских, В. М. Завьялов, А. В. Нестеровский // Вестн. КузГТУ. – Кемерово, 2003. – № 2. – С. 12–14.

65. Каширских В. Г. Анализ шумов измерительной схемы при динамической идентификации асинхронного двигателя / В. Г. Каширских,

В. М. Завьялов, А. В. Нестеровский, С. С. Переверзев // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях : тр. 2 Всерос. науч.-практ. конф. – Новокузнецк : Изд-во СибГИУ, 2004. – С. 93–97.

66. Каширских В. Г. Оценка параметров и состояния асинхронного двигателя при динамической нагрузке / В. Г. Каширских, В. М. Завьялов ; Кузбас. гос. техн. ун-т. – М., 2002. – 11 с.

67. Каширских В. Г. Оценка параметров и состояния асинхронного двигателя при установившемся режиме работы / В. Г. Каширских, В. М. Завьялов ; Кузбас. гос. тех. ун-т. – М., 2002. – 11 с.

68. Каширских В. Г. Оценка активных сопротивлений и потокосцепления ротора асинхронных двигателей в реальном времени / В. Г. Каширских, В. М. Завьялов // Электроэнергетика, электроэнергетические системы и комплексы : материалы междунар. науч.-техн. конф., 3-5 сент. 2003. – Томск : Изд-во ТПУ, 2003. – С. 30–33.

69. Каширских В. Г. Оценка активного сопротивления ротора асинхронного электродвигателя с помощью нейронной сети / В. Г. Каширских, А. В. Нестеровский // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-17 : сб. тр. 17-й междунар. науч. конф. в 10 т. / под общ. ред. В. С. Балакирева. – Кострома : Изд-во Костром. гос. технолог. ун-та, 2004. – Т. 5. Секция 5. – С. 161–163.

70. Каширских В. Г. Оценка параметров ротора асинхронного электродвигателя с помощью искусственной нейронной сети / В. Г. Каширских, А. В. Нестеровский // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях : тр. 2 всерос. науч.-практ. конф. / под общ. ред. В. Ю. Островляничка, П. Н. Кунина. – Новокузнецк : Изд-во СибГИУ, 2004. – С. 87–90.

71. Каширских В. Г. Оценка индуктивности цепи намагничивания асинхронного электродвигателя в процессе его работы / В. Г. Каширских, А. В. Нестеровский // Вестн. КузГТУ. – Кемерово, 2005. – № 2. – С. 28–29.

72. Каширских В. Г. Динамическая идентификация параметров ротора асинхронного электродвигателя с помощью искусственной нейронной сети / В. Г. Каширских, А. В. Нестеровский // Вестн. КузГТУ. – Кемерово, 2004. – № 4. – С. 50–51.

73. Каширских В. Г. Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей с учётом значимости параметров / В. Г. Каширских, А. В. Нестеровский // Вестн. КузГТУ. – Кемерово, 2005. – С. 73–74.

74. Каширских В. Г. Автоматизированный испытательный комплекс для идентификации параметров асинхронных электродвигателей горных машин / В. Г. Каширских, В. М. Завьялов // Горный информ.-аналит. бюл. – Кемерово, 2004. – № 6. – С. 299–302.

75. Каширских В. Г. Структура вычислительной части испытательного стенда для оценки параметров и состояния асинхронных электродвигателей / В. Г. Каширских, В. М. Завьялов // Вестн. КузГТУ. – Кемерово, 2003. – № 3. – С. 63–65.

76. Компьютеризированный испытательный комплекс для динамической идентификации взрывозащищённых асинхронных электродвигателей / В. Г. Каширских, В. М. Завьялов, А. В. Нестеровский, С. С. Переверзев // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности : тр. междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово : Изд-во КузГТУ, 2004. – С. 145–146.

77. Завьялов В. М. Определение частоты вращения ротора асинхронного двигателя с помощью цифровой фильтрации / В. М. Завьялов, А. В. Нестеровский, Д. О. Мефферт // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях : тр. 3 всерос. науч.-практ. конф., 16-18 мая 2006. – Новокузнецк : Изд-во СибГИУ, 2006. – С. 95–98.

78. Завьялов В. М. Идентификация механической подсистемы электроприводов напора и подъёма карьерного экскаватора / В. М. Завьялов, И. Ю. Семькина // Современные пути развития машиностроения и

автотранспорта Кузбасса : тр. 1 всерос. науч.-техн. конф., 24-25 окт. 2007. – Кемерово : Изд-во КузГТУ, 2007. – С. 335–339.

79. Завьялов В. М. Оперативная оценка параметров и состояния асинхронных электродвигателей в составе регулируемого электропривода : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / В. М. Завьялов. – Кемерово, 2003. – 151 с.

80. Пискунов А. А. Параметрическая идентификация линейной дискретной системы статистическими методами / А. А. Пискунов // Молодые исследователи – региону : материалы всерос. науч. конф. студентов и аспирантов. – Вологда : Изд-во ВоГТУ, 2005. – С. 331–333.

81. Пискунов А. А. Определение параметров асинхронного электропривода методом статистической идентификации / А. А. Пискунов // Информационные технологии моделирования и управления. – Воронеж, 2006. – № 7(25). – С. 965–969.

82. Пискунов А. А. О выборе оптимального интервала испытаний в методе статистической идентификации параметров динамических систем / А. А. Пискунов, А. М. Водовозов // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях : тр. XI междунар. электр. науч. конф. – Воронеж : Изд-во ЦЧКИ, 2006. – С. 297–298.

83. Водовозов А. М. О сходимости метода статистической идентификации параметров динамических систем / А. М. Водовозов, А. А. Пискунов // Информационные технологии моделирования и управления. – Воронеж, 2005. – № 4(22). – С. 530–534.

84. Водовозов А. М. К вопросу об идентификации линейных динамических систем по результатам экспериментальных исследований / А. М. Водовозов, А. С. Елюков // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – № 2 (32). – С. 253–256.

85. Водовозов А. М. О выборе области преобразования в задачах параметрической идентификации динамических объектов / А. М. Водовозов, А. С. Елюков // Информационные технологии моделирования и управления. – 2009. – № 2(54). – С. 185–188.

86. Панкратов В. В. Идентификация электромагнитных переменных асинхронных электрических машин / В. В. Панкратов, М. В. Глазырин // Автоматизированный электропривод : тез. докл. 1 междунар. науч. конф. – СПб., 1995. – С. 155.

87. Панкратов В. В. Задачи синтеза алгоритмов идентификации для бездатчиковых асинхронных электроприводов с векторным управлением и варианты их решения / В. В. Панкратов, М. О. Маслов // Силовая интеллектуальная электроника. – 2007. – № 1(6). – С. 23–43.

88. Панкратов В. В. Синтез адаптивного идентификатора потокосцеплений и активных сопротивлений асинхронного двигателя для систем векторного управления / В. В. Панкратов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1997. – № 3. – С. 65–68.

89. Жандаров А. М. Идентификация и фильтрация измерений состояний стохастических систем / А. М. Жандаров. – М. : Наука, 1979. – 112 с.

90. Архангельский Н. Л. Система векторного управления асинхронным электроприводом с идентификатором состояния / Н. Л. Архангельский, Б. С. Курнышев, А. Б. Виноградов // Электричество. – 1991. – № 11. – С. 47–51.

91. Изосимов Д. Б. Идентификация частоты вращения и составляющих вектора потокосцепления ротора асинхронного двигателя по измерениям токов и напряжений обмоток статора / Д. Б. Изосимов, С. Е. Рыбкин // Электричество. – 2005. – № 4. – С. 32–40.

92. Денисов В. И. Активная идентификация стохастических линейных дискретных систем, описываемых моделями в пространстве состояний и ARMAX-моделями / В. И. Денисов, И. Л. Еланцева, В. М. Чубич // Сиб. журн. индустр. математики. – 2000. – Т. III, № 1(5). – С. 87–100.

93. Денисов В. И. Активная идентификация стохастических линейных дискретных систем во временной области / В. И. Денисов, В. М. Чубич, О. С. Черникова // Сиб. журн. индустр. математики. – 2003. – Т. VI, № 3(15). – С. 70–87.

94. Денисов В. И. Активная идентификация стохастических линейных дискретных систем в частотной области / В. И. Денисов, В. М. Чубич, О. С. Черникова // Сиб. журн. индустр. математики. – 2007. – Т. X, №1(29). – С. 71–89.
95. Грооп Д. Методы идентификации систем / Д. Грооп. – М. : Мир, 1979. – 522 с.
96. Рогозин Г. Г. Способ идентификации асинхронной машины по экспериментальным данным её динамического режима / Г. Г. Рогозин, Н. Г. Пятлица // Электричество. – 1981. – №4. – С. 47–49.
97. Сивокобыленко В. Ф. Определение параметров асинхронных машин из динамических режимов / В. Ф. Сивокобыленко, В. В. Совпель // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1977. – № 3. – С. 163–166.
98. Соколов М. М. Метод экспериментального определения параметров асинхронного двигателя / М. М. Соколов, Л. В. Масандилов, В. Н. Грасевич // Электротехника. – 1977. – № 1. – С. 26–29.
99. Соколов М. М. Метод экспериментального определения параметров асинхронного двигателя / М. М. Соколов, Л. Б. Масандилов, В. Н. Грасевич // Электротехника. – 1974. – № 11. – С. 12–14.
100. Столов Л. И. К вопросу об определении параметров схемы замещения асинхронного двигателя малой мощности / Л. И. Столов // Электричество. – 1962. – № 5. – С. 75.
101. Попов В. И. К экспериментальному определению параметров схемы замещения асинхронной машины / В. И. Попов, Л. Н. Макаров // Электричество. – 1993. – № 7. – С. 49.
102. Новиков Ю. Д. Экспериментальное определение индуктивностей рассеяния асинхронных двигателей / Ю. Д. Новиков, З. Гентковски, Ю. В. Бабин // Электротехника. – 1982. – № 3. – С. 22–24.
103. Лысцов А. Я. Экспериментальное определение параметров асинхронной машины с короткозамкнутым ротором / А. Я. Лысцов // Изв. ВУЗов. Энергетика. – 1967. – № 3. – С. 22.

104. Беляев В. П. А. К вопросу об определении параметров схемы замещения асинхронного двигателя / В. П. Беляев, Г. А. Пардо // Изв. ВУЗов. Энергетика. – 1990. – № 5. – С. 18–21.

105. Ле Конг Зань. Управление режимами активно-адаптивных электрических сетей на основе моделирования и параметрической идентификации узлов нагрузки : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Ле Конг Зань. – Иркутск, 2015. – 187 с.

106. Вопросы устойчивости электрических систем / под ред. Л. А. Жукова. – М. : Энергия, 1979. – 456 с.

107. Веретенников Л. П. Теория и методы исследования процессов в судовых электроэнергетических системах / Л. П. Веретенников. – Л. : Судостроение, 1975. – 375 с.

108. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Энергия, 1980. – 926 с.

109. Мелешкин Г. А. Переходные режимы судовых электроэнергетических систем / Г. А. Мелешкин. – Л. : Судостроение, 1971. – 342 с.

110. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы / С. А. Ульянов. – М. : Энергия, 1970. – 518 с.

111. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И. А. Сыромятников. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

112. Строительство ВЛ 220 кВ Кызыльская – Чадан с реконструкцией ПС 220 кВ Кызыльская и ПС 220 кВ Чадан. Строительство ВЛ 220 кВ Кызыльская – Чадан : проектная док. // Разд. 3. Технологические и конструктивные решения линейного объекта. Искусственные сооружения. Подразд. 5. Противоаварийная автоматика ВЛ. – Л2202143-2805-1035.1-Т3.5-ТКР / ЗАО «Институт автоматизации энергетических систем». – Новосибирск, 2011. – Т. 3.5. – С. 25–31.

113. Бердин А. С. Модели и методы информационного обеспечения систем управления электрическими режимами, контроля качества и потерь электроэнергии : автореф. дис. ... д-р техн. наук : 05.14.02 / А. С. Бердин. – Екатеринбург, 2000. – 42 с.

114. Бердин А. С. Формирование параметров модели ЭЭС для управления электрическими режимами / А. С. Бердин, П. А. Крючков. – Екатеринбург : Изд-во УГТУ, 2000. – 107 с.

Акты внедрения



ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
**ИНСТИТУТ АВТОМАТИЗАЦИИ
 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

630132, г. Новосибирск 132,
 ул. Железнодорожная, 12/1
 630091, г. Новосибирск 91,
 а/я 162
 тел./факс (383)-363-02-65
 e-mail: iaes@iaes.ru

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ЗАО «Институт автоматизации
 энергетических систем»

Ландман А.К.

(М.П.)



« 03 » 2016 г.

Акт внедрения

результатов диссертационной работы

Чершовой Валерии Олеговны

Директор департамента проектирования Попов Г.П. составил настоящий акт о том, что результаты исследований, проведенных в диссертационной работе «Контроль устойчивости узлов двигательной нагрузки электрических сетей в режиме реального времени» внедрены в процесс проектирования устройств противоаварийной автоматики (ПА) для объектов электроэнергетической системы. Предложенный способ определения критических параметров и управления нагрузкой реализуется на базе Комплекса противоаварийной автоматики – КПА-М (разработка и производство ЗАО «ИАЭС», г. Новосибирск). Устройства КПА-М, реализующие указанный способ, планируются к установке на нескольких объектах МЭС Сибири.

Попов Г.П.

Утверждаю

Проректор

по научной работе,

д.т.н., профессор

А.Г. Вострецов

2016



Акт внедрения

Результаты диссертационной работы Чершовой Валерии Олеговны внедрены в учебный процесс на кафедре автоматизированных электроэнергетических систем факультета энергетики НГТУ.

Предмет внедрения:

1. Способы контроля устойчивости узлов нагрузки энергосистемы с асинхронными двигателями.
2. Алгоритмы идентификации параметров схем замещения для контроля устойчивости узлов двигательной нагрузки.

Характер внедрения:

1. Использование в прототипе автоматики контроля устойчивости узлов двигательной нагрузки на физической модели энергосистем.
2. Использование результатов исследования студентами и аспирантами при изучении переходных процессов и устойчивости в электроэнергетических системах.

Декан ФЭН

к.э.н., доцент

Чернов С.С.