

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2016

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Фишов Александр Георгиевич

Официальные оппоненты: Бердин Александр Сергеевич
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Уральский энергетический институт, профессор кафедры «Автоматизированных электрических систем»

Планков Александр Анатольевич
кандидат технических наук
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», Энергетический институт, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита состоится: «23» июня 2016 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=15541

Автореферат разослан «__» апреля 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Анастасия Георгиевна Русина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 (СМНР). Одной из основных задач развития технологий СМНР 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 СМНР, 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, проверка 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.

Предмет исследования – способы и методы контроля устойчивости узлов двигательной нагрузки электрических сетей в режиме реального времени.

Объект исследования – узлы двигательной нагрузки электрических сетей.

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.

Личный вклад соискателя

В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит формализация поставленных задач, разработка способов, методов и алгоритмов определения критических параметров узлов двигательной нагрузки в режиме реального времени, тестирование алгоритмов при имитационном моделировании режимов ЭЭС, проведение при содействии сотрудников лаборатории кафедры АЭС НГТУ испытаний разработанных способов и методов на физической модели ЭЭС.

Объём 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 объём работы составляет 136 страниц, включая 29 таблиц и 26 рисунков.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю, заведующему кафедрой автоматизированных электроэнергетических систем (АЭС) НГТУ, д.т.н., профессору А.Г. Фишову за постоянную помощь в работе над диссертацией на всех этапах, к.т.н., заведующему лабораторией кафедры АЭС 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, отражена их практическая ценность, приведены краткое изложение содержания работы и основные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** выполнен обзор посвящённых устойчивости узлов нагрузки 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`.

Рассмотрен используемый в настоящее время метод определения запаса статической устойчивости нагрузки посредством её заблаговременной оценки, основанный на качественных физических характеристиках нагрузки в предположении, что для эквивалентного (всей нагрузки) асинхронного двигателя известны параметры схемы замещения (Веников В.А. *Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергетич. спец. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / В.А. Веников. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.*). Выявлены недостатки данного метода, такие как: отсутствие, как правило, информации о параметрах схемы замещения эквивалентной нагрузки в узле энергосистемы, изменимость параметров схемы замещения нагрузки при изменении режима работы сети и, как следствие, невозможность адекватной оценки актуального существующему режиму запаса статической устойчивости нагрузки без участия человека и в режиме реального времени. Отмечено, что на практике чаще используют усредненные ограничения и завышенный запас по устойчивости без расчета действительных ограничений.

Изложен существующий метод идентификации параметров асинхронных машин, а также определения критических напряжений узлов нагрузки при мониторинге запасов статической устойчивости энергосистемы (Каширских В.Г. *Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей: Монография / В.Г. Каширских. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2005. – 139 с.*).

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

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.

Изложен существующий метод управления режимами активно-адаптивных электрических сетей на основе моделирования и параметрической идентификации узлов нагрузки (Ле Конг Зань. Управление режимами активно-адаптивных электрических сетей на основе моделирования и параметрической идентификации узлов нагрузки: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.13.06 / Ле Конг Зань. – Иркутск, 2015. – 187 с.), отличающийся применением фазных координат и позволяющий решить задачу моделирования несинусоидальных режимов, возникающих при наличии частотно-регулируемых приводов.

Существующие методы имеют ряд недостатков, а именно: идентификация параметров АД не учитывает комплексный характер состава нагрузки и не связана с определением критических параметров узлов нагрузки, необходимых для управления режимами ЭЭС. Сформулирована задача дальнейших исследований – создание методов идентификации структуры и параметров узлов комплексной нагрузки, их связей с центрами питания, расчета критических параметров и запасов устойчивости без участия человека и работающих в режиме реального времени.

Глава 2 посвящена разработке способов, методов и алгоритмов определения критических параметров и запасов устойчивости узлов нагрузки при контроле её режимных параметров на шинах нагрузки или со стороны питающих узлов.

Критические режимные параметры АД, 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 1).

Для комплексной нагрузки, состоящей из асинхронного двигателя (АД) и статической нагрузки (схема №2 таблица 1), рассматривается схема замещения (рисунок 1) и система уравнений (1).

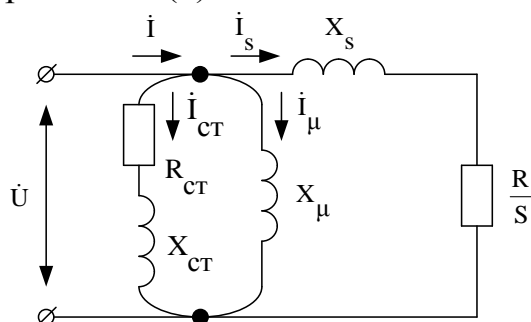


Рисунок 1 – Схема замещения комплексной нагрузки, состоящей из асинхронного двигателя и статической нагрузки

Таблица 1 – Возможные схемные ситуации АД, 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)	$S_{\text{КР}} = f(Z_{\text{ДВэКВ}}, Z_{\text{ЛэКВ}}, R_{\text{ст}}, X_{\text{ст}}),$ $U_{\text{КР}} = f(Z_{\text{ДВэКВ}}, Z_{\text{ЛэКВ}}, R_{\text{ст}}, X_{\text{ст}})$

$$\begin{cases} P_{\text{нагр.}i} = I_{\text{Si}}^2 R/S_i + I_{\text{cti}}^2 R_{\text{ст}} = \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{(R/S_i)^2 + X_S^2}} \right)^2 R/S_i + \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{R_{\text{ст}}^2 + X_{\text{ст}}^2}} \right)^2 R_{\text{ст}}, \\ Q_{\text{нагр.}i} = I_{\text{Si}}^2 X_S + I_{\text{cti}}^2 X_{\text{ст}} + I_{\mu i}^2 X_{\mu} = \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{(R/S_i)^2 + X_S^2}} \right)^2 X_S + \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{R_{\text{ст}}^2 + X_{\text{ст}}^2}} \right)^2 X_{\text{ст}} + \frac{U_{\text{нагр.}i}^2}{X_{\mu}}. \end{cases} \quad (1)$$

$i=1 \dots n.$

В системе уравнений (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 (1) являются 6 параметров:

R – активное сопротивление схемы замещения асинхронного двигателя,

X_S – индуктивное сопротивление рассеивания асинхронного двигателя,

X_μ – индуктивное сопротивление намагничивания АД,

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

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

S_i – значение скольжения ротора АД 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 , $U_{\text{нагр.}i}$) для ряда моментов времени $t_1 \dots t_i$ в независимых режимах (при значимых изменениях режимных параметров). Требуемое число комплектных измерений i определяется как минимум условием равенства в системе уравнений (1) количества уравнений количеству искомых величин, то есть, для определения $5+1 \cdot n$ неизвестных необходимо выполнить 5 комплектных измерений с независимыми уравнениями, что позволит составить систему из 10 уравнений. Для получения однозначного решения системы уравнений (1) численным способом достаточное число замеров n , как правило, превышает необходимое (т.е. должна решаться переопределенная система уравнений).

В результате решения системы уравнений (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:

$$S_{\text{КР}} = R/X_S, \quad (2)$$

критический ток:

$$I_{\text{КР.НАГР.}} = \frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{R/S_{\text{КР}}^2 + X_S^2}}, \quad (3)$$

критическая мощность АД:

$$P_{\text{КР.НАГР.}} = I_{\text{КР.НАГР.}}^2 \cdot R/S_{\text{КР}}, \quad (4)$$

критическое напряжение АД:

$$U_{\text{КР.НАГР.}} = I_{\text{КР.НАГР.}} \cdot \sqrt{(R/S_{\text{КР}})^2 + X_S^2}. \quad (5)$$

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

$$U_{\text{ПР.НАГР.}} = (1 + K_{\text{зан}}^U) \cdot U_{\text{КР.НАГР.}}, \quad (6)$$

$$P_{\text{ПР.НАГР.}} = \frac{P_{\text{КР.НАГР.}}}{1 + K_{\text{зан}}^P}. \quad (7)$$

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 (8) дополнительными неизвестными параметрами, помимо неизвестных системы (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 (8) предполагается постоянным при изменениях режима работы нагрузки. На рисунке 2 представлен случай, когда комплектные измерения режимных параметров производятся со стороны физического ЦП.

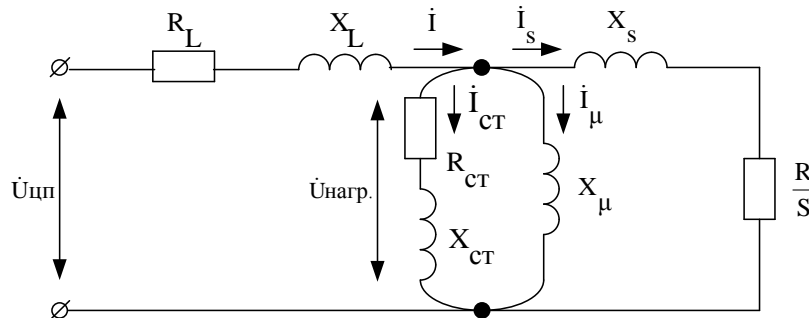


Рисунок 2 – Схема замещения комплексной нагрузки, питаемой через линию от центра питания

$$\begin{cases} P_{\text{нагр.}i} = P_{\text{ЦП}i} - \frac{\sqrt{P_{\text{ЦП}i}^2 + Q_{\text{ЦП}i}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ЦП}i}} \cdot R_L = \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{(R/S_i)^2 + X_s^2}} \right)^2 \cdot R/S_i + \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{R_{\text{ct}}^2 + X_{\text{ct}}^2}} \right)^2 \cdot R_{\text{ct}}, \\ Q_{\text{нагр.}i} = Q_{\text{ЦП}i} - \frac{\sqrt{P_{\text{ЦП}i}^2 + Q_{\text{ЦП}i}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ЦП}i}} \cdot X_L = \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{(R/S_i)^2 + X_s^2}} \right)^2 \cdot X_s + \frac{U_{\text{нагр.}i}^2}{X_\mu} + \left(\frac{U_{\text{нагр.}i}}{\sqrt{R_{\text{ct}}^2 + X_{\text{ct}}^2}} \right)^2 \cdot X_{\text{ct}}, \end{cases} \quad (8)$$

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 3),

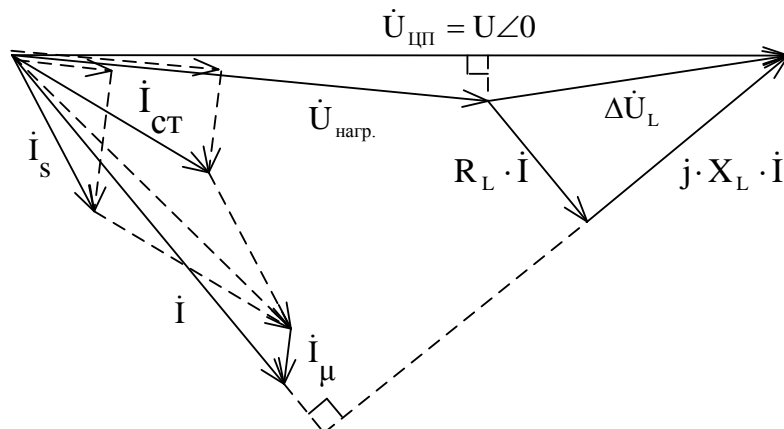


Рисунок 3 – Векторная диаграмма асинхронного двигателя и питающей линии

Для определения $7+1 \cdot n$ неизвестных в (8) необходимо выполнить минимально 7 комплектных 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 (8) относительно неизвестных параметров $R, X_S, X_\mu, S_i, R_{ст}, X_{ст}, R_L, X_L, U_{нагр.i}$. Для схемы замещения с известными параметрами определяются:

$$\bar{Z}_{\text{эКВ}} = \bar{Z}_L + \frac{\bar{Z}_{\text{дВ}} \cdot \bar{Z}_{\text{ст}} \cdot \bar{Z}_\mu \cdot (\bar{Z}_{\text{дВ}} + \bar{Z}_{\text{ст}})}{\bar{Z}_{\text{дВ}} \cdot \bar{Z}_{\text{ст}} + \bar{Z}_\mu \cdot (\bar{Z}_{\text{дВ}} + \bar{Z}_{\text{ст}})}, \quad (9)$$

$$I_{\text{ЦП}i} = \frac{U_{\text{ЦП}i}}{\bar{Z}_{\text{эКВ}}}, \quad (10)$$

$$P_{\text{ЦП}i} = I_{\text{ЦП}i}^2 \cdot \text{Re}(\bar{Z}_{\text{эКВ}}), \quad (11)$$

$$Q_{\text{ЦП}i} = I_{\text{ЦП}i}^2 \cdot \text{Im}(\bar{Z}_{\text{эКВ}}). \quad (12)$$

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

$$I_{\text{КР.ЦП}} = \frac{U_{\text{ЦП}}}{\bar{Z}_{\text{эКВ}}(S_{\text{КР}})}, \quad (13)$$

$$P_{\text{КР.ЦП}} = I_{\text{КР.ЦП}}^2 \cdot \text{Re}(\bar{Z}_{\text{эКВ}}(S_{\text{КР}})), \quad (14)$$

$$Q_{\text{КР.ЦП}} = I_{\text{КР.ЦП}}^2 \cdot \text{Im}(\bar{Z}_{\text{эКВ}}(S_{\text{КР}})), \quad (15)$$

$$U_{\text{КР.НАГР.}} = \sqrt{\left(U_{\text{ЦП}} - \frac{P_{\text{КР.ЦП}} \cdot R_L + Q_{\text{КР.ЦП}} \cdot X_L}{U_{\text{ЦП}}} \right)^2 + \left(\frac{P_{\text{КР.ЦП}} \cdot X_L - Q_{\text{КР.ЦП}} \cdot R_L}{U_{\text{ЦП}}} \right)^2}. \quad (16)$$

Определяется предельная мощность узла нагрузки с учетом заданных коэффициентов запаса:

$$P_{\text{ПР.ЦП}} = \frac{P_{\text{КР.ЦП}}}{1 + K_{\text{зан}}^P}. \quad (17)$$

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:

$$P_{\text{дВ}}(S) = P_0 = \text{const}, \quad (18)$$

соответствует уравнение:

$$P_{\text{дВ}} = I_{\text{дВ}}^2 \frac{R}{S} = \text{const}, \quad (19)$$

или:

$$\frac{U_{\text{нагр.i}}^2}{(R/S_i)^2 + X_S^2} \cdot R/S_i = \frac{U_{\text{нагр.i}}^2 \cdot R}{R^2/S_i + X_S^2 S_i} = \text{const}, \quad (20)$$

т.е.:

$$X_S^2 \cdot S_i + R/S_i = \frac{U_{\text{нагр}.i}^2 \cdot R}{P_{\text{дв}}}, \quad (21)$$

или:

$$X_S^2 \cdot S_i^2 - \frac{U_{\text{нагр}.i}^2 \cdot R \cdot S_i}{P_{\text{дв}}} + R = 0. \quad (22)$$

Критическое снижение напряжения ЦП, а затем предельно допустимое с учётом заданного коэффициента запаса определяется по расходимости вычислительного процесса.

$$U_{\text{пр.ЦП}} = (1 + K_{\text{зан}}^U) \cdot U_{\text{кр.ЦП}}. \quad (23)$$

На рисунке 4 представлен обобщённый алгоритм предлагаемого способа.

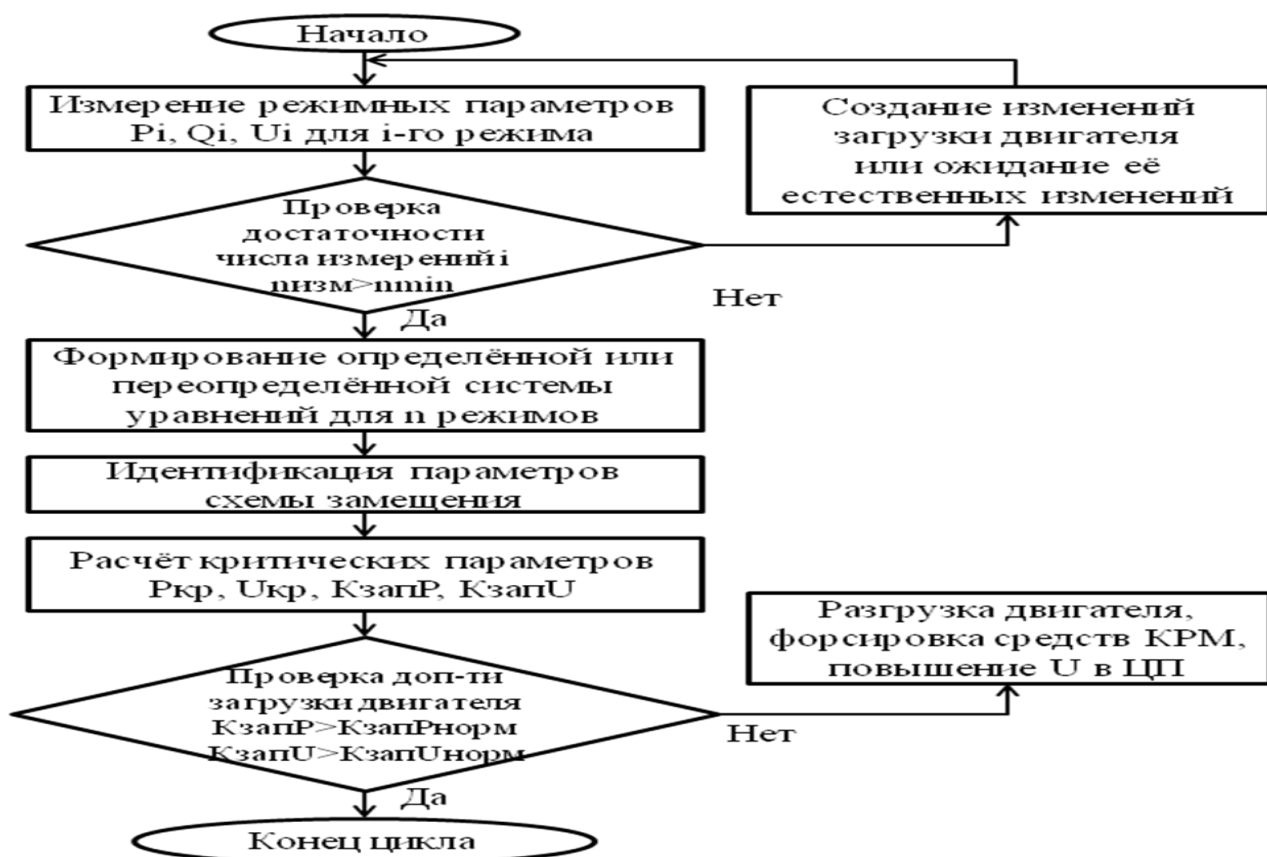


Рисунок 4 – Алгоритм способа контроля устойчивости узлов комплексной нагрузки

В главе 2 представлены результаты проверки адекватности результатов идентификации параметров математических моделей узлов нагрузки 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) и статической нагрузки, питающихся через линию

электропередачи от шин бесконечной мощности (ШБМ). Принципиальная схема первичных электрических соединений экспериментальной установки представлена на рисунке 5.

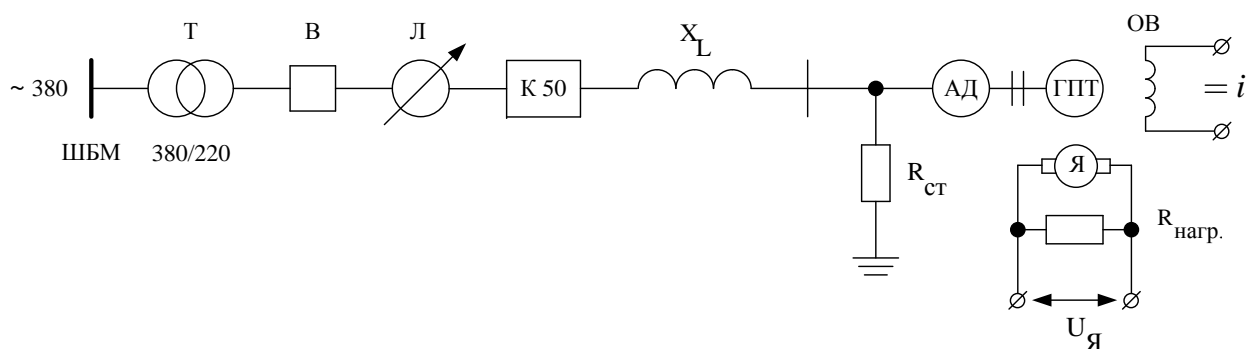


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки

Пояснения к рисунку 5:

ШБМ – шины бесконечной мощности,

Т – силовой трансформатор напряжением 380/220 В,

В – выключатель,

Л – лабораторный автотрансформатор 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,

ОБ – обмотка возбуждения,

Я – якорь асинхронного двигателя,

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

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 (1) или (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. 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.

В таблице 2 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 – 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_s , 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		-	-	-	-	-	-
$R_{ст}$, Ом	58,000	57,774	0,390	58,095	0,164	186,819	222,102
$X_{ст}$, 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		-	-	-	-	-	-
$S_{кр}$, о.е.	0,402	0,435	8,209	0,191	52,488	0,205	49,005
$U_{кр.нагр.}$, В	135,660	131,216	3,276	-	-	-	-
$U_{кр.цп}$, В	149,057	-	-	258,721	73,572	168,423	12,992

Как видно из таблицы 2, решение системы уравнений, в которой количество уравнений равно количеству искомых величин, даёт допустимую погрешность определения $U_{кр} < 5\%$ в случае схемы «узел нагрузки – ШБМ». В случае схемы «узел нагрузки – линия – ЦП» погрешность определения $U_{кр} > 5\%$, что является недопустимым. Для получения удовлетворительного решения системы уравнений необходимо применение дополнительных методов повышения достоверности результатов идентификации.

Таким образом, регистрограммы изменения режимов в узлах с комплексной нагрузкой позволяют производить идентификацию параметров схем замещения нагрузки и определение критических параметров на их основе. Разработанные алгоритмы дают возможность в темпе процесса вычислять критические параметры для узлов комплексной нагрузки и обеспечивать устойчивость нагрузки. Однако, идентификация параметров схемы замещения комплексной нагрузки на основе системы уравнений, в которой количество уравнений равно

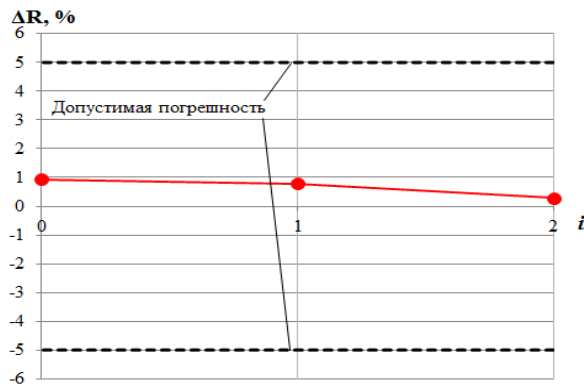
количеству искомым величин, может давать недопустимую погрешность результатов идентификации и критических параметров. Для повышения достоверности решения системы уравнений необходимо использовать избыточность измерений.

В главе 2 произведено определение критических параметров узла нагрузки традиционными методами с использованием программного комплекса «Мустанг». Рассмотрены случаи моделирования узла нагрузки в остро дефицитном Кызыльском узле Тывинской ЭС нагрузкой различного состава: асинхронным двигателем, асинхронным двигателем и статической (шунтовой) нагрузкой, только статической (шунтовой) нагрузкой. 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 энергосистем (утв. Приказом Минэнерго России от 30.06.2003 №277), 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.

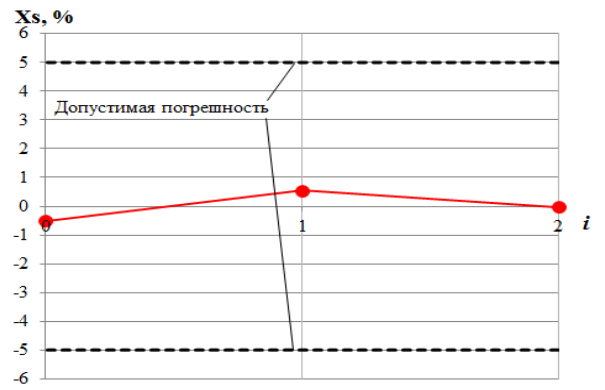
Таким образом, определённые традиционными методами критические параметры узлов двигательной нагрузки имеют высокую методическую погрешность, обусловленную использованием упрощенного моделирования статических характеристик нагрузки, недостоверного представления их реального состава. Следствием являются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

Глава 3 посвящена разработке рекомендаций по повышению достоверности результатов идентификации параметров схем замещения, определения критических параметров и запасов устойчивости узлов нагрузки при контроле её режимных параметров на шинах нагрузки или со стороны питающих узлов.

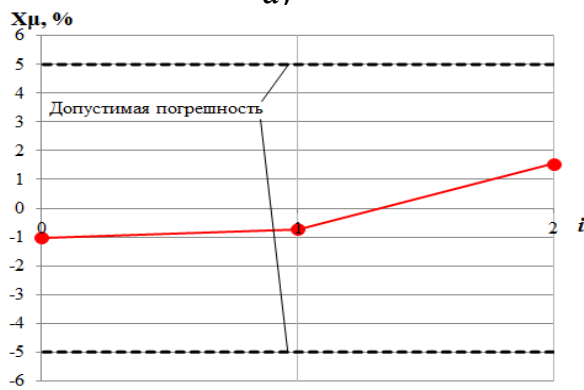
Ключевой задачей предлагаемого способа является идентификация параметров модели по совокупности текущих режимов узлов нагрузки. Эффективным способом повышения достоверности идентификации является решение переопределённой системы уравнений. Исследовано влияние увеличения избыточности измерений режимных параметров на достоверность определяемых параметров для схем «узел нагрузки – ШБМ» и «узел нагрузки – линия – ЦП». На рисунке 6, 7 представлены зависимости погрешностей параметров схемы замещения нагрузки, полученных в результате идентификации, относительно «эталонных» значений при увеличении числа замеров режимных параметров.



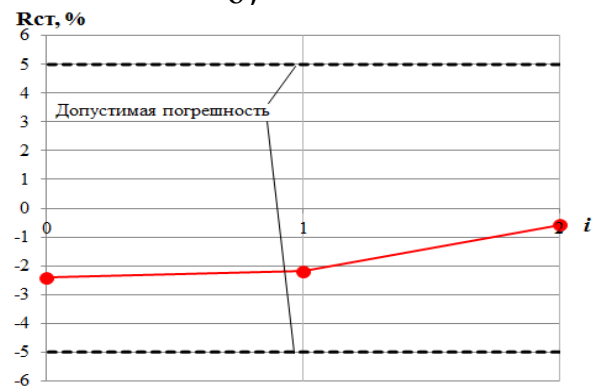
а)



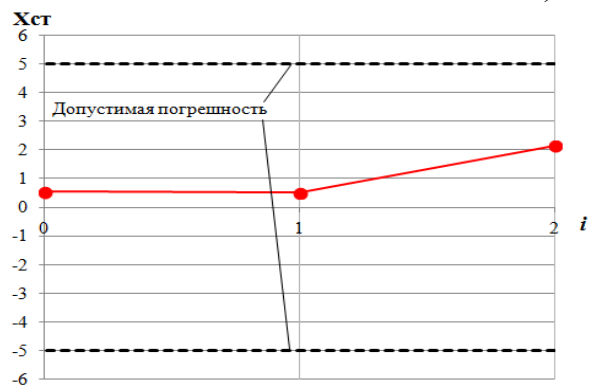
б)



в)

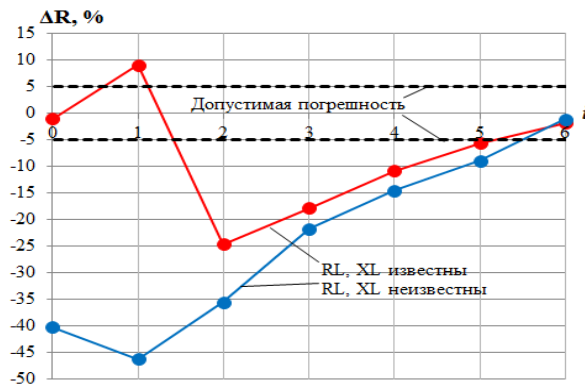


г)

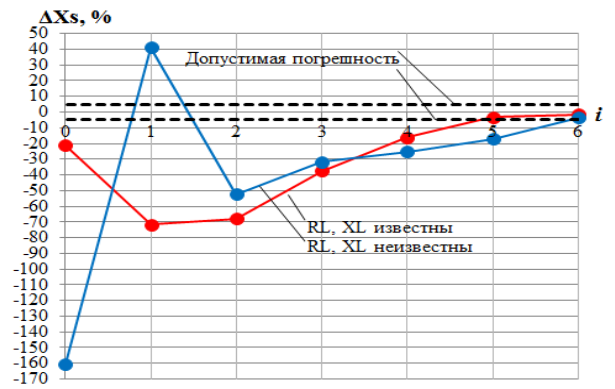


д)

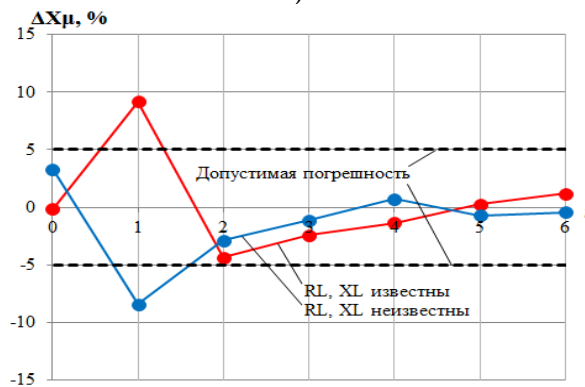
Рисунок 6 – Влияние числа избыточных комплектов измерений (режимов) i на погрешность результатов идентификации R (а), X_s (б), $X_{ц}$ (в), $R_{ст}$ (г), $X_{ст}$ (д).
 Схема «узел нагрузки – ШБМ»



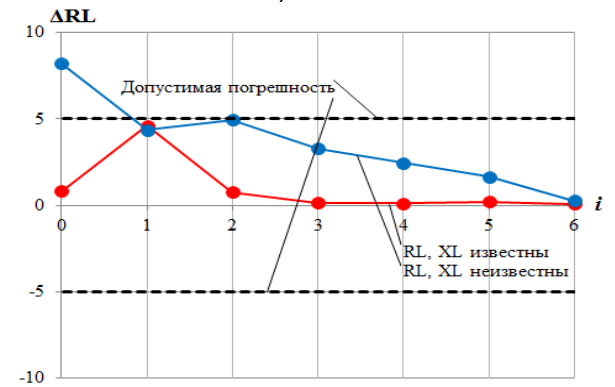
а)



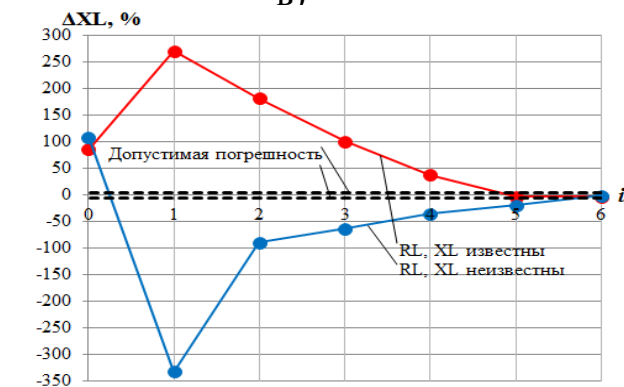
б)



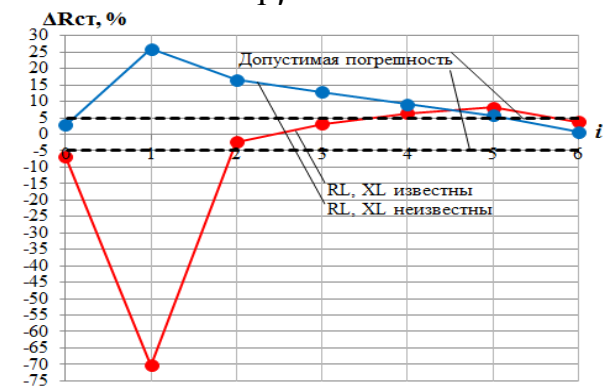
в)



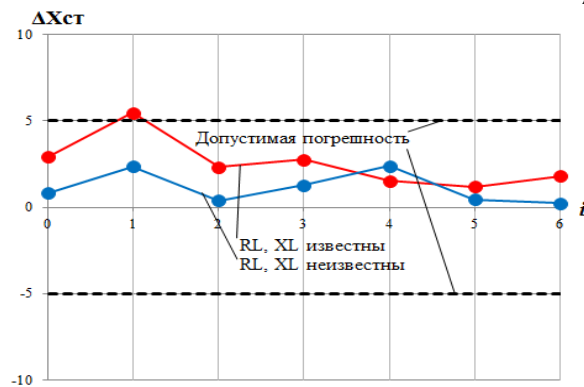
г)



д)



е)



ж)

Рисунок 7 – 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), $R_{ст}$ (е), $X_{ст}$ (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:

1) 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.

2) в случае схемы «узел нагрузки – линия – ЦП» погрешность идентификации является недопустимой ($>5\%$) при минимально необходимом количестве комплектных измерений (7), и начинает постепенно снижаться при их увеличении, достигая допустимого значения ($<5\%$) при 6 избыточных комплектных измерений ($i=6$). Таким образом, необходимым и достаточным числом комплектных измерений режимных параметров является 13 (двукратная избыточность).

Таким образом, идентификация параметров схемы замещения комплексной нагрузки на основе переопределённой системы уравнений, в которой количество уравнений превышает количество искомых величин, позволяет получать достоверные результаты идентификации параметров расчетных схем замещения и значений $S_{кр}$, $U_{кр.нагр.}$, $U_{кр.цп}$.

Произведённая в главе 3 оценка влияния состава комплексной нагрузки на достоверность результатов идентификации показала, что минимальное процентная доля двигательной нагрузки, при которой получается удовлетворительный результат идентификации при использовании разработанного алгоритма, составляет 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.

Областью применения разработанного способа контроля устойчивости нагрузки и метода идентификации ее параметров в первую очередь являются узлы крупной промышленной нагрузки, в которых нарушение её устойчивости влечёт за собой серьёзные экономические издержки. Процентное соотношение двигательной нагрузки в составе таких узлов, как правило, превышает по мощности 62,41%. Следовательно, разработанный способ и метод обеспечивают решение поставленной задачи.

В главе 3 произведена проверка достоверности идентификации с использованием программных средств моделирования режимов ЭС. Проверка показала, что в случае схемы «узел нагрузки – линия – ЦП» решение системы уравнений при двукратной избыточности измерений с использованием программных средств моделирования режимов энергосистем (программный комплекс «Мустанг») даёт допустимую погрешность определения $U_{кр} < 5\%$, что позволяет судить об адекватности разработанного метода и способа.

Таким образом, появление возможности мониторинга критического напряжения в узлах комплексной нагрузки может обеспечить объективную оценку текущих запасов устойчивости нагрузки, способствуя надёжности режима и эффективности противоаварийного управления.

В главе 4 представлены результаты проверки способа на работу в режиме реального времени в схеме «узел нагрузки – ШБМ» (рисунок 5, $X_L=0$). Проверялась работа алгоритма идентификации параметров схемы замещения и расчёта критических параметров режима в режиме реального времени при измерении режимных параметров устройством векторных измерений МИП-02 производства Ртсофт. Для проведения исследования поставлен эксперимент на физической модели энергосистем НГТУ в сети с комплексной нагрузкой, состоящей из АД и статической нагрузки с последовательным снижением напряжения на шинах комплексной нагрузки при помощи ЛАТРа до момента её опрокидывания.

В процессе снижения напряжения устройство векторных измерений МИП-02 производило измерения активной, реактивной мощности и напряжения на шинах комплексной нагрузки. Точка подключения лабораторного измерительного комплекта К 50 на рисунке 5 является также точкой регистрации режимных параметров устройством векторных измерений МИП-02. Для экспериментального определения параметров схемы замещения АД, в целях их дальнейшего сравнения со значениями параметров схемы замещения, полученных в результате идентификации, проводились опыты ХХ и КЗ с определением R , X_s , X_μ . Значения R_{CT} , X_{CT} известны на основании паспортных данных.

На рисунке 8 представлены исходная регистрограмма активной мощности АД $P_{ср}=950$ 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 в течении 35 секунд (интервал усреднения) имеем мощность, близкую к средней.

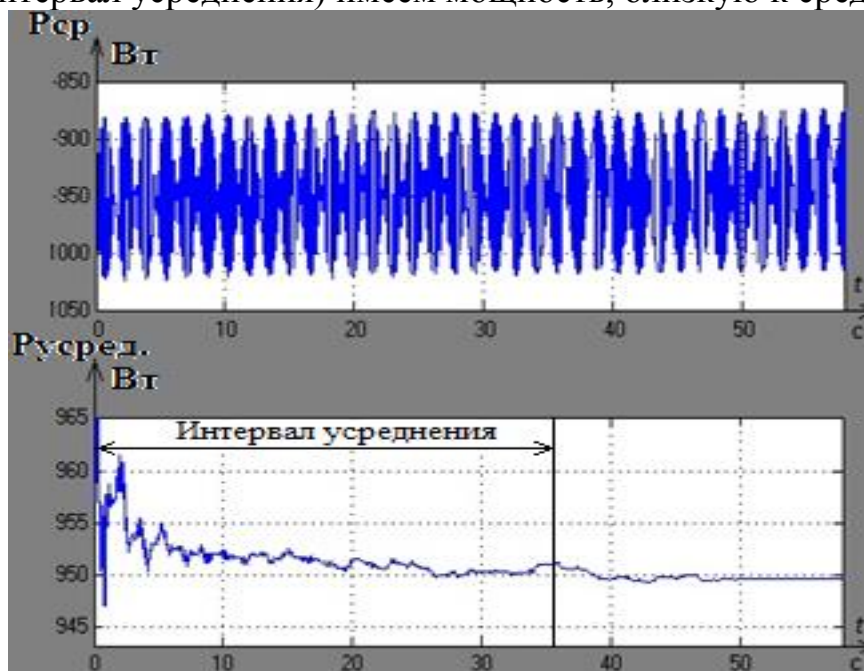
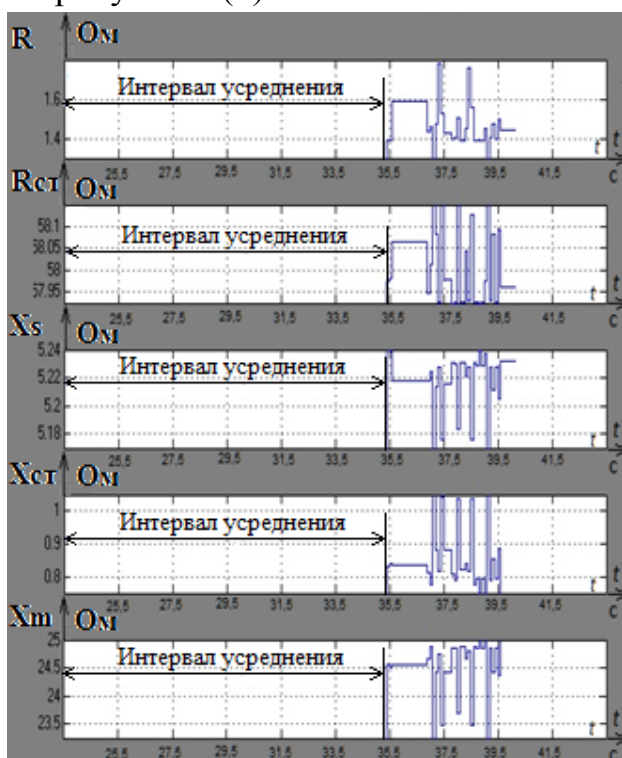


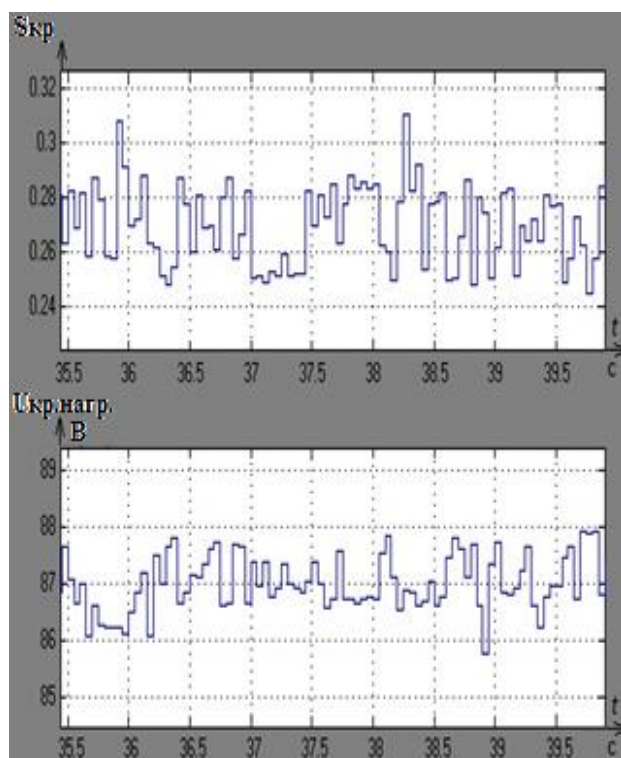
Рисунок 8 – Усреднение активной мощности

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 9 (а), а расчета критических значений скольжения и напряжения – на рисунке 9 (б).



(а)



(б)

Рисунок 9 (а), (б) – Идентификация параметров схемы замещения (а) и расчёт критических параметров (б) on-line

В таблице 3 представлена погрешность значений параметров схемы замещения комплексной нагрузки, критического скольжения АД 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 3 – 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	58,000	58,00	0
$X_{ст}$, Ом	0,80	0,090	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 9 (а), (б) и таблицы 3, 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 Ртсофт, обеспечивая допустимую погрешность определения $U_{кр.нагр.}$ (<1,5%).

Таким образом, 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%. 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.

Основными результатами диссертационной работы являются:

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.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Чершова В. О., Бобрик В. И. Определение критических напряжений питания двигательной нагрузки в режиме реального времени / В. О. Чершова, В. И. Бобрик // Энергетик. – 2013. – №9. – С. 44–47.

2. Чершова В. О. Определение критических напряжений на шинах комплексной нагрузки в режиме реального времени для задач противоаварийного управления / В. О. Чершова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – №4. – С. 287–292.

3. Чершова В. О. Идентификация параметров схемы замещения и контроль устойчивости нагрузки в режиме on-line / В. О. Чершова [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – №3. – С. 198–203.

Работы, опубликованные в сборниках научных трудов конференций:

4. Чершова В. О. Идентификация параметров схемы замещения нагрузки и определение критических напряжений в режиме реального времени для задач противоаварийного управления / В. О. Чершова // РЗ и ПА. Перспективы развития : сб. докл. 3 науч.-техн. конф. – Кемерово, 2011. – Ч. 1. – С. 75–83.

5. Чершова В. О. Определение значений критических напряжений на шинах двигательной нагрузки в режиме реального времени для задач противоаварийного управления / В. О. Чершова // Повышение эффективности и надёжности функционирования устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики в ОЭС Сибири : сб. докл. 4 науч.-техн. конф. – Кемерово, 2012. – С. 27–35.

6. Чершова В. О. Идентификация параметров схемы замещения нагрузки и определение критических напряжений в режиме реального времени для задач противоаварийного управления. Верификация математической модели на лабораторном стенде НГТУ / В. О. Чершова // Современные устройства в электроэнергетике: релейная защита, автоматика и элементы активно-адаптивных сетей. Подготовка кадров для электроэнергетической отрасли : сб. докл. науч.-практ. конф. – Томск : Изд-во ООО «СПБ Графикс», 2012. – С. 35–36.

7. Чершова В. О. Определение критических напряжений на шинах комплексной нагрузки в режиме реального времени для задач противоаварийного управления / В. О. Чершова // Энергосистема: Исследование свойств, Управление, Автоматизация : сб. докл. науч.-техн. конф. – Новосибирск : Изд-во ЗАО «ИАЭС», 2014. – С. 83–88.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

тел./факс. (383) 346-08-57

формат 60 X 84/16, объём 1.5 п.л., тираж 100 экз.

заказ № 611 подписано в печать 15.04.2016 г.