

КАПИТОНОВ Олег Константинович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ
УСТОЙЧИВОСТИ УЗЛОВ НАГРУЗКИ С МОЩНЫМИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМИ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий имени А.А. Федорова» ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» г. Чебоксары.

Научный руководитель: **Щедрин Владимир Александрович,**
кандидат технических наук, профессор,
каф. ЭСПП ФГБОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»

Официальные оппоненты: **Генин Валерий Семенович,**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
электрооборудования и автоматики ФГБОУ ВПО
«Российский государственный аграрный заочный
университет», г. Балашиха

Рыбаков Леонид Максимович,
доктор технических наук, профессор
электроэнергетического факультета, зав. кафедрой
электроснабжения и технической диагностики
ФГБОУ ВПО "Марийский государственный
университет", г. Йошкар-Ола

Ведущая организация: **ЗАО «ЧЭАЗ» (г. Чебоксары)**

Защита состоится «29» ноября 2013 г. в 15 часов 30 минут в зале заседания Ученого совета на заседании диссертационного совета Д212.301.06 при ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (428034, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, библиотечный корпус, третий этаж).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 428015, г. Чебоксары, Московский пр., 15 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.301.06

Н.В. Руссова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Для решения задач по обеспечению надежной и устойчивой работы узлов комплексной нагрузки и систем электроснабжения в целом при больших возмущениях, вызванных перерывами питания, переходящими короткими замыканиями, автоматическим вводом резерва и т.п., требуется анализ переходных режимов с учетом состава элементов нагрузки и их динамических характеристик.

Анализ динамических режимов не может быть в полной мере осуществлен на базе статических характеристик, ибо он не дает необходимых по точности и наглядности результатов в исследовании динамических процессов. Использование современных вычислительных машин и новых программных средств позволяет устранить этот недостаток. При этом появляется возможность создавать математические модели, которые учитывают не только изменения значения параметров элементов системы, состав комплексных узлов нагрузки и условия их работы, но и позволяют анализировать переходные процессы по нелинейным дифференциальным уравнениям. Такой подход особенно важен и единственно возможен, например, при анализе технологических процессов, когда невозможно провести натурные испытания.

Мероприятия по обеспечению требуемого режима работы таких узлов нагрузки в различных условиях работы весьма значимы. Поэтому проведение анализа режима работы узлов комплексных нагрузок является актуальной задачей, обеспечивающей стабильность, надежность и непрерывность работы различных ответственных механизмов и электротехнического оборудования.

Анализ режима работы узлов нагрузки требует комплексного подхода, учитывающего параметры генераторов питающей системы, устройств регулирования их систем возбуждения, а также характеристики элементов внешней сети и, особенно, двигателей, входящих в состав узла. Конечно, оценка взаимодействия всех элементов возможна и с помощью физических моделей, но в таком подходе затруднительно в полной мере учесть необходимые изменения параметров элементов нагрузки. Поэтому применение математических моделей имеет неоспоримое преимущество, в особенности при оценке динамических режимов.

Теоретические основы исследований, проводимых автором в настоящей работе, заложены в трудах И.А. Сыромятникова, В.А. Веникова, Н.И. Соколова, С.И. Гамазина, а также А.И. Важнова, Ю.Е. Гуревича, А.Д. Поздеева, В.Ф. Сивокобылинко и других ученых.

В работе проводится анализ динамических режимов в узлах комплексной нагрузки, включающей мощные высоковольтные двигатели. При этом основное внимание уделено вопросам влияния на переходные процессы различных факторов: степени компенсации реактивной мощности (Q), изменению внешнего сопротивления системы, величины предела кратности форсировки возбуждения генераторов и их мощности, а также продолжительности времени перерыва питания и КЗ на выбег и самозапуск двигателей. Данные вопросы до настоящего времени все еще недостаточно исследованы и требуют дальнейшего изучения.

Целью работы является создание математической модели для исследования динамических режимов узлов комплексной нагрузки систем электроснабжения и определения параметров, обеспечивающих устойчивость узлов нагрузки с мощными высоковольтными двигателями.

Задачи исследования.

1. Разработка математической модели для исследования динамических режимов в узлах комплексной нагрузки с учетом параметров её элементов.

2. Анализ режимов работы узла нагрузки с мощными асинхронными двигателями (АД) при КЗ, различном времени перерыва электроснабжения и различной степени компенсации реактивной мощности.

3. Оценка устойчивости узла нагрузки в динамичных режимах при различной степени компенсации реактивной мощности и изменяющемся внешнем сопротивлении системы электроснабжения.

4. Определение динамического электромагнитного момента двигателей, создаваемых ими при выбеге с учетом перерыва питания и момента сопротивления нагрузки.

5. Оценка влияния мощности генератора и кратности предела возбуждения на динамический режим при групповом пуске и самозапуске мощных асинхронных двигателей соизмеримой мощности.

Научная новизна работы.

1. Математическая модель, отличающаяся от известных тем, что позволяет учитывать при исследовании переходных процессов изменение параметров различных элементов узлов комплексной нагрузки систем электроснабжения в динамических режимах.

2. Представлены и реализованы способы исследования переходных процессов на основе динамических характеристик элементов, позволившие в отличие от известных выявить характер процессов и оценить влияние степени компенсации реактивной мощности на самозапуск мощных асинхронных электродвигателей при различных временах перерыва питания и при коротких замыканиях во внешней сети.

3. Найдены мощности генераторов и пределы их возбуждения, при которых обеспечивается успешный самозапуск (пуск) двигателей соизмеримой мощности, отличающиеся от известных наличием учета динамических характеристик элементов нагрузки.

4. Определены значения внешнего сопротивления сети, при которых обеспечивается устойчивая работа комплексного узла нагрузки с мощными электрическими двигателями, отличающиеся от известных наличием учета динамического изменения параметров элементов системы.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

Развитая в работе математическая модель позволяет оценивать влияние различных факторов на режимы работы комплексного узла нагрузки с мощными асинхронными двигателями в динамике.

Проведенная оценка динамических процессов, протекающих в комплексных узлах нагрузки, позволила задать определенные критерии режима работы системы, при соблюдении которых надежность работы узлов нагрузки возрастает.

Представленная в диссертационной работе модель энергетической системы применена в учебном процессе на кафедре Электроснабжения промышленных предприятий имени А.А. Федорова Чувашского государственного университета.

Методология и методы исследования.

Методы исследования проводились с использованием основных законов теоретической электротехники и электрических машин, теории установившихся переходных режимов работы систем электроснабжения, методов математического моделирования с применением универсальных программных пакетов.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель, учитывающая при исследовании переходных процессов изменение параметров различных элементов узлов комплексной нагрузки систем электроснабжения в динамических режимах.

2. Закономерности влияния компенсации реактивной мощности, вида короткого замыкания, продолжительности перерыва питания, отношения мощностей АД и трансформаторов, изменения активного сопротивления ротора АД на успешность пуска и самозапуска двигателей в узлах комплексной нагрузки.

3. Допустимые и приемлемые значения мощности генераторов и пределы их возбуждения, при которых обеспечивается успешный самозапуск (пуск) двигателей соизмеримой мощности с учетом динамических характеристик элементов нагрузки.

4. Условия устойчивой работы узла комплексной нагрузки с мощными высоковольтными двигателями при изменении внешнего сопротивления сети.

Степень достоверности результатов.

Достоверность результатов обеспечивается корректным использованием математического аппарата, программных вычислительных комплексов, а также совпадением полученных расчетов с теорией и исследованиями других авторов.

Апробация результатов работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на II международной конференции «Релейная защита и автоматизация» (г. Чебоксары, 2012 г.), Республиканской научно-практической конференции «Современные технологии в электроэнергетике и промышленности» (г. Хачанд, Таджикистан, 2012 г.), на научно-практической конференции молодых специалистов «Энергию молодых – в энергетику» (г. Чебоксары, 2007 и 2011 гг.), на конференции «Электротехника, электроэнергетика и электромеханика» (Чебоксары, 2006, 2007) и в обособленном структурном подразделении «Водопроводно-канализационном хозяйстве» МУП «Коммунальные сети города Новочебоксарска» (г. Новочебоксарск, 2012 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ в периодических изданиях и сборниках научных трудов, в том числе 2 работы в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ.

Структура и объём работы

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (112 наименований) и приложений. Общий объём составляет 146 стр., в том числе основная часть 123 стр., 87 рисунков, 3 таблицы, 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы. Сформулированы цели и задачи исследования, показана научная новизна и практическая ценность результатов работы, раскрыта структура диссертации.

В первой главе описывается исследуемый узел комплексной нагрузки и требования, предъявляемые к нему. Дается обзор возможности применения различных видов моделей при моделировании переходных процессов. Описаны критерии выбора необходимых элементов и определения их параметров. Приведены основные теоретические положения, описаны понятия устойчивости, касающиеся динамических процессов, а также дана краткая характеристика используемых программных пакетов.

Неоспоримым преимуществом применения моделей является расширение возможностей анализа динамических режимов в системе любой сложности и, что не менее важно, в возможности анализа полученных данных.

Рассмотрены методы расчета системы дифференциальных уравнений, кратко описаны их характеристики и дана оценка эффективности применения каждого из них.

Для элементов системы, используемых при расчете, произведён анализ протекающих в них переходных процессов. Общая схема, используемая при анализе, приведена на рисунке 1.

Для трансформатора дополнительно исследованы переходные процессы, происходящие при его подключении на постоянное напряжение.

Анализ полученных путем моделирования результатов расчета показал, что

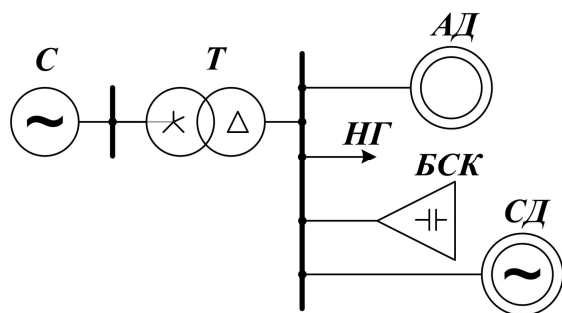


Рисунок 1 – Схема моделирования

применяемые модели элементов системы полностью соответствуют теоретическим представлениям и вполне могут использоваться в расчете переходных процессов.

Полученные результаты совпали со значениями, полученными путем теоретических расчетов, и положениями, описанными различными авторами.

Моделирование работы силового трансформатора с учетом насыщения

электротехнической стали обозначило отсутствие необходимости такого учета при анализе режимов работы узла нагрузки. Данный учет необходим лишь в случаях анализа переходных процессов при разомкнутой вторичной обмотке трансформатора.

Аналогичные исследования были произведены и для других элементов системы, что позволило подтвердить корректность использования их в моделях.

Во второй главе рассмотрены вопросы, касающиеся процессов пуска и работы мощных асинхронных двигателей в узлах комплексной нагрузки.

В начале главы проведено исследование влияния мощности трансформатора и включаемого двигателя на процессы пуска, так как очевидно, что провал напряжения на шинах узла нагрузки зависит как от мощности трансформатора, так и от мощности двигателя. Принятым критерием, обеспечивающим успешность запуска двигателя для выбранной схемы электроснабжения, являлось обеспечение показателей качества электроэнергии на питающих шинах подстанции, регламентируемое ГОСТом 13109-97.

Проведенные расчеты позволили составить номограмму, исходя из которой сравнительно легко выбирается необходимая минимальная номинальная мощность трансформатора и двигателя, при установке которых обеспечивается заданный провал напряжения в узле нагрузки при прямом пуске двигателя (рисунок 2).

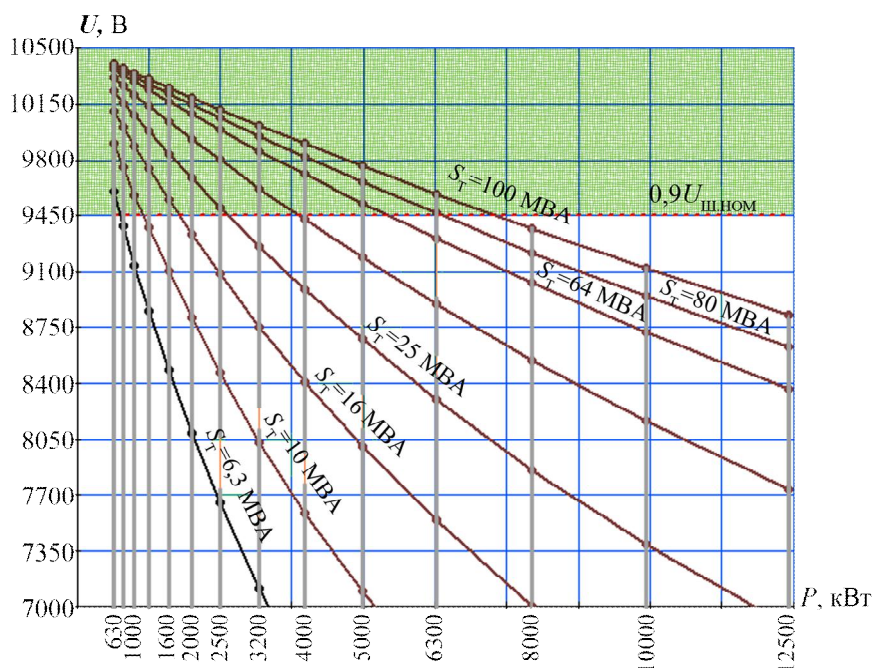


Рисунок 2 – Номограмма снижения напряжения в узле нагрузки при пуске асинхронного двигателя в зависимости от мощности самого двигателя и мощности трансформатора для начального момента времени

Например, из приведенной номограммы снижения напряжения качественный прямой пуск двигателя, запитанного от трансформатора мощностью 16 МВА, возможен при условии, если мощность двигателя не будет превышать 1780 кВт. Для двигателя мощностью 1600 кВт напряжение в узле нагрузки для начального момента времени снижается до 9546,5 В, что соответствует снижению (провалу) напряжения 9,1%.

Результаты моделирования также показали, что качественный прямой пуск (падение напряжения в узле нагрузки не превышает 10% от $U_{НОМ}$) мощного АД возможен при условии, если мощность трансформатора превышает мощность двигателя примерно в 5-11 раз.

Устойчивость работы узла нагрузки с мощным высоковольтным двигателем также зависит от характера потребления двигателями Q из сети. Как известно, при выбеге АД до определенного момента уменьшается потребление Q , благодаря чему увеличивается вероятность возвращения двигателя в нормальный режим работы. Знание точной характеристики потребления двигателем Q имеет важное значение при оценке устойчивости работы узла нагрузки.

Характеристика потребляемой узлом нагрузки Q при инженерных расчетах определяется согласно известному выражению:

$$Q_y = c \cdot U^2 + (1 - c) \frac{(b_{НОМ} + \sqrt{b_{НОМ}^2 - 1}) \cdot k_3}{\frac{b_{НОМ}}{k_3} \cdot U^2 + \sqrt{\left(\frac{b_{НОМ}}{k_3} \cdot U^2\right)^2 - 1}} + Q_{пр},$$

где U – напряжение на питающих шинах, о.е.; c – известный коэффициент; $b_{НОМ}$ – кратность максимального момента; k_3 – коэффициент загрузки двигателя, Q_c – прочая реактивная нагрузка, о.е.; $Q_{пр}$ – прочая Q нагрузка, о.е.

Оценка результатов инженерных расчетов с результатами моделирования (рисунок 3) показала, что снижение потребления двигателем Q не столь значительно. Однако полученные характеристики схожи по характеру изменения и имеют близкие значения критического напряжения. В зависимости от величины загрузки двигателя его полная остановка может произойти при уровне напряжения близкому к критическому значению. Его значение легко определяется методом моделирования и неразрешимо при инженерных расчетах. Под инженерными расчетами в данной работе понимаются результаты, полученные на основе известных формул с учетом статических характеристик элементов системы.

Приведенные кривые (рисунок 3) отражают изменение потребления Q АД как по результатам, полученным путем моделирования, так и по результатам, полученным путем инженерных расчетов (пунктирные линии). Как видно, полученные различными методами характеристики потребления узлом комплексной нагрузки Q , содержащим АД, имеют существенные различия, сравнивая которые, нетрудно заметить, что величина потребления Q , полученная путем моделирования, изменяется в меньшей степени, т.е. существенного снижения потребления Q не происходит. Определение величины потребления Q группой двигателей по индивидуальным характеристикам каждого из двигателя ($Q_{д1}$, $Q_{д2}$) путем сложения ($Q_{д1} + Q_{д2}$) нежелательно, так как такой подход приводит к большей погрешности и не отражает действительного протекающего переходного процесса изменения потребления АД Q ($Q_{д\Sigma}$). Также необходимо отметить,

что характеристика изменения потребления АД Q при выбеге, полученная инженерным путем, не отражает значения величины уровня напряжения на выводах АД в момент его полной остановки.

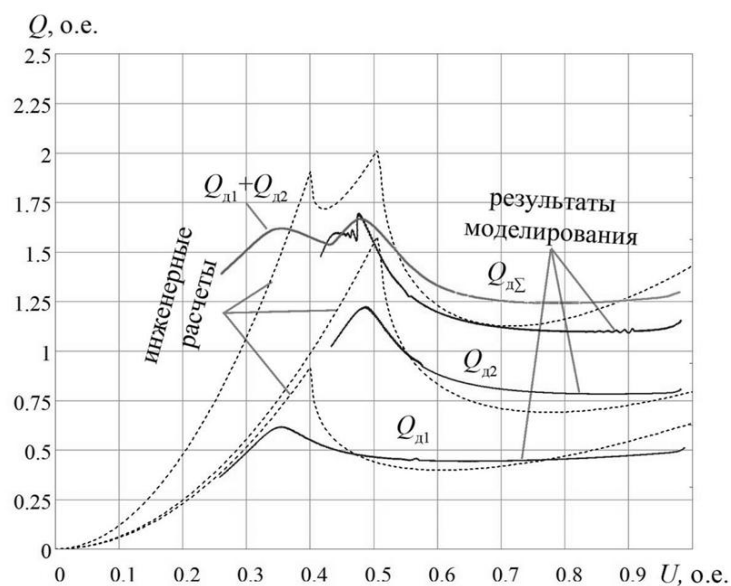


Рисунок 3 – Потребление группой асинхронных двигателей Q при уменьшении уровня напряжения на питающих шинах

Наравне с другими вопросами было рассмотрено влияние эффекта вытеснения тока (скин-эффект) в обмотке ротора двигателя при его пуске. Для анализа данного влияния рассмотрен переходный процесс пуска мощного АД во времени.

Оценка влияния скин-эффекта на процесс запуска АД также производилась на основе теоретических представлений с использованием упрощенной формулы определения глубины проникновения электромагнитной силы в проводник с различной формой сечения.

Используя различные характеристики изменения активного сопротивления ротора двигателя, произведено моделирование переходных процессов в узле нагрузки при пуске асинхронного двигателя (см. рисунок 4). Полученные результаты показали, что путем регулирования активного сопротивления ротора можно в четыре раза уменьшить время запуска двигателя.

Уменьшение времени запуска АД в четыре раза достигается в идеальном случае, под которым принят такой режим работы АД, при котором в любой момент времени и при любом скольжении двигателя электромагнитный момент, создаваемый на валу двигателя, постоянен и стремится к максимально возможному значению.

Как видно из рисунка 4, запуск АД в идеальном случае происходит намного быстрее (за 0,47 с.), чем в обычных условиях (за 2,1 с.).

Благодаря проведенному анализу отмечено положительное влияние скин-эффекта. Так в начальный момент времени, благодаря ему, происходит увеличение значения пускового момента АД, что позволяет производить запуск электропривода с большей нагрузкой на валу двигателя. Также отмечено, что путем изменения значения активного

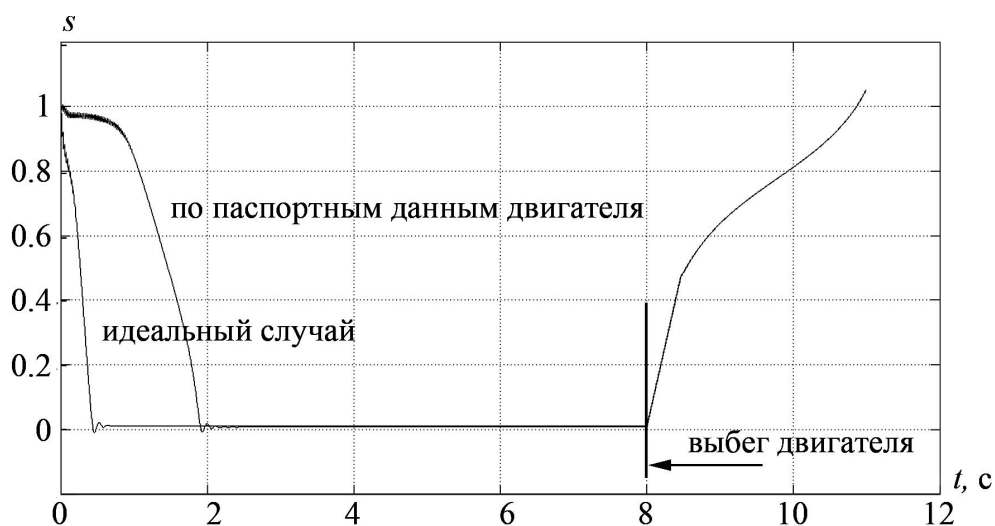


Рисунок 4 – Кривые пуска высоковольтного двигателя при учете вытеснения тока в обмотке ротора

сопротивления ротора асинхронного двигателя можно добиться создания выбранного постоянного значения электромагнитного момента при любом значении скольжения двигателя.

В третьей главе рассмотрен вопрос режима работы узла комплексной нагрузки (рисунок 1) при различном времени перерыва электроснабжения.

При изучении данного вопроса было выявлено, что немаловажным фактором, влияющим на точность инженерного расчета, является учет электромагнитного момента, создаваемого двигателем при выбеге. В трудах разных авторов, описывающих процесс выбега двигателя, говорится, что электромагнитный момент, создаваемый двигателем «можно оценивать приближенно и учитывать в общем как некоторое увеличение механического момента». Однако при таком подходе полученные результаты имеют большую погрешность, особенно при определении скольжения для заданного момента времени.

На рисунке 5 приведены кривые создаваемого электромагнитного момента, полученные путём моделирования переходных процессов при выбеге двигателя с различной нагрузкой на валу: 1 – при отсутствии нагрузки; 2 – при постоянной нагрузке; 3 – при вентиляторной характеристике нагрузки.

Из представленного на рисунке 5 графика нетрудно заметить, что при отсутствии механической нагрузки на валу двигателя электромагнитный момент по отношению к скольжению затухает медленнее, чем электромагнитный момент при наличии нагрузки на валу. Однако по времени затухание электромагнитного момента АД без нагрузки на валу происходит быстрее, чем при её наличии.

Благодаря проведенному исследованию было отмечено, что результаты инженерных расчетов приемлемы в случае, если момент сопротивления нагрузки на валу АД постоянен или когда при проведении расчетов заранее известна характеристика электромагнитного момента двигателя, создаваемая им при выбеге.

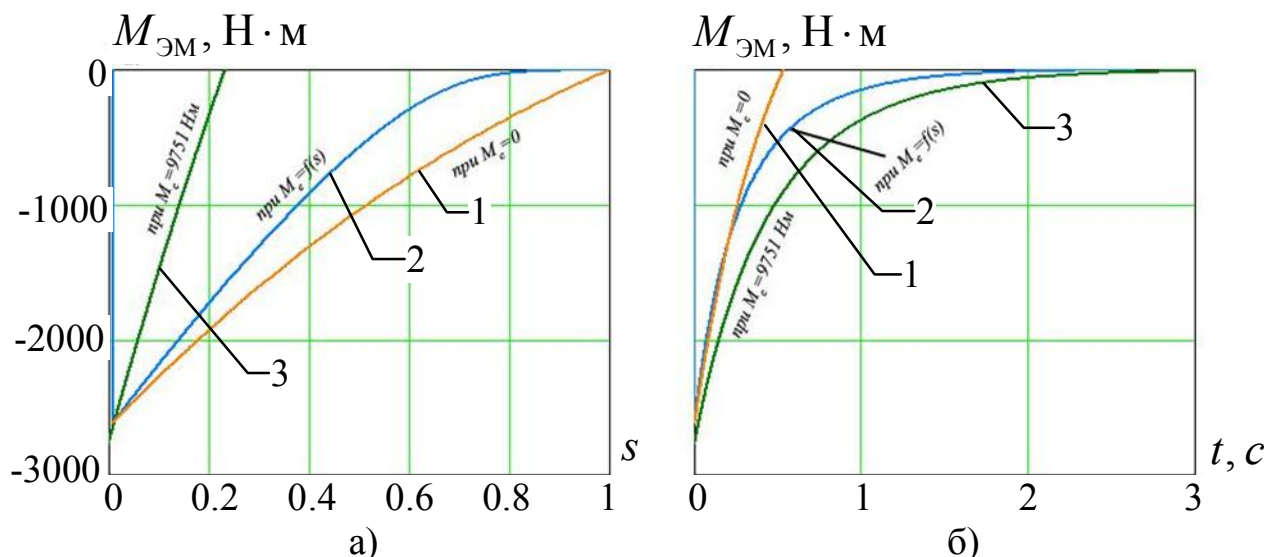


Рисунок 5 – График изменения электромагнитного момента АД при выбеге (а – по скольжению, б – по времени).

Полученные результаты расчетов выбега мощного АД, полученные при помощи инженерных расчетов и моделирования, сведены в общем графике на рисунке б.

На представленном рисунке б наглядно отображено различие в инженерных расчетах и полученных путем моделирования результатах. Очевидно, что результаты, полученные путем инженерных расчетов, даже с учетом реальной характеристики создаваемого при выбеге двигателем электромагнитного момента, являются менее точными. Погрешность таких расчетов увеличивается пропорционально продолжительности переходного процесса. Однако они вполне пригодны для проведения приближенных расчетов. В свою очередь оба метода требуют применения

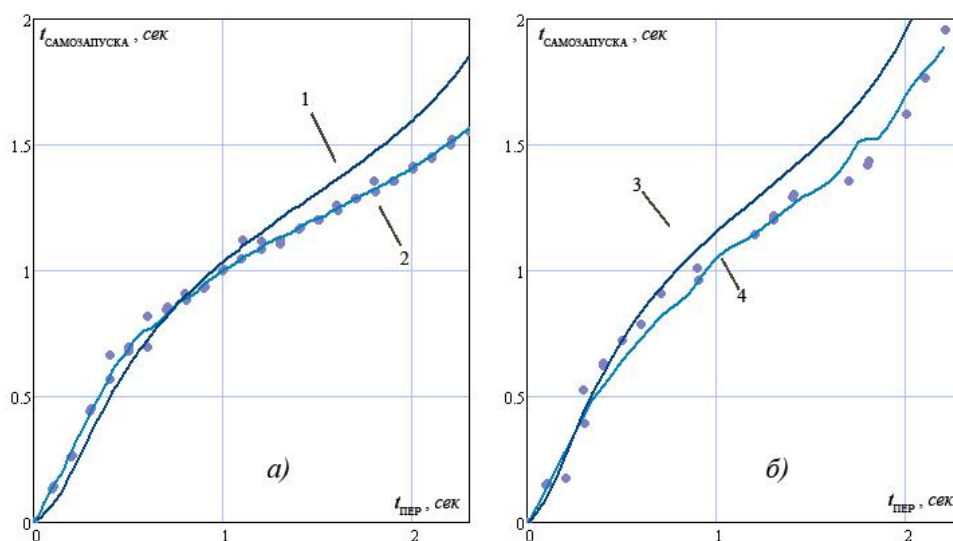


Рисунок 6 – Сравнительные графики кривых выбега двигателя при перерыве электроснабжения (а – в сети без компенсации Q : 1 – расчетная кривая, 2 – кривая, полученная по результатам моделирования; б – в сети с компенсацией Q : 3 – расчетная кривая, 4 – кривая, полученная по результатам моделирования)

вычислительной техники, поэтому более предпочтительным является моделирование переходных процессов.

Выборочно результаты выбега и самозапуска АД при моделировании динамического режима работы комплексного узла нагрузки при различном времени перерыва питания сведены в общий график на рисунке 7.

Как видно из рисунка 7, успешный самозапуск АД возможен и при скорости вращения двигателя меньше полусинхронной. Следует отметить, что полный выбег двигателя возможен при скорости вращения больше полусинхронной скорости. Возможность выбега или успешность самозапуска для каждого случая индивидуальна и зависит как от характеристик нагрузки, так и от параметров двигателя. На рисунке 7 приведены кривые, отражающие успешный самозапуск двигателя при значительном уменьшении скорости вращения ротора.

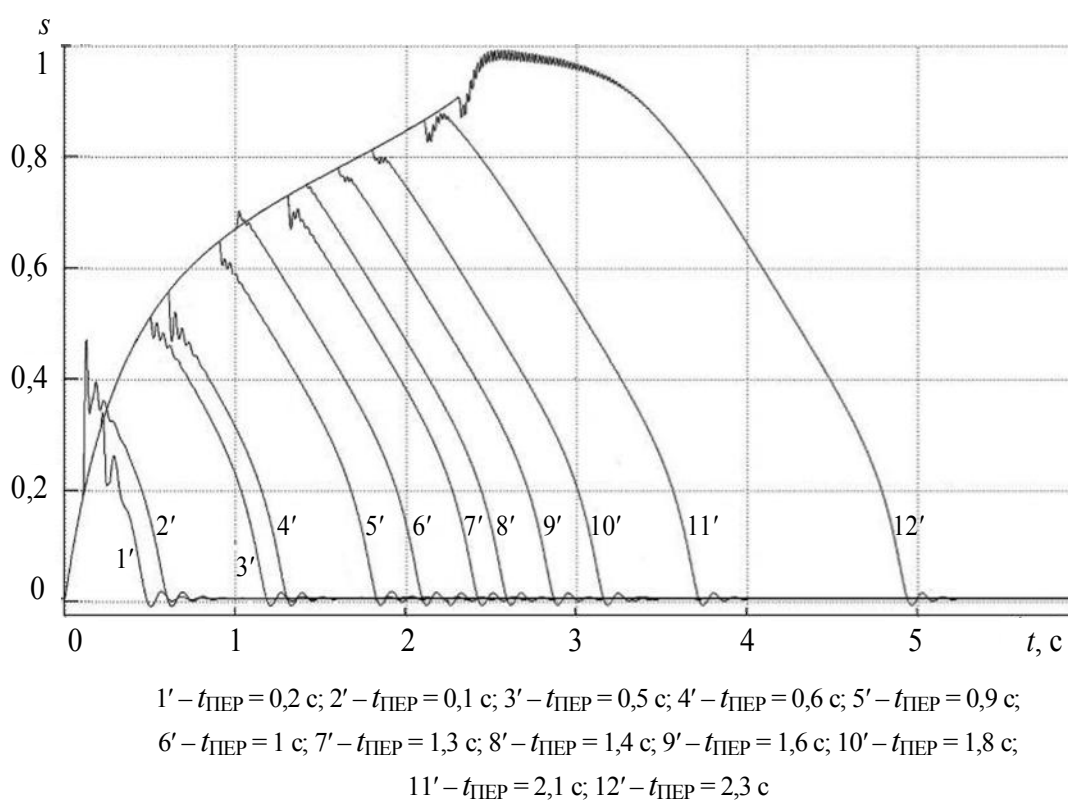
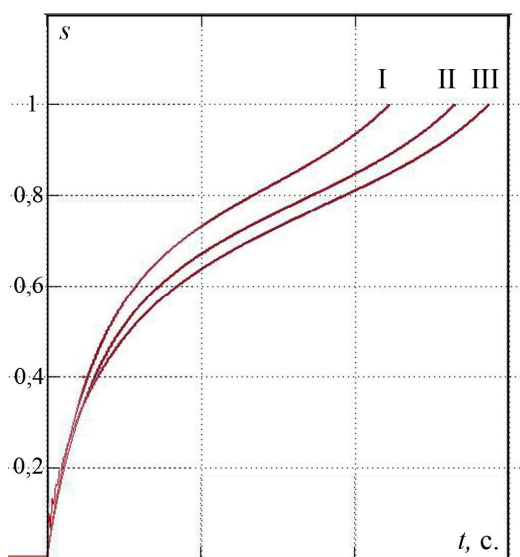


Рисунок 7 – Кривые выбега и самозапуска мощного асинхронного двигателя при разном времени перерыва электроснабжения в сети без компенсации реактивной мощности

Помимо влияния продолжительности перерыва питания для схемы, аналогичной рисунку 1, рассмотрен вопрос устойчивости работы узла нагрузки с высоковольтным асинхронным двигателем при различной степени компенсации Q и наличия повреждения в сети.



I – выбег АД при перерыве питания в сети с компенсацией Q ; II – выбег АД при перерыве питания в сети без компенсации Q ; III – выбег АД при трехфазном КЗ в сети без компенсации Q .

Рисунок 8 – Графики изменения скольжения АД при выбеге

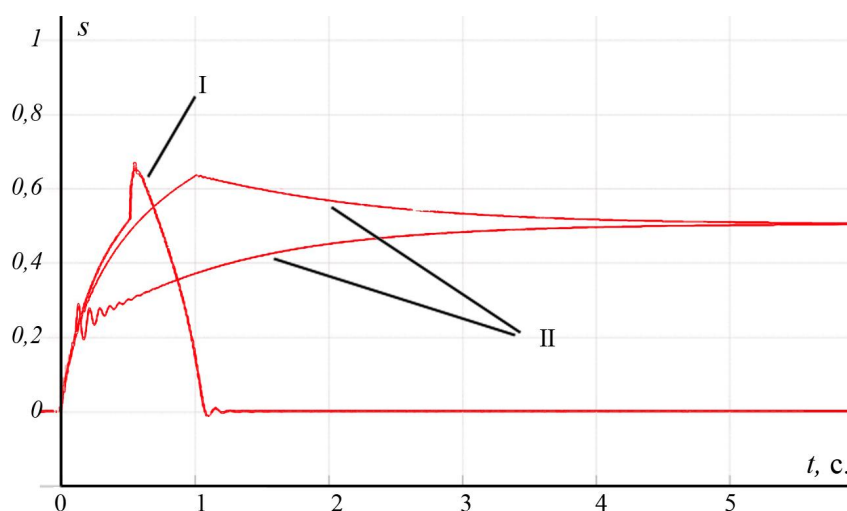
Результаты моделирования переходного процесса выбега АД при различном времени перерыва электроснабжения в сети без компенсации Q , в сети с компенсацией Q и при трехфазном КЗ в сети без компенсации Q представлены на рисунке 8.

Полученные результаты показали, что в сети с компенсацией Q время выбега АД при перерыве питания уменьшается. Это означает, что условия самозапуска становятся хуже, особенно для группы ответственных механизмов. Также отмечено, что при увеличении компенсации Q , двигатель запускается и выбегает быстрее. В случае, если в сети возникает короткое замыкание, то продолжительность выбега двигателя увеличивается.

Результаты таких проявлений приведены на рисунке 9.

В случае проявления одноосного эффекта происходит застревание двигателя на полусинхронной скорости. При этом значение тока статора АД превышает номинальное значение в 5–6 раз, но не превышает ударный пусковой ток. В этом случае немаловажное значение имеет наличие защиты, реагирующей на такое проявление.

В последнее время небольшие группы потребителей, среди которых имеется мощный высоковольтный двигатель, подключаются к системе электроснабжения через протяженные линии. Несомненно, это оказывает влияние на надежность и устойчивость работы такого узла нагрузки, так как величина внешнего сопротивления системы



I – резкое изменение скольжения АД при возобновлении электроснабжения.

II – «застревание» двигателя в период самозапуска на полусинхронной скорости.

Рисунок 9 – Графики изменения скольжения АД в период самозапуска.

увеличивается. А значит, что помимо рассмотренных выше факторов, большое значение имеет оценка режима работы узла нагрузки вследствие изменения (увеличения) величины внешнего сопротивления системы (ΔZ).

Анализ динамического режима работы производился при изменении уровня

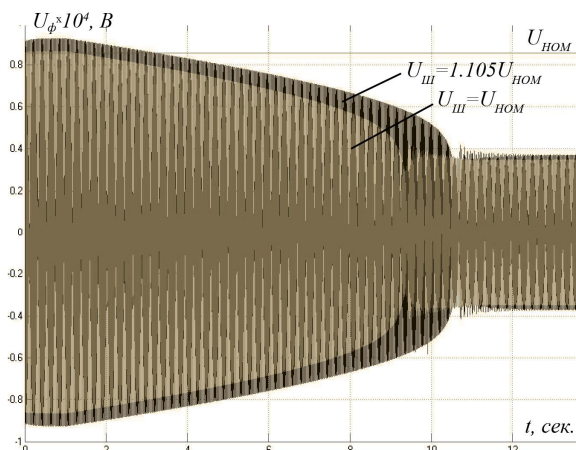


Рисунок 10 – График изменения напряжения на шинах АД при различных уровнях напряжения на шинах низшего напряжения подстанции

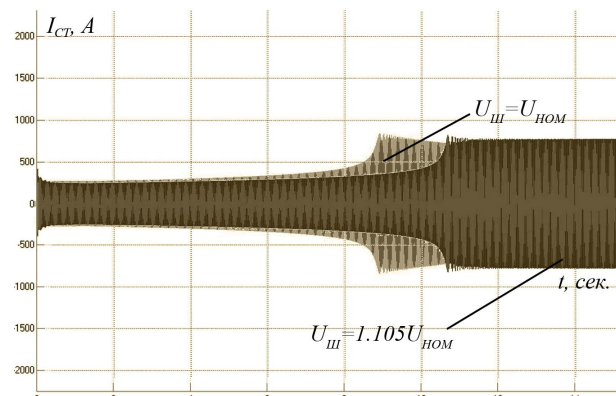


Рисунок 11 – График изменения тока статора АД при различных уровнях напряжения на шинах низшего напряжения подстанции

низшего напряжения подстанции и значения внешнего сопротивления системы. Выборочно результаты падения напряжения на шинах нагрузки, полученные в процессе моделирования при начальных значениях низшего напряжения подстанции равных 1,0 и 1,105 $U_{НОМ}$, представлены на рисунках 10 и 11. Из рисунка 10 следует, что при резком изменении внешнего сопротивления системы происходит плавное снижение уровня напряжения и в определенный момент (для рассмотренного случая это 10,5 с. и 9,4 с.) его снижение останавливается, а скорость вращения ротора быстро замедляется. При этом величина тока статора АД в процессе снижения напряжения практически не изменяется (см. рисунок 11).

Анализ полученных данных позволяет судить о некоем значении критического сопротивления внешней цепи, при котором работа двигателя в нормальном режиме становится невозможной, даже если уровень напряжения на шинах подстанции будет поддерживаться в пределах номинального значения. Величина такого сопротивления для каждого конкретного случая различна, но её значение находится в пределах 2,5 – 4 $x_{дв}$.

Значение критического сопротивления, помимо характеристики нагрузки, зависит от поддерживаемого уровня низшего напряжения подстанции: чем выше уровень низшего напряжения подстанции, тем больше величина критического сопротивления.

На рисунке 12 отражен процесс пуска и выбега двигателя при резком изменении внешнего сопротивления системы до критического значения.

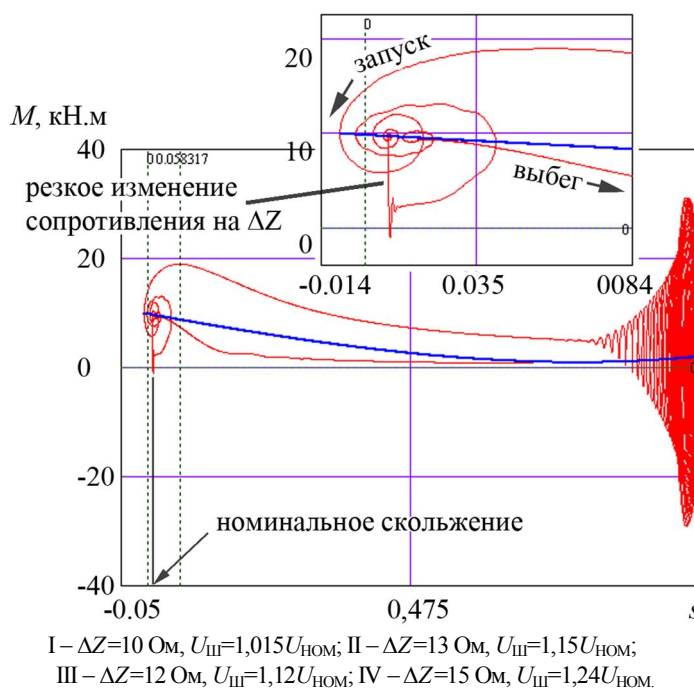


Рисунок 12 – Кривые создаваемого электромагнитного момента и момента сопротивления нагрузки при резком изменении внешнего сопротивления внешней сети до критического значения

Представленный расчет динамического режима отражает переходные процессы при резком изменении внешнего сопротивления системы. При резком изменении внешнего сопротивления также резко изменяется и создаваемый электромагнитный момент. После чего двигатель стремится вернуться в нормальный режим работы, однако, приближаясь к новому режиму работы, создаваемый двигателем электромагнитный момент уменьшается, и двигатель выбегает. Как видно, двигатель создает достаточный электромагнитный момент, но поскольку $dM/ds < 0$, то полный выбег двигателя неизбежен.

В четвертой главе исследованы переходные процессы узла нагрузки, в котором среди прочих приемников присутствует синхронный двигатель.

Основными рассматриваемыми вопросами являлись: групповой выбег асинхронных двигателей, асинхронных и синхронных, а также влияние мощности и предела возбуждения генератора на режим работы узла нагрузки.

Моделирование переходных процессов работы группы двигателей показало, что наличие синхронного двигателя более благоприятно сказывается на устойчивости работы всего узла нагрузки.

По полученным результатам отмечено, что снижение остаточного напряжения на питающих шинах происходит медленнее. Как следствие – общее время выбега при перерыве питания увеличивается из-за более медленного уменьшения скорости вращения двигателей.

Ввиду того, что при прямом пуске и самозапуске группы мощных двигателей порой не обеспечиваются требуемые показатели качества электроэнергии, также была

произведена оценка влияния интенсивного регулирования возбуждения и ограничения по мощности применяемых электродвигателей на режим работы узла комплексной нагрузки.

Полученные результаты при различных значениях предела кратности возбуждения (далее V_{fMAX}) представлены на рисунке 13.

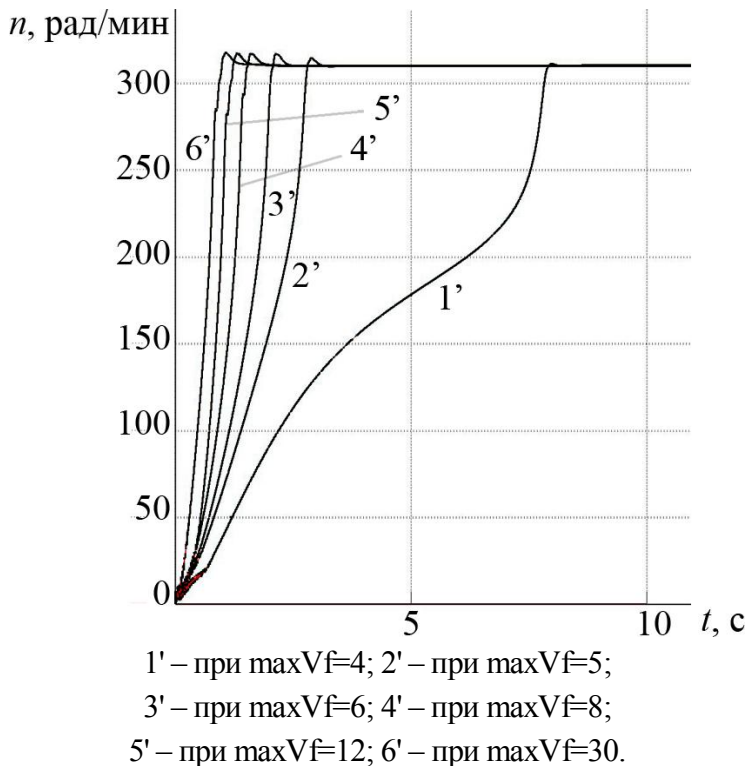


Рисунок 13 – Графики изменения скорости вращения ротора АД при пуске его от генератора соизмеримой мощности при различных пределах значений напряжения возбуждения

при различном отношении полной мощности двигателя к полной мощности генератора (k_M), показали, что успешный запуск двигателя возможен при минимальном значении k_M равном 0,57. А это означает, что для большинства ответственных потребителей успешный пуск АД возможен в случае, когда мощность генератора практически в два раза выше мощности двигателя.

На основе аппроксимации полученных данных было построено семейство кривых, используя которые просто и быстро можно определить начальное значение напряжения на выводах двигателя $U_{\Gamma}/U_{\Gamma,НОМ}$ при пуске от условного отношения мощности двигателя к мощности генератора $S_{\Gamma,НОМ}/S_{Д,НОМ}$ (см. рисунок 14) и значения V_{fMAX} .

Моделирование динамического режима позволило получить кривые изменения скорости вращения ротора АД, которые наглядно показали влияние увеличения предела кратности возбуждения генератора соизмеримой мощности на процесс пуска мощного АД. Оценка результатов позволила задаться определенным пределом кратности возбуждения генератора $V_{fMAX} = 4 - 8$, чрезмерное увеличение которого малоэффективно, так как не приводит к дальнейшему значимому уменьшению времени переходного процесса.

В автономных системах помимо значения предела кратности возбуждения такое же большое значение имеет и мощность генератора. Расчеты, произведенные

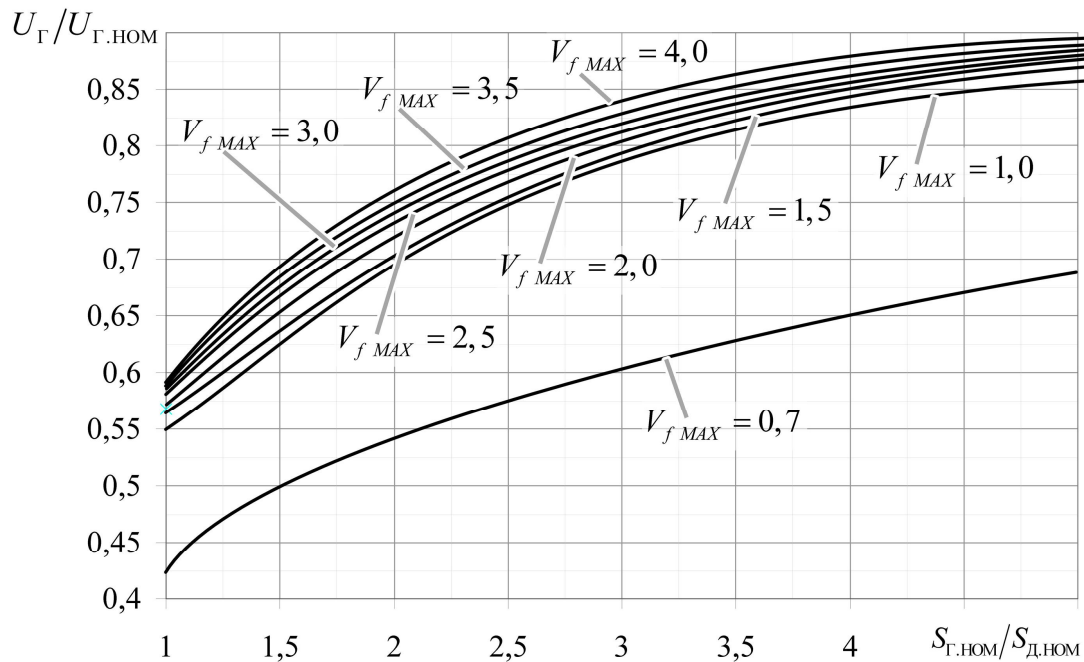


Рисунок 14 – Начальное значение напряжения на выводах двигателя в зависимости от условного отношения мощности двигателя к мощности генератора

Например, при $V_{f MAX} = 4$ и $S_{Г.НОМ}/S_{Д.НОМ} = 1,5$ напряжение на питающих шинах будет равно 0,685 о.е. Имея значение напряжения, сравнительно легко определяется возможность успешного пуска двигателя.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертационной работе дано развитие исследования динамических режимов работы узлов нагрузки с мощными высоковольтными двигателями. Разработана модель, позволяющая производить расчеты на основе нелинейных дифференциальных уравнений. Её отличительная черта – моделирование сложных схем электроснабжения и учет различных факторов. На основе выполненных исследований определены критерии, повышающие надежность работы узлов нагрузки систем электроснабжения.

2. Влияние скин-эффекта является весьма положительным. Применение специальной формы пазов ротора АД, материалов в определенной степени позволяет автоматически регулировать величины сопротивления ротора двигателя, благодаря чему возможно существенно уменьшить время его самозапуска (пуска), а также задаваться необходимой характеристикой создаваемого двигателем электромагнитного момента.

3. Компенсация Q уменьшает время запуска и выбега АД при условии, что при установке БСК не происходит уменьшение тока возбуждения генераторов или увеличение коэффициента трансформации на подстанции.

4. Для обеспечения устойчивой работы электрических систем, где мощность генератора соизмерима с мощностью двигателя, минимально допустимая мощность

генератора должна быть не менее чем в 2 раза выше значения номинальной мощности самого крупного двигателя.

5. При увеличении предела кратности возбуждения запуск мощного АД от генератора соизмеримой мощности происходит быстрее. Оптимальным значением предела кратности возбуждения является интервал от 4 до 8, так как дальнейшее его увеличение не приводит к значимому уменьшению времени переходного процесса.

6. Критическое значение сопротивления внешней системы составляет $2,5 - 4 x_{дв}$. При большем значении внешнего сопротивления работа асинхронного двигателя в нормальном режиме невозможна даже при повышении уровня низшего напряжения на подстанции.

7. Результаты диссертационных исследований использованы в учебном процессе на кафедре Электроснабжения промышленных предприятий Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова.

Перспективы дальнейшей разработки темы.

Исследование вопросов функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, в том числе и при разнообразных внешних воздействиях представляет значительный интерес. Перспективой дальнейшей разработки являются такие вопросы: анализ режима работы систем электроснабжения при набросе нагрузки (увеличении числа электроприемников) и более сложной схеме электрических соединений, исследования неполнофазного режима работы энергосистемы, величины смещения напряжения нейтрали и др.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЯ

Научные статьи, опубликованные в изданиях перечня ВАК:

1. Капитонов О.К. Влияние компенсации реактивной мощности на устойчивость работы мощного асинхронного двигателя / О.К. Капитонов // Вестник Чувашского университета. - № 3. - 2012. - С. 115-121.

2. Капитонов О.К. Влияние кратности возбуждения синхронных генераторов на работу узла нагрузки соизмеримой мощности / О.К. Капитонов, В.А. Щедрин // Вестник Чувашского университета. - № 3. - 2012. - С. 121-126.

Публикации в других изданиях:

3. Капитонов О.К. Влияние внешних параметров системы на режим работы узла нагрузки с мощными асинхронными двигателями / О.К. Капитонов, В.А. Щедрин // Сборник тезисов докладов. Чебоксары: РИЦ «СРЗАУ». - 2013. - С. 110-111.

4. Капитонов О.К. Потребление реактивной мощности асинхронным двигателем при уменьшении напряжения / О.К. Капитонов // Современные технологии в электроэнергетике и промышленности Мат. науч. тр. Хучанд: Изд-во Меркурий дизайн и принт. - 2012. - С. 57-62.

5. Капитонов О.К. Применение тензорного метода при анализе сложных повреждений в электроэнергетических системах / Иванов И.А., О.К. Капитонов, В.А. Щедрин // Сборник тезисов и докладов студентов и учащихся учебных заведений профессионального образования, Чебоксары, 2005. – С. 196.

6. Капитонов О.К. Сравнительная оценка методов расчета симметричных и несимметричных токов короткого замыкания для произвольного момента времени / В.А. Щедрин, О.К. Капитонов // Труды академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2006. - № 2. – С. 22-24.

7. Капитонов О.К. Анализ токов коротких замыканий в сложной электрической системе для произвольного момента времени / О.К. Капитонов // Труды академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2007. - № 1. – С. 7-8.

8. Капитонов О.К. Электромагнитные переходные процессы в мощных силовых трансформаторах систем электроснабжения / О.К. Капитонов, В.А. Щедрин // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения. Сб. науч. тр. Вып. VI. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. - 2010. - С. 137-148.

9. Капитонов О.К. Влияние скин-эффекта на процесс пуска мощных асинхронных двигателей / О.К. Капитонов, В.А. Щедрин // Труды академии электротехнических наук Чувашской Республики, № 1. – 2011. – С. 53-57.

10. Капитонов О.К. Оценка снижения (провалов) напряжения в узле нагрузки при пуске мощных асинхронных двигателей / О.К. Капитонов, В.А. Щедрин // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения. Сб. науч. тр. Вып. VII. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. - 2011. - С. 109-118.

11. Капитонов О.К. Влияние внешних параметров системы на режим работы узла нагрузки с мощными асинхронными двигателями / О.К. Капитонов // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения. Сб. науч. тр. Вып. VII. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. - 2012. - С. 57-69.

Личный вклад соискателя в работы, опубликованные в соавторстве:

разработка модели элементов систем электроснабжения, составление моделируемых схем, анализ достоверности применяемых моделей и создание необходимых моделей для моделирования различных переходных процессов с учетом влияния динамического изменения параметров системы и её элементов. Оценка влияния различных факторов и условий на режим работы элементов системы и комплексного узла нагрузки, получение расчетных данных в требуемом виде, построение по ним необходимых зависимостей и их сравнительный анализ.

Подписано в печать 21.10.2013 г. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 2,0.
Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ №.1291.

Отпечатано в типографии «Принт-Люкс»
428000, г. Чебоксары, пр. М. Горького, д. 26