

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический

Направление 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Кафедра Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Исследование влияния статических характеристик нагрузки на устойчивость двигательной нагрузки промышленного предприятия

УДК 621.313.323

621.313.333.2

621.316.176

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А2Д	Шувалов Алексей Юрьевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры электрических сетей и электротехники	Бацева Наталья Ленмировна	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры менеджмента	Трофимова Маргарита Николаевна	доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности	Панин Владимир Филиппович	д.т.н., профессор		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электроснабжение промышленных предприятий	Завьялов Валерий Михайлович	д.т.н., доцент		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический

Направление 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Кафедра Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись) _____ (Дата) Завьялов В.М.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской выпускной квалификационной работы
--

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5А2Д	Шувалову Алексею Юрьевичу

Тема работы:

Исследование влияния статических характеристик нагрузки на устойчивость двигательной нагрузки промышленного предприятия	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	09.03.2016 № 1868/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2016
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Объектом исследования являются асинхронные и синхронные двигатели, получающие питание от второй секции шин трансформаторной подстанции 35/6 кВ ЗАО «Сибкабель». В качестве исходных данных представлены: • Принципиальная схема электроснабжения ЗАО «Сибкабель»; • Технические характеристики электрооборудования: ВЛ, КЛ, трансформаторов, синхронных и асинхронных двигателей; • Контрольные замеры активной и реактивной мощностей, напряжений и нагрузок для зимнего максимума и летнего минимума.
---	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1. Анализ литературных источников по теме исследования; 2. Разработка методики получения статических характеристик нагрузки по напряжению для синхронного и асинхронного двигателей; 3. Разработка методики исследования статической и динамической устойчивости двигательной нагрузки, запитанной от второй секции шин трансформаторной подстанции 35/6 кВ ЗАО «Сибкабель» в ПК RastWin с учетом статических характеристик нагрузки по напряжению; 4. Представление результатов и выводов по теме работы.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Принципиальная однолинейная схема электроснабжения ЗАО «Сибкабель»
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Трофимова Маргарита Николаевна
Социальная ответственность	Панин Владимир Филиппович
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Не предусмотрено	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	27.01.2016
--	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры электрических сетей и электротехники	Бацева Наталья Ленмировна	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А2Д	Шувалов Алексей Юрьевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5А2Д	Шувалову Алексею Юрьевичу

Институт	Энергетический	Кафедра	Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)
Уровень образования	бакалавр	Направление	13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ):</i>	<i>Стоимость материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих ресурсов</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Стоимость программных комплексов RastrWin, EUROSTAG, MUSTANG</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>На 2016 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Оценка осуществляется на основе анализа потенциальных потребителей результатов исследования, конкурентных технических решений, а также QUAD и SWOT анализ</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Основой для формирования бюджета являются основная заработная плата исполнителей, страховые отчисления и накладные расходы</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
2. <i>Альтернативы проведения НИ</i>
3. <i>График проведения и бюджет НИ</i>
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры менеджмента	Трофимова Маргарита Николаевна	доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А2Д	Шувалов Алексей Юрьевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЯ (РАЗРАБОТЧИКА) ПРИ
ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В
РЕМОНТНО-МЕХАНИЧЕСКОМ ЦЕХЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5А2Д	Шувалову Алексею Юрьевичу

Институт	Энергетический	Кафедра	Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (территории ремонтно-механического цеха) на предмет возникновения: – вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) – негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) – чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)	Территория ремонтно-механического цеха промышленного предприятия ЗАО «Сибкабель». Необходимо поддержание: 1.1. Нормативных метеоусловий, освещения, уровней вибрации и шума; 1.2. Нормативных мер обеспечения электро- и пожаробезопасности. 1.3. Нормативное обращение с выбросами, сбросами твёрдых отходов. 1.4. Наиболее вероятные ЧС: загорания (пожары), электрический удар, например, при замыкании фазы питания на корпус электрооборудования при нарушении его заземления.
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	ГОСТ 12.0.003-74 «ОиВПФ»; ГОСТ 12.1.003-83 «Шум. Общие требования безопасности»; ГОСТ 12.1.01290 «Вибрационная безопасность»; ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»; ПУЭ, утвержденный министерством энергетики России от 08.07.2002, №204, Глава 1.7.; №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»; Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 №681; Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009 №1110 (с изменениями от 24.12.2014).

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности: – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)	Вредные факторы: 1. Шум; 2. Вибрации; 3. Возможные ненормативные метеоусловия; 4. Недостаточная освещенность рабочего места 5. ЭМП
--	---

2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)	Опасные факторы: 1. Опасность электропоражения; 2. Пожаровзрывоопасность.
3. Охрана окружающей среды: – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.	По п.п.3.1. и 3.2. описать системы обращения с выбросами и сбросами из цеха штамповки и цветного литья; По п.3.3. описать систему обращения с твердыми отходами цеха в соответствии с постановлениями Правительства РФ от 03.09.2010 №681 и Администрации г. Томска от 11.11 2009 №1110(с изменениями от 24.12. 2014г.). Примечание№1: в качестве основы можно рассмотреть раздел 5.4.»Защита окружающей среды» в разделе «Соц. Ответственность» ВКР бакалавра Неверова П.Р., работавшего в 2015г. под моим руководством.
4. Защита в чрезвычайных ситуациях: – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий	Разработать мероприятия по предупреждению загораний и электропоражений и мер по ликвидации их последствий.
Перечень графического материала:	
При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности	Панин Владимир Филиппович	д.т.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А2Д	Шувалов Алексей Юрьевич		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Уровень образования Бакалавриат

Кафедра Электроснабжение промышленных предприятий

Период выполнения весенний семестр 2015/2016 учебного года

Форма представления работы:

бакалаврская выпускная квалификационная работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2016
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
09.02.2016	<i>Анализ литературных источников по теме исследования</i>	5
24.02.2016	<i>Разработка методики получения статических характеристик нагрузки по напряжению для синхронного и асинхронного двигателей</i>	10
07.03.2016	<i>Определение коэффициентов полиномов статических характеристик нагрузки по напряжению для двигателей, получающих питание от второй секции шин 6 кВ трансформаторной подстанции 35/6 кВ ЗАО «Сибкабель».</i>	15
04.04.2016	<i>Проведение и анализ экспериментов по исследованию динамической устойчивости синхронных и асинхронных двигателей, получающих питание от второй секции шин 6 кВ трансформаторной подстанции 35/6 кВ ЗАО «Сибкабель».</i>	30
25.04.2016	<i>Проведение и анализ экспериментов по исследованию статической устойчивости синхронных и асинхронных двигателей, получающих питание от второй секции шин 6 кВ трансформаторной подстанции 35/6 кВ ЗАО «Сибкабель».</i>	25
25.05.2016	<i>Оформление результатов работы и выводов по работе</i>	5
12.05.2016	<i>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</i>	5
26.05.2016	<i>Социальная ответственность</i>	5

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры электрических сетей и электротехники	Бацева Наталья Ленмировна	к.т.н., доцент		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электроснабжение промышленных предприятий	Завьялов Валерий Михайлович	д.т.н., доцент		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Направление ООП: 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Профиль: Электроснабжение промышленных предприятий

Кафедра, институт: кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий»,
Энергетический институт

Результат обучения	
Профессиональные компетенции	
Р 1	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа электрических устройств, объектов и систем.
Р 2	Уметь формулировать задачи в области электроэнергетики и электротехники, анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
Р 3	Уметь проектировать электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты.
Р 4	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники, интерпретировать данные и делать выводы.
Р 5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области электроэнергетики и электротехники.
Р 6	Иметь практические знания принципов и технологий электроэнергетической и электротехнической отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
Универсальные компетенции	
Р 7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области электроэнергетики и электротехники
Р 8	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях электроэнергетики и электротехники.
Р 9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области электроэнергетики и электротехники.
Р 10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
Р 11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области электроэнергетики и электротехники с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
Р 12	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области электроэнергетики и электротехники.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 182 с., 75 рис., 43 табл., 17 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: статические характеристики нагрузки по напряжению, коэффициенты полиномов статических характеристик нагрузки, метод взвешенных наименьших квадратов, синхронный двигатель, асинхронный двигатель, статическая устойчивость, динамическая устойчивость, самозапуск двигателя, коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению, менеджмент, социальная ответственность.

Объектом исследования являются двигатели, получающие питание от второй секции шин трансформаторной подстанции 35/6 кВ Сибкабель.

Цель работы: получение статических характеристик нагрузки по напряжению для синхронного и асинхронного двигателей и исследование статической и динамической устойчивости синхронных и асинхронных двигателей с учётом статических характеристик нагрузки.

В процессе исследования был разработан расчётный метод получения статических характеристик нагрузки по напряжению для синхронного и асинхронного двигателя, проведены эксперименты по исследованию переходных режимов работы двигательной нагрузки, запитанной от второй секции шин 6 кВ, при больших и малых возмущениях в системе электроснабжения, оценено влияние представления двигательной нагрузки статическими характеристиками нагрузки на результаты расчётов устойчивости.

Степень внедрения: планируется внедрение проведенных исследований для совершенствования комплекса лабораторных работ по дисциплине «Переходные процессы в системах электроснабжения», а также при проведении дальнейших научных исследований, связанных с получением статических характеристик нагрузки по напряжению.

Область применения: для проведения исследовательских работ по моделированию электромеханических переходных процессов с учетом статических характеристик нагрузки по напряжению.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ	14
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	16
ВВЕДЕНИЕ	17
РАЗДЕЛ 1 СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	20
РАЗДЕЛ 2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ ДЛЯ СИНХРОННОГО И АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЕЙ АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА И РЕЗУЛЬТАТЫ	28
2.1 Представление двигательной нагрузки статическими характеристиками нагрузки по напряжению	28
2.2 Экспериментально-статистические модели определения коэффициентов полиномов СХН	29
2.3 Статистические модели в виде нелинейных полиномов. Параболическая регрессия	30
2.4 Реализация метода наименьших квадратов с помощью программы <i>Microsoft Excel</i> ..	32
2.5 Применение аналитического метода получения статических характеристик нагрузки по напряжению для двигательной нагрузки, запитанной от второй секции шин ЗАО «Сибкабель»	35
2.5.1 Получение СХН для синхронного двигателя	35
2.5.2 Получение СХН для асинхронного двигателя	39
РАЗДЕЛ 3 ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА RASTRWIN ДЛЯ РАСЧЁТОВ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ	46
3.1 Общая характеристика модулей RastrWin3	46
3.2 Расчёт установившегося режима с учётом статических характеристик нагрузки	47
3.3 Расчёт сопротивления шунта короткого замыкания	51
3.4 Расчёт электромеханических переходных процессов синхронных и асинхронных двигателей.....	52
3.4.1 Принципы формирования исходных данных для расчета электромеханических переходных процессов.....	52
3.4.2 Расчет переходных процессов и вывод результатов	70
РАЗДЕЛ 4 ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ, ЗАПИТАННОЙ ОТ ВТОРОЙ СЕКЦИИ ШИН ПОДСТАНЦИИ 35/6 кВ ЗАО «СИБКАБЕЛЬ»	73
4.1 Методика исследования динамической устойчивости асинхронных двигателей	73
4.1.1 Особенности работы асинхронного двигателя в режиме «выбега»	78
4.1.2 «Самозапуск» асинхронного двигателя	79
4.1.3 Описание экспериментов для асинхронных двигателей	80

4.1.4 Эксперимент по определению критического скольжения, предельного времени отключения короткого замыкания, оценки влияния двигателей друг на друга при возмущении и влияния статических характеристик на динамическую устойчивость..	81
4.2 Методика исследования динамической устойчивости синхронных двигателей	84
4.2.1 Описание экспериментов с синхронными двигателями	92
4.2.2 Результаты экспериментов по исследованию динамической устойчивости, взаимного влияния двигателей и влияния статических характеристик на динамическую устойчивость синхронных двигателей.....	93
4.3 Описание экспериментов по исследованию динамической устойчивости для режимов совместной работы синхронных и асинхронных двигателей	98
4.3.1 Результаты экспериментов по исследованию динамической устойчивости для режимов совместной работы синхронных и асинхронных двигателей.....	99
4.4 Исследование статической устойчивости асинхронных двигателей.....	107
4.4.1 Описание экспериментов для асинхронных двигателей.....	110
4.4.2 Эксперимент по определению критического скольжения, критического напряжения и влияния статических характеристик на статическую устойчивость асинхронного двигателя	111
4.5 Исследование статической устойчивости синхронных двигателей	112
4.5.1 Описание экспериментов для синхронных двигателей.....	113
4.5.2. Эксперимент по определению критического напряжения и влияния статических характеристик на статическую устойчивость синхронного двигателя.....	115
4.6 Описание экспериментов по исследованию статической устойчивости для режимов совместной работы синхронных и асинхронных двигателей.....	116
4.7 Результаты экспериментов по исследованию статической устойчивости для режимов совместной работы синхронных и асинхронных двигателей.....	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РАЗДЕЛУ 4	121
РАЗДЕЛ 5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ РЕСУРСО–ЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	130
5.1 Анализ конкурентных технических решений	130
5.2 Оценка конкурентных технических решений при помощи технологии QuaD.....	133
5.3 SWOT-анализ.....	135
5.4 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований.....	140
5.5 Структура работы в рамках научного исследования.....	141
5.6 Определение трудоёмкости выполнения проектировочных работ и разработка графика проведения научного исследования	143
5.7 Расчет материальных затрат возможных вариантов реализации конкурентных технических решений	148
5.8 Основная заработная плата исполнителей.....	149

5.9 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	151
5.10 Накладные расходы.....	152
5.11 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	153
5.12 Определение ресурсоэффективности проекта	154
РАЗДЕЛ 6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО	
ОБЕСПЕЧЕНИЮ НОРМАТИВНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА В	
РЕМОНТНО-МЕХАНИЧЕСКОМ ЦЕХЕ	160
6.1 Обеспечение защиты от вредных производственных факторов	161
6.2 Защита от опасных производственных факторов	169
6.3 Защита окружающей среды.....	171
6.4 Предотвращение ЧС и устранение их последствий.....	173
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	176
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	179

СПИСОК НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

1. РД 34.20.578-79 Методические указания по определению устойчивости энергосистем. Часть II. – М.: Изд-во ВНИИЭ, 1979.
2. Методические указания по устойчивости энергосистем. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
3. ГОСТ 21027-75 Электроэнергетические системы. Термины и определения. – М.: Изд-во Госстандарта России, 1975.
4. СТО 70238424.29.240.01.001-2012 Единая национальная электрическая сеть. Условия развития, нормы и требования. – М.: Изд-во стандартов, 2012.
5. Федеральный закон от 24.07.2009 N 212-ФЗ (ред. от 23.11.2015) «О страховых взносах в Пенсионный фонд Российской Федерации, Фонд социального страхования Российской Федерации, Федеральный фонд обязательного медицинского страхования».
6. Постановление Правительства РФ от 14 октября 1992 г. № 785 «О дифференциации в уровнях оплаты труда бюджетной сферы на основе Единой Тарифной Сетки»
7. ГОСТ 12.0.003-74 (СТ. СЭВ 790-77). “Опасные и вредные производственные факторы. Классификация”.
8. ГОСТ 12.1.005-88 “Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны”.
9. СНиП 23-05-95 “Строительные нормы и правила РФ. Естественное и искусственное освещение”.
10. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 “Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий”.
11. ГОСТ 12.1.003-83 “Шум. Общие требования безопасности”.
12. ГОСТ 12.1.012-90 “Вибрационная безопасность. Общие требования”.
13. СанПиН 2.2.4.1191-03 “Электромагнитные поля в производственных условиях”.

14. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 “Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы”.
15. №123-ФЗ “Технический регламент о требованиях пожарной безопасности” от 22.07.2008 (с изменениями и дополнениями).
16. СП 5.13130.2009 “Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования”.
17. СП 9.13130.2009 “Техника Пожарная. Огнетушители. Требования к эксплуатации”.
18. Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009, №1116 (с изменениями от 24.12.2014) “Об организации сбора, вывоза, утилизации и переработки бытовых и промышленных отходов на территории муниципального образования «Город Томск».
19. Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 №681 “Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств”.
20. ГОСТ 12.1.004-91, СС5Т “Пожарная безопасность. Общие требования”.
21. ГОСТ Р. 50571.3-94 “Электроустановки зданий. Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защиты от поражения электрическим током”.
22. Правила устройства электроустановок, ПУЭ, утвержденные Министерством энергетики России от 08.07.2002, №204, Глава 1.7.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АД – асинхронный двигатель;

СД – синхронный двигатель;

СХН – статические характеристики нагрузки;

РУ – распределительное устройство;

РУНН – распределительное устройство низкого напряжения;

ГПП – главная понизительная подстанция;

ПК – программный комплекс;

ЭП – электроприёмник;

КЗ – короткое замыкание;

АРВ – автоматическое регулирование возбуждения;

ИД – исходные данные;

ЗАО – закрытое акционерное общество;

чел.-дн. – человеко-дни (единица измерения трудоёмкости работ);

НТИ – научно-техническое исследование;

НДС – налог на добавочную стоимость;

ГОСТ – государственный стандарт;

КЕО – коэффициент естественного освещения;

СНиП – санитарные нормы и правила;

ППБ – правила пожарной безопасности;

ОС – окружающая среда;

ТЭС – теплоэлектростанция;

УЗО – устройство защитного отключения;

ВВЕДЕНИЕ

Системой электроснабжения промышленного предприятия называется часть электроэнергетической системы, осуществляющая снабжение электрической энергией потребителей. Она содержит питающие и распределительные линии электропередачи, трансформаторы, компенсирующие устройства и электроустановки потребителей.

Всю электрическую нагрузку промышленного предприятия условно можно разделить на две группы: двигательная нагрузка и статическая нагрузка. Под статической нагрузкой понимают электроприёмники, в которых отсутствует вращающееся магнитное поле, например, электрическое освещение, выпрямители, электропечи, коммунально-бытовые приборы. Под двигательной нагрузкой понимают электроприёмники, которые преобразуют электрическую энергию в механическую: синхронные и асинхронные электродвигатели, электродвигатели постоянного тока, синхронные реактивные электродвигатели. Говоря о двигательной нагрузке, чаще всего имеют в виду не сами двигатели, а двигатели вместе с приводными механизмами, называемые электроприводами. Следует отметить, что электроприводы составляют примерно 70% от всей нагрузки промышленного предприятия.

Исследование устойчивости двигательной нагрузки является важным с двух позиций:

1. обеспечения непрерывного технологического процесса на предприятии при кратковременных нарушениях в системах электроснабжения. Так, например, короткое замыкание в питающих или распределительных сетях могут вызвать нарушение устойчивой работы двигательной нагрузки, что приведёт к нарушению технологических процессов, браку и массовому недоотпуску продукции.
2. переходные процессы, а также большие и малые возмущения со стороны нагрузки существенно влияют на устойчивость генераторов электростанций и на устойчивость электроэнергетической системы в целом.

Можно выделить три наиболее характерных воздействия изменений нагрузки на энергосистему:

- внезапные большие набросы и сбросы нагрузки, которые связаны с включением и отключением крупных электродвигателей. Если такие отключения происходят в избыточных энергорайонах, а включения в дефицитных, то это приводит к набросу мощности на внешние связи. При неблагоприятных обстоятельствах такие воздействия могут вызвать нарушение устойчивости электроэнергетической системы и привести к тяжелой системной аварии.
- значительное увеличение потребления реактивной мощности после нарушения устойчивости двигателей. Это может вызвать настолько глубокие снижения напряжения, что возникает лавинообразный процесс нарушения устойчивости всего узла нагрузки.
- самозапуск группы мощных асинхронных двигателей.

При анализе устойчивости потребителей исследуют поведение, как всего узла нагрузки, под которыми понимают группы потребителей, присоединенных к шинам подстанций, так и поведение отдельных электроприёмников при больших и малых возмущениях в системе электроснабжения.

Целью настоящей работы является исследование статической и динамической устойчивости двигательной нагрузки промышленного предприятия при больших и малых возмущениях в системе электроснабжения. Следует отметить, что исследования должны быть проведены как с учётом, так и без учёта статических характеристик нагрузки по напряжению, так как в соответствии с методическими указаниями по расчету устойчивости, исследования, проведенные без учёта статических характеристик, обуславливают погрешность результатов, что может послужить негативным фактором при дальнейшем анализе электромеханических переходных процессов.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. разработать расчётный способ получения статических характеристик нагрузки по напряжению для синхронного и асинхронного двигателей;
2. создать расчётную модель рассматриваемой системы электроснабжения в программном комплексе;
3. для исследования статической устойчивости двигателей произвести моделирование малых возмущений в системе электроснабжения плавным снижением напряжения на питающих шинах. Проводя аналогию с реальными процессами, происходящим в системе электроснабжения, следует отметить, что плавное уменьшение напряжения может быть связано с изменением нагрузки в соответствии с суточным графиком, нормальными изменениями структуры распределительной сети предприятия, включением и отключением маломощных потребителей электроэнергии;
4. для исследования динамической устойчивости двигателей произвести моделирование больших возмущений в системе электроснабжения путём имитации возникновения трёхфазного короткого замыкания;
5. провести сравнительный анализ полученных результатов исследований.

РАЗДЕЛ 1 СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Крупнейшее кабельное предприятие ЗАО «Сибкабель», 70 лет достойно сохраняющее значимую роль на российском кабельном рынке и занимающее одно из ведущих мест среди российских производителей кабельно–проводниковой продукции, было основано 8 декабря 1941 года.

В августе 2011 года ЗАО «Сибкабель» вошло в ООО «Холдинг Кабельный Альянс». Новая структура объединила кабельные заводы: ОАО «Электрокабель «Кольчугинский завод» (г. Кольчугино), ЗАО «Сибкабель» (г. Томск), ЗАО «Уралкабель» (г. Екатеринбург), и ОАО «Научно-исследовательский кабельный институт» (г. Томск).

Мощность производства по весу меди составляет более 20000 тон в год, в составе завода 5 цехов основного производства, производственная площадь цехов – 60000 квадратных метров, численность работающих около 1500 человек.

В номенклатуре завода 35 групп кабельных изделий по общероссийской классификации. Номенклатура выпускаемых изделий носит универсальный характер. На сегодняшний день завод изготавливает более 60 марок кабелей, более 18000 маркоразмеров. Наличие современного оборудования от всемирно известных производителей Австрии, Германии, Англии, Испании, Италии, Финляндии позволяет изготавливать продукцию высокого качества.

У ЗАО «Сибкабель» есть важное преимущество перед другими производителями – тесное сотрудничество с научно-исследовательским кабельным институтом «НИКИ» г. Томска. Институт имеет мощный испытательный центр и хорошо оснащенное опытное производство, что позволяет в условиях жесткой конкуренции оперативно реагировать на рыночные изменения, модернизируя имеющиеся, либо предлагая новые виды продукции.

На предприятии функционирует сертифицированная система менеджмента качества, которая прошла проверку на соответствие

требованиям ГОСТ Р ИСО 9001-2008 и МС ИСО 9001:2008, 300 марок кабельно–проводниковых изделий имеют сертификаты соответствия. Сертификат соответствия, выданный предприятию, удостоверяет, что система менеджмента качества предприятия распространяется на проектирование, разработку, производство и поставку кабелей, проводов и шнуров.

С целью обеспечения экологического благополучия, снижения отрицательного воздействия на окружающую среду при одновременном снижении удельных расходов материалов, экономии энергоресурсов на предприятии разработана и внедрена система экологического менеджмента в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 14001-2007 (МС ИСО 14001:2004). С 2007 года система экологического менеджмента предприятия сертифицирована в системе обязательной сертификации по экологическим требованиям на соответствие требований ГОСТ Р ИСО 14001-2007.

В настоящей работе определение СХН по напряжению будет выполняться для двигательной нагрузки, запитанной от второй секции шин 6 кВ подстанции 35/6 кВ Сибкабель, которая запитана от шин 35 кВ подстанции 110/35/10 кВ Восточная Томской энергосистемы по двум воздушным линиям электропередачи.

Согласно принципиальной однолинейной электрической схеме электроснабжения ЗАО «Сибкабель», приведенной в Приложении А, от второй секции шин 6 кВ получают питание два синхронных двигателя СДРЗ–14–56–12У3 и два асинхронных двигателя ДА304–400ХК–4МУ1, с техническими характеристиками, приведенными в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1 – Технические характеристики синхронного двигателя СДРЗ–14–56–12У3

Наименование параметра	Значение параметра
Марка двигателя	СДРЗ–14–56–12У3
Тип двигателя	Неявнополюсный синхронный двигатель
Номинальное напряжение	$U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$
Номинальная мощность	$P_{\text{ном}} = 315 \text{ кВт}$
Частота вращения	$n = 500 \text{ об/мин.}$
Коэффициент полезного действия (КПД)	$\eta = 92,5 \%$
Номинальный коэффициент активной мощности	$\cos(\varphi_{\text{ном}}) = 0,9 \text{ о.е.}$
Статический момент сопротивления	$M_{\text{ст}} = 0,5 \text{ о.е.}$
Дополнительный момент сопротивления, возникающий при трогании двигателя	$M_{\text{трөг.}} = 0,1 \text{ о.е.}$
Кратность асинхронного момента по отношению к пусковому моменту	$M_{\text{асх}} / M_{\text{пуск}} = 1 \text{ о.е.}$
Механическая постоянная инерции двигателя	$J = 5,5 \text{ сек.}$
Синхронное реактивное сопротивление по продольной оси	$x_d = 182 \text{ Ом}$
Переходное реактивное сопротивление по продольной оси	$x_d' = 25 \text{ Ом}$
Сверхпереходное реактивное сопротивление по продольной оси	$x_d'' = 18 \text{ Ом}$
Переходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутой обмотке статора	$T_{d0}' = 3 \text{ сек.}$
Тип возбудителя	Независимое тиристорное возбуждение
Постоянная времени возбудителя	$T_{\text{возб}} = 0,02 \text{ сек.}$
Автоматическое регулирование возбуждения	Отсутствует

Таблица 2 – Технические характеристики асинхронного двигателя ДА304–400ХК–4МУ1

Наименование параметра	Значение параметра
Марка двигателя	ДА304–400ХК–4МУ1
Тип двигателя	Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором
Номинальное напряжение	$U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$
Номинальная мощность	$P_{\text{ном}} = 315 \text{ кВт}$
Частота вращения	$n = 1500 \text{ об/мин.}$
Коэффициент полезного действия (КПД)	$\eta = 93,7 \%$
Номинальный коэффициент активной мощности	$\cos(\varphi_{\text{ном}}) = 0,86 \text{ о.е.}$
Статический момент сопротивления	$M_{\text{ст}} = 0,5 \text{ о.е.}$
Дополнительный момент сопротивления, возникающий при трогании двигателя	$M_{\text{трөг.}} = 0,1 \text{ о.е.}$
Коэффициент загрузки двигателя	$k_{\text{загр}} = 0,7 \text{ о.е.}$
Механическая постоянная времени двигателя вместе с приводным механизмом	$T_{\text{дв}} = 0,8 \text{ сек.}$
Кратность максимального момента по отношению к номинальному	$M_{\text{max}} / M_{\text{ном}} = 2,8 \text{ о.е.}$
Кратность пускового момента по отношению к номинальному	$M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}} = 1,3 \text{ о.е.}$
Кратность пускового тока по отношению к номинальному	$I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}} = 7 \text{ о.е.}$
Скольжение при номинальной нагрузке на валу	$s_{\text{ном}} = 2 \%$

Двигатели СДРЗ-14-56-12У3 предназначены для привода механизмов, работающих в среде с токопроводящим мелкодисперсным техническим углеродом. Двигатели рассчитаны для работы от сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 6000 В в продолжительном режиме работы S1. Степень защиты двигателя — IP54. Конструктивное исполнение — IM 7601 или IM 7621 по ГОСТ 2479-6579. Двигатели выполняются на подшипниках

качения с горизонтальным валом, с одним свободным цилиндрическим концом вала.

Электродвигатели асинхронные трехфазные с короткозамкнутым ротором серии ДАЗО4 предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения, например, насосы, вентиляторы, дымососы. Двигатели предназначены для работы от сети переменного тока частотой 50 Гц напряжением 6000 В.

Согласно принципиальной однолинейной электрической схеме электроснабжения ЗАО «Сибкабель», приведенной в Приложении А, в нормальном режиме работы на подстанции установлены два трансформатора типа ТДНС-10000/35 с техническими характеристиками, приведенными в табл. 3.

Таблица 3 – Технические характеристики трансформатора ТДНС-10000/35

Наименование параметра	Значение параметра
Тип	ТДНС-10000/35
Диспетчерские номера	Т-1 и Т-2
Пределы регулирования	$\pm 8 \times 1,5\%$
Напряжение обмоток	$U_{\text{вн}} = 36,75 \text{ кВ}$, $U_{\text{нн}} = 6,3 \text{ кВ}$
Напряжение короткого замыкания	$U_{\text{кз}} = 8\%$
Потери активной мощности на холостой ход	$\Delta P_{\text{xx}} = 60 \text{ кВт}$
Потери короткого замыкания	$\Delta P_{\text{кз}} = 12,5 \text{ кВт}$
Ток холостого хода	$I_{\text{xx}} = 0,6\%$
Активное сопротивление	$R_{\text{тр}} = 0,81 \text{ Ом}$
Реактивное сопротивление	$X_{\text{тр}} = 10,8 \text{ Ом}$
Потери реактивной мощности на холостой ход	$\Delta Q_{\text{xx}} = 60 \text{ кВАр}$
Номер ответвления РПН в нормальном режиме работы	11

Технические характеристики кабельных и воздушных линий электропередачи приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Технические характеристики кабельных и воздушных линий

Марка, сечение	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км
АС 120/19	0,246	0,349
ААШв(3×150)	0,1921	0,079
ААШв (3×185)	0,1557	0,068
ААШв (3×240)	0,12	0,071
ААБл (3×70)	0,4115	0,08
АСБл (3×70)	0,4115	0,08
ААШв (3×120)	0,2401	0,076
ААБл (3×50)	0,5762	0,083
ААБ (3×95)	0,3032	0,078

Сведения о цеховых трансформаторах представлены в табл. 5.

ЗАО «Сибкабель» относится к многономенклатурным предприятиям, где в одном цеху выпускается несколько видов кабельной продукции, номенклатура которой меняется день ото дня в зависимости от покупательского спроса, следовательно, особенностью режима работы предприятия является неоднородный по времени технологический процесс с изменяющимся режимом работы электрооборудования.

Таблица 5 – Технические характеристики цеховых трансформаторов

Марка	ΔP_{xx} , кВт	$\Delta P_{кз}$, кВт	$R_{тр}$, Ом	$X_{тр}$, Ом	$U_{кз}$, %	I_{xx} , %	$S_{ном}$, МВА	Пределы регулирования, %	$U_{вн}$, кВ	$U_{нн}$, кВ
ТДНС- 10000/35	12,5	60	0,81	10,8	8	0,6	10	$\pm 8 \times 1,5$	36,75	6,3; 10,5
ТМЗ-1600/6	2,65	16,5	0,23	1,33	6	1	1,6	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,38; 0,4
ТМЗ-1000/6	1,9	12,2	0,4	1,93	5,5	1,7	1	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,38; 0,4
ТАМ- 1000/10	4,9	15	1,5	5,29	5,5	5	1	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,38; 0,4
ТМ-1000/6	1,2	12,2	1,2	5,35	5,5	1,2	1	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,38; 0,4

Марка	ΔP_{xx} , кВт	$\Delta P_{кз}$, кВт	$R_{тр}$, Ом	$X_{тр}$, Ом	$U_{кз}$ %	I_{xx} %	$S_{ном}$ МВА	Пределы регулирования, %	$U_{вн}$, кВ	$U_{нн}$, кВ
ТМФ-1000/6	1,7	10,6	0,38	2,13	6	1,3	1	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,38; 0,4
ТМ-560/6	1,25	7,6	0,87	3,43	5,5	1,7	0,56	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,38; 0,4
ТМ-630/10	1,25	7,6	1,91	8,52	5,5	1,7	0,63	$\pm 2 \times 2,5$ %	6	0,38; 0,4

РАЗДЕЛ 2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ ДЛЯ СИНХРОННОГО И АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЕЙ АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА И РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1 Представление двигательной нагрузки статическими характеристиками нагрузки по напряжению

Мощность, потребляемая нагрузкой, в общем случае зависит от напряжения U и частоты f электрической сети [1,5]. Поэтому нагрузка, в том числе и двигательная, может быть представлена статическими характеристиками по напряжению и частоте (СХН):

$$\underline{S}_H = P_H(U, f) + j \cdot Q_H(U, f); \quad (1)$$

В практических расчетах применяются СХН по напряжению при условии постоянства частоты в электрической сети:

$$\underline{S}_H = P_H(U) + j \cdot Q_H(U) \text{ при } f = \text{const}; \quad (2)$$

Аналитически СХН можно выразить в виде полиномов n – ой степени, тогда СХН по напряжению можно записать в виде выражений:

$$\begin{aligned} P_H(U) &= P_{\text{баз}} \cdot \left[a_0 + a_1 \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{баз}}} \right) + a_2 \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{баз}}} \right)^2 + \dots + a_n \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{баз}}} \right)^n \right]; \\ Q_H(U) &= Q_{\text{баз}} \cdot \left[\beta_0 + \beta_1 \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{баз}}} \right) + \beta_2 \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{баз}}} \right)^2 + \dots + \beta_n \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{баз}}} \right)^n \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где:

$P_{\text{баз}}, Q_{\text{баз}}$ – активная и реактивная мощности нагрузки, соответствующие базисному напряжению;

U – текущее значение напряжения узла нагрузки;

$U_{\text{баз}}$ – базисное значение напряжения узла нагрузки;

$a_0, a_1 \dots a_{n-1}, a_n$ – коэффициенты полиномов статических характеристик по активной мощности;

$\beta_0, \beta_1 \dots \beta_{n-1}, \beta_n$ – коэффициенты полиномов статических характеристик по реактивной мощности.

С достаточной точностью СХН можно представить в виде полиномов второй степени:

$$\begin{aligned} P_{\text{н}}(U) &= P_{\text{баз}} \cdot \left[a_0 + a_1 \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{баз}}} \right) + a_2 \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{баз}}} \right)^2 \right]; \\ Q_{\text{н}}(U) &= Q_{\text{баз}} \cdot \left[\beta_0 + \beta_1 \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{баз}}} \right) + \beta_2 \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{баз}}} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

В расчетах устойчивости, СХН более полно отражают свойства нагрузки, чем в случае задания нагрузки неизменным по модулю и фазе ток, постоянной по модулю мощностью, проводимостью или сопротивлением [1,5].

2.2 Экспериментально-статистические модели определения коэффициентов полиномов СХН

При отсутствии достаточного объема информации о моделируемом объекте уравнения математического описания могут представлять собой систему эмпирических зависимостей и имеют вид регрессионных соотношений между входными и выходными параметрами объекта. В этом случае в структуре уравнений не отражаются физические свойства объекта моделирования. Основным источником информации является эксперимент, а обработка экспериментальных данных осуществляется методами теории вероятностей и математической статистики.

Математической моделью служит функция отклика, связывающая выходной параметр с входными: $Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ или в виде полинома:

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{uj} x_u x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \dots \quad (5)$$

Поскольку в реальном процессе всегда существуют «шумы», изменение величины y носит случайный характер, поэтому при обработке экспериментальных данных получаются выборочные коэффициенты регрессии $\bar{b}$, являющиеся оценками теоретических коэффициентов $\bar{\beta}$. Уравнение регрессии, полученное на основании опыта, запишется как:

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{j=1}^k b_{uj} x_u x_j + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 + \dots \quad (6)$$

Вид уравнения регрессии зависит от выбираемого метода приближения. Обычно используется метод наименьших квадратов.

$$F = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 = \min \text{ или } F = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \min, \quad (7)$$

где:

$y_i, \hat{y}_i$ – экспериментальные и расчетные значения выходного параметра, соответственно.

2.3 Статистические модели в виде нелинейных полиномов. Параболическая регрессия

При составлении статистических моделей возникает необходимость использовать уравнения нелинейной формы, в частности полином второй степени $\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2$. Коэффициенты регрессии могут быть определены методом наименьших квадратов:

$$F = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 \cdot x_i - b_2 \cdot x_i^2)^2 \rightarrow \min. \quad (8)$$

Приравняв нулю частные производные функции по коэффициентам b_0, b_1, b_2 , получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial b_0} &= -2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 \cdot x_i - b_2 \cdot x_i^2) \cdot 1 = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial b_1} &= -2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 \cdot x_i - b_2 \cdot x_i^2) \cdot x_i = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial b_2} &= -2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 \cdot x_i - b_2 \cdot x_i^2) \cdot x_i^2 = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Выполнив преобразования, получим систему линейных уравнений с тремя неизвестными (b_0, b_1, b_2):

$$\begin{cases} b_0 \cdot n + b_1 \cdot \sum_{i=1}^n x_i + b_2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i, \\ b_0 \cdot \sum_{i=1}^n x_i + b_1 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + b_2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i), \\ b_0 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + b_1 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^3 + b_2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n (x_i^2 \cdot y_i). \end{cases} \quad (10)$$

Введем обозначения: $S_1 = \sum_{i=1}^n x_i$; $S_2 = \sum_{i=1}^n x_i^2$; $S_3 = \sum_{i=1}^n x_i^3$; $S_4 = \sum_{i=1}^n x_i^4$;

$$S_5 = \sum_{i=1}^n y_i; S_6 = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i); S_7 = \sum_{i=1}^n (x_i^2 \cdot y_i).$$

С учетом принятых обозначений система примет вид:

$$\begin{cases} b_0 \cdot n + b_1 \cdot S_1 + b_2 \cdot S_2 = S_5, \\ b_0 \cdot S_1 + b_1 \cdot S_2 + b_2 \cdot S_3 = S_6, \\ b_0 \cdot S_2 + b_1 \cdot S_3 + b_2 \cdot S_4 = S_7. \end{cases} \quad (11)$$

Определим неизвестные коэффициенты b_0, b_1, b_2 :

$$b_0 = \frac{\begin{vmatrix} S_5 & S_1 & S_2 \\ S_6 & S_2 & S_3 \\ S_7 & S_3 & S_4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & S_1 & S_2 \\ S_1 & S_2 & S_3 \\ S_2 & S_3 & S_4 \end{vmatrix}} = \frac{S_5 S_2 S_4 + S_6 S_3 S_2 + S_7 S_1 S_3 - S_7 S_2 S_2 - S_6 S_1 S_4 - S_5 S_3 S_3}{n S_2 S_4 + S_1 S_3 S_2 + S_2 S_1 S_3 - S_2 S_2 S_2 - S_1 S_1 S_4 - n S_3 S_3}, \quad (12)$$

$$b_1 = \frac{\begin{vmatrix} n & S_5 & S_2 \\ S_1 & S_6 & S_3 \\ S_2 & S_7 & S_4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & S_1 & S_2 \\ S_1 & S_2 & S_3 \\ S_2 & S_3 & S_4 \end{vmatrix}} = \frac{n S_6 S_4 + S_1 S_7 S_2 + S_2 S_5 S_3 - S_2 S_6 S_2 - S_1 S_5 S_4 - n S_7 S_3}{n S_2 S_4 + S_1 S_3 S_2 + S_2 S_1 S_3 - S_2 S_2 S_2 - S_1 S_1 S_4 - n S_3 S_3}.$$

$$b_2 = \frac{\begin{vmatrix} n & S_1 & S_5 \\ S_1 & S_2 & S_6 \\ S_2 & S_3 & S_7 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & S_1 & S_2 \\ S_1 & S_2 & S_3 \\ S_2 & S_3 & S_4 \end{vmatrix}} = \frac{nS_2S_7 + S_1S_3S_5 + S_2S_1S_6 - S_2S_2S_5 - S_1S_1S_7 - nS_3S_6}{nS_2S_4 + S_1S_3S_2 + S_2S_1S_3 - S_2S_2S_2 - S_1S_1S_4 - nS_3S_3}.$$

Вычисленные коэффициенты системы уравнений (11) и являются искомыми коэффициентами полиномов СХН.

2.4 Реализация метода наименьших квадратов с помощью программы *Microsoft Excel*

Пусть дана таблица значений функции y . В качестве приближающей функции выбираем квадратичную зависимость $y = b_2x^2 + b_1x + b_0$.

Для расчетов воспользуемся табличным процессором *Microsoft Excel*.

1. Добавляем дополнительно столбцы, которые требуются для поиска параметров квадратичной зависимости: x^2 , xy , x^3 , x^4 , x^2y . Производим данные вычисления, а также суммируем все значения по столбцам при помощи функции «СУММ». Пример расчета приведен на рис. 1.

	A	B	C	D	E	F	G
1	x	y	x^2	x*y	x^3	x^4	x^2*y
2	0,9	0,35676	0,81	0,32109	0,729	0,6561	0,28898
3	0,92	0,37514	0,8464	0,34513	0,77869	0,71639	0,31752
4	0,94	0,39215	0,8836	0,36862	0,83058	0,78075	0,3465
5	0,96	0,40788	0,9216	0,39156	0,88474	0,84935	0,3759
6	0,98	0,42243	0,9604	0,41398	0,94119	0,92237	0,4057
7	1	0,43589	1	0,43589	1	1	0,43589
8	1,02	0,44831	1,0404	0,45728	1,06121	1,08243	0,46643
9	1,04	0,45976	1,0816	0,47815	1,12486	1,16986	0,49728
10	1,06	0,47028	1,1236	0,49849	1,19102	1,26248	0,5284
11	1,08	0,47991	1,1664	0,5183	1,25971	1,36049	0,55976
12	9,9	4,24851	9,834	4,2285	9,801	9,80021	4,22237

Рисунок 1 – Пример расчета первого действия

2. Записываем систему для отыскания параметров b_0, b_1, b_2 . В третьем уравнении системы (11) перед b_2 стоит $S_4 = \sum_{i=1}^n x_i^4$, в нашем случае это 9,80021, перед b_1 - $S_3 = \sum_{i=1}^n x_i^3 = 9,801$, перед b_0 - $S_2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 = 9,834$, свободный член суммы $S_7 = \sum_{i=1}^n (x_i^2 \cdot y_i) = 4,22237$, и так далее для второго и первого уравнения системы. Записываем эти значения в рядом стоящие ячейки, как показано на рис. 2.

	A	B	C	D	E	F	G
1	x	y	x^2	x*y	x^3	x^4	x^2*y
2		0,9	0,35676	0,81	0,32109	0,729	0,28898
3		0,92	0,37514	0,8464	0,34513	0,77869	0,31752
4		0,94	0,39215	0,8836	0,36862	0,83058	0,3465
5		0,96	0,40788	0,9216	0,39156	0,88474	0,3759
6		0,98	0,42243	0,9604	0,41398	0,94119	0,4057
7		1	0,43589	1	0,43589	1	0,43589
8		1,02	0,44831	1,0404	0,45728	1,06121	0,46643
9		1,04	0,45976	1,0816	0,47815	1,12486	0,49728
10		1,06	0,47028	1,1236	0,49849	1,19102	0,5284
11		1,08	0,47991	1,1664	0,5183	1,25971	0,55976
12		9,9	4,24851	9,834	4,2285	9,801	4,22237
13							
14	9,80021	9,801	9,834		4,22237		
15	9,801	9,834	9,9		4,2285		
16	9,834	9,9	10		4,24851		

Рисунок 2 – Пример расчетов второго действия

3. Решаем систему матричным методом. Выделяем блок ячеек 3:3 и обращаемся к функции Excel «МОБР», указываем блок ячеек, где находится матрица коэффициентов системы, нажимаем ОК, затем обращаемся к строке формул и активируем формулу при помощи клавиш CTRL+SHIFT+ENTER, в результате имеем обратную матрицу для матрицы коэффициентов системы (рис. 3).

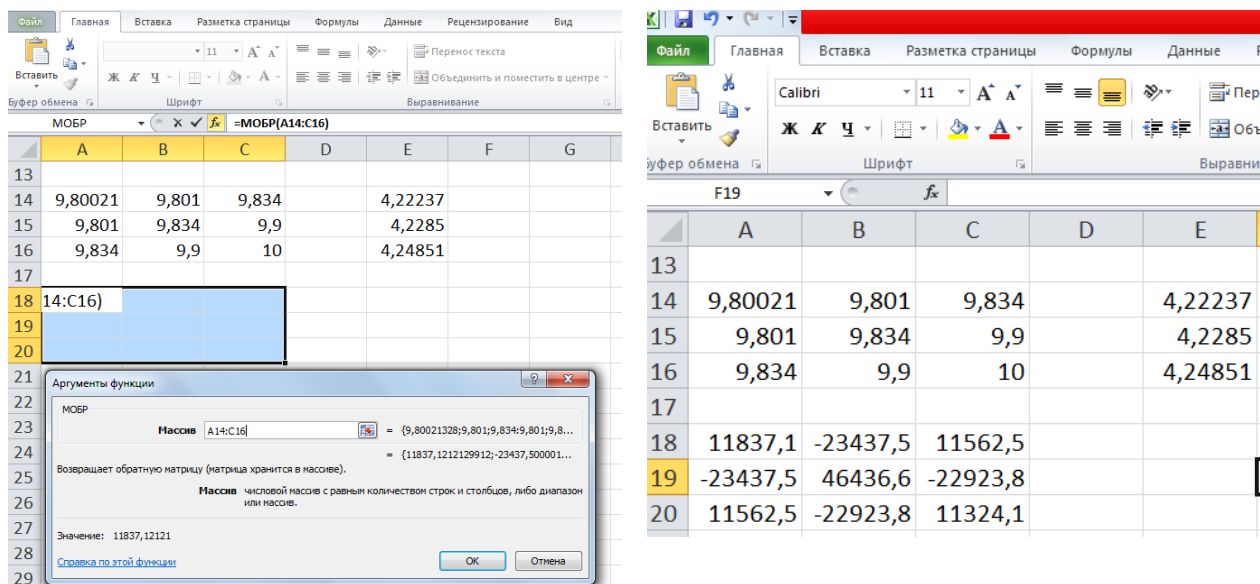


Рисунок 3 – Пример расчетов третьего действия

4. Выделяем блок ячеек для результата, обращаемся к функции «МУМНОЖ» и перемножаем обратную матрицу на матрицу столбе свободных членов, активируем формулу при помощи клавиш CTRL+SHIFT+ENTER. Полученный результат представляет собой коэффициенты полиномов b_0, b_1, b_2 (рис. 4).

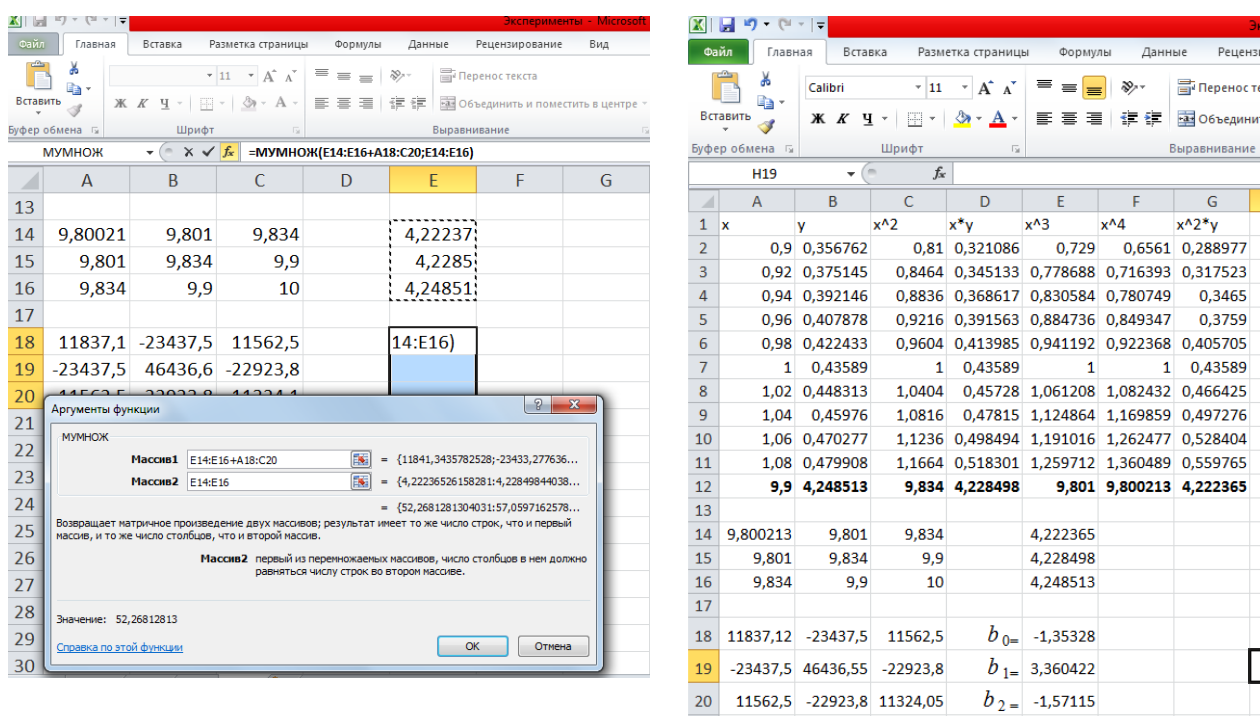


Рисунок 4 – Пример расчетов четвертого действия

2.5 Применение аналитического метода получения статических характеристик нагрузки по напряжению для двигательной нагрузки, запитанной от второй секции шин ЗАО «Сибкабель»

При использовании аналитического (расчетного) метода для определения статических характеристик важное значение имеет состав исходной информации о параметрах и технических характеристиках электроприёмников. Предлагаемые модели и способы расчета опираются на набор данных об объекте, который можно получить из общедоступных справочников или из технической документации по электрооборудованию.

При получении статических характеристик двигательной нагрузки расчётным способом принимается ряд допущений, а именно:

- отсутствие апериодической составляющей тока статора;
- активное сопротивление обмотки статора принимается равным нулю;
- не учитывается влияние насыщения стали в главной магнитной цепи как синхронного, так и асинхронного двигателя;
- не учитываются механические потери в активных частях двигателя;
- двигатели работают с постоянным, не изменяющимся во времени механическим моментом на валу;
- СХН синхронных двигателей, полученные расчётным методом, относятся не к номинальной мощности, а к полной мощности, принятой за базис.

2.5.1 Получение СХН для синхронного двигателя

Расчёт СХН для нерегулируемого синхронного двигателя ($i_f = \text{const}$) и постоянной нагрузки на валу ($M = M_{\text{ном}} = \text{const}$) проводится в относительных единицах в следующей последовательности:

1. определяют ЭДС фазы обмотки статора синхронного двигателя в номинальном режиме работы:

$$E = \sqrt{(\cos(\varphi_{\text{ном}}))^2 + (x_d \cdot \sin(\varphi_{\text{ном}}))^2} = \sqrt{(0,9)^2 + (1,713 \cdot 0,436)^2} = 2,33 \text{ о.е.}$$

2. определяют коэффициент энергетической эффективности СД:

$$K_{\text{ЭЭ}} = \cos(\varphi_{\text{ном}}) \cdot \eta = 0,9 \cdot 0,925 = 0,832 \text{ о.е.}$$

3. задаются относительными значениями тока возбуждения и внешнего вращающего момента. Так как расчётная модель рассматриваемого синхронного двигателя предусматривает работу двигателя в номинальном режиме работы, то данные параметры принимаются равными единице:

$$K_f = \frac{i_f}{i_{fн}} = 1; \quad K_{fM} = \frac{M}{M_{\text{ном}}} = 1.$$

4. задаются относительным значением напряжения питающей сети:

$$U_* = \frac{U}{U_{\text{ном}}} = 1,05,$$

где:

U – напряжение питающей сети;

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение синхронного двигателя.

5. определяют базисное значение мощности:

$$S_{\text{баз}} = \frac{P_{\text{ном}}}{K_{\text{ЭЭ}}} = \frac{315}{0,832} = 378,4 \text{ кВА};$$

6. определяют рабочий угол нагрузки синхронного двигателя:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{K_{fM} \cdot K_{\text{ЭЭ}} \cdot x_d}{U_* \cdot E}\right) = \arcsin\left(\frac{1 \cdot 0,832 \cdot 1,713}{1,05 \cdot 2,33}\right) = 35,68 \text{ град};$$

7. определяют активную, реактивную и полную составляющую тока фазы обмотки статора:

$$I_a = \frac{E \cdot \sin(\varphi_{\text{ном}})}{x_d} = \frac{2,33 \cdot 0,436}{1,713} = 0,793 \text{ о.е};$$

$$I_r = \frac{E \cdot \cos(\varphi_{\text{ном}}) - U_*}{x_d} = \frac{2,33 \cdot 0,9 - 1,05}{1,713} = 0,492 \text{ о.е};$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} = \sqrt{0,793^2 + 0,492^2} = 0,933 \text{ о.е.}$$

9. в относительных единицах определяют активную и реактивную мощности, потребляемые синхронным двигателем, при заданном напряжении U_* :

$$P = U_* \cdot I_a = 1,05 \cdot 0,793 = 0,832 \text{ о.е.};$$

$$Q = U_* \cdot I_r = 1,05 \cdot 0,492 = 0,517 \text{ о.е.}$$

10. изменяя значение напряжения питающей сети $U_* = \text{var} \in [0,8; 1,2]$ с шагом 0,05 о.е, в относительных единицах рассчитывают активную и реактивную мощности, потребляемые синхронным двигателем, повторяя расчёт аналогично п. 4–9. Результаты расчётов заносятся в таблицу 6.

Таблица 6 – Результаты расчёта зависимостей мощностей от напряжения для синхронного двигателя

U , о.е.	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1,05	1,1	1,15	1,2
P , о.е.	0,832	0,832	0,832	0,832	0,832	0,832	0,832	0,832	0,832
Q , о.е.	0,327	0,38	0,425	0,461	0,492	0,517	0,537	0,552	0,563

Для получения коэффициентов полиномов, описывающих статические характеристики нагрузки синхронного двигателя, используют метод наименьших квадратов.

Для этого необходимо:

1. обозначить коэффициенты полиномов для активной мощности как a_0, a_1, a_2 , а для реактивной – b_0, b_1, b_2 .
2. сформировать системы уравнений для активной и реактивной мощностей вида:

$$\left. \begin{array}{l} 0,832 = a_0 + a_1 \cdot 0,8 + a_2 \cdot 0,8^2 \\ 0,832 = a_0 + a_1 \cdot 0,85 + a_2 \cdot 0,85^2 \\ 0,832 = a_0 + a_1 \cdot 0,9 + a_2 \cdot 0,9^2 \\ 0,832 = a_0 + a_1 \cdot 0,95 + a_2 \cdot 0,95^2 \\ 0,832 = a_0 + a_1 \cdot 1 + a_2 \cdot 1^2 \\ 0,832 = a_0 + a_1 \cdot 1,05 + a_2 \cdot 1,05^2 \\ 0,832 = a_0 + a_1 \cdot 1,1 + a_2 \cdot 1,1^2 \\ 0,832 = a_0 + a_1 \cdot 1,15 + a_2 \cdot 1,15^2 \\ 0,832 = a_0 + a_1 \cdot 1,2 + a_2 \cdot 1,2^2 \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} 0,327 = b_0 + b_1 \cdot 0,8 + b_2 \cdot 0,8^2 \\ 0,380 = b_0 + b_1 \cdot 0,85 + b_2 \cdot 0,85^2 \\ 0,425 = b_0 + b_1 \cdot 0,9 + b_2 \cdot 0,9^2 \\ 0,461 = b_0 + b_1 \cdot 0,95 + b_2 \cdot 0,95^2 \\ 0,492 = b_0 + b_1 \cdot 1 + b_2 \cdot 1^2 \\ 0,517 = b_0 + b_1 \cdot 1,05 + b_2 \cdot 1,05^2 \\ 0,537 = b_0 + b_1 \cdot 1,1 + b_2 \cdot 1,1^2 \\ 0,552 = b_0 + b_1 \cdot 1,15 + b_2 \cdot 1,15^2 \\ 0,563 = b_0 + b_1 \cdot 1,2 + b_2 \cdot 1,2^2 \end{array} \right\}$$

Данные системы уравнений относятся к виду переопределенных систем линейных алгебраических уравнений, в которых число уравнений больше числа неизвестных. При решении переопределенных систем организуется поиск такого вектора, который будет наилучшим образом удовлетворять всем уравнениям системы.

3. переписать системы уравнений в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} 0,832 \\ 0,832 \\ 0,832 \\ 0,832 \\ 0,832 \\ 0,832 \\ 0,832 \\ 0,832 \\ 0,832 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0,80 & 0,80^2 \\ 1 & 0,85 & 0,85^2 \\ 1 & 0,90 & 0,90^2 \\ 1 & 0,95 & 0,95^2 \\ 1 & 1,00 & 1,00^2 \\ 1 & 1,05 & 1,05^2 \\ 1 & 1,10 & 1,10^2 \\ 1 & 1,15 & 1,15^2 \\ 1 & 1,20 & 1,20^2 \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} 0,327 \\ 0,380 \\ 0,425 \\ 0,461 \\ 0,492 \\ 0,517 \\ 0,537 \\ 0,552 \\ 0,563 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0,80 & 0,80^2 \\ 1 & 0,85 & 0,85^2 \\ 1 & 0,90 & 0,90^2 \\ 1 & 0,95 & 0,95^2 \\ 1 & 1,00 & 1,00^2 \\ 1 & 1,05 & 1,05^2 \\ 1 & 1,10 & 1,10^2 \\ 1 & 1,15 & 1,15^2 \\ 1 & 1,20 & 1,20^2 \end{pmatrix}.$$

5. провести решение в программе *Microsoft Excel* так, как это показано в п. 2.4. В результате для рассматриваемого синхронного двигателя получены коэффициенты полиномов, представленные в таблице 7.

Таблица 7– Коэффициенты полиномов СХН СД

a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2
0,832	0	0	–1,264	2,933	–1,177

Статические характеристики активной и реактивной мощности по напряжению примут вид:

$$P = S_{\text{баз}} \cdot (a_0 + a_1 \cdot U_* + a_2 \cdot U_*^2) = 378,4 \cdot (0,832 + 0 \cdot U_* + 0 \cdot U_*^2),$$

$$Q = S_{\text{баз}} \cdot (b_0 + b_1 \cdot U_* + b_2 \cdot U_*^2) = 378,4 \cdot (-1,264 + 2,933 \cdot U_* - 1,177 \cdot U_*^2).$$

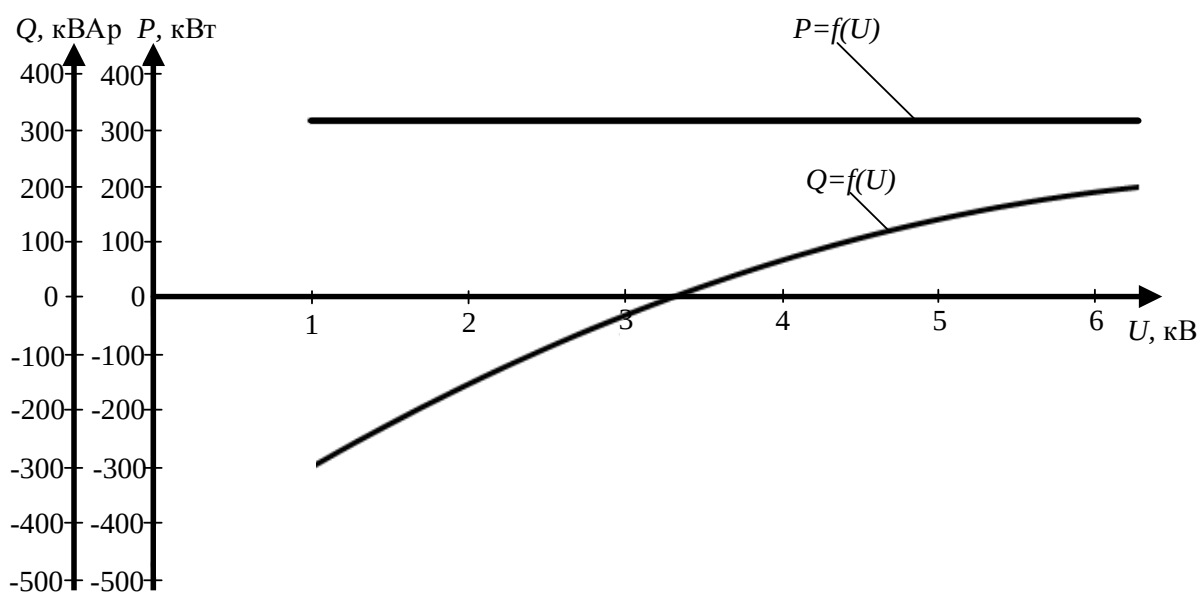


Рисунок 5 – Статические характеристики нагрузки по напряжению для синхронного двигателя

2.5.2 Получение СХН для асинхронного двигателя

Расчёт СХН для асинхронного двигателя при постоянной нагрузке на валу ($M=M_{\text{ном}}=\text{const}$) проводится в относительных единицах в следующей последовательности:

1. определяют коэффициент энергетической эффективности АД:

$$K_{\text{ЭЭ}} = \cos(\varphi_{\text{ном}}) \cdot \eta = 0,9 \cdot 0,937 = 0,843 \text{ о.е.}$$

2. определяют коэффициент добавочного сопротивления фазы обмотки ротора:

$$K_s = \frac{1 - s_{\text{НОМ}}}{s_{\text{НОМ}}} = \frac{1 - 0,02}{0,02} = 49;$$

3. определяют индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_k = \frac{1}{2K_{\text{ММ}} K_{\text{ЭЭ}}} = \frac{1}{2 \cdot 2,8 \cdot 0,843} = 0,212 \text{ о.е.};$$

4. определяют активное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$\begin{aligned} r_2 &= a_1 \cdot s_{\text{НОМ}}^2 + s_{\text{НОМ}} \cdot \sqrt{a_1^2 \cdot s_{\text{НОМ}}^2 - X_k^2} = \\ &= 29,053 \cdot 0,02^2 + 0,02 \cdot \sqrt{29,053^2 \cdot 0,02^2 - 0,212^2} = 0,022 \text{ о.е.}; \end{aligned}$$

где:

$$a_1 = \frac{K_s}{2 \cdot K_{\text{ЭЭ}}} = \frac{49}{2 \cdot 0,843} = 29,053, \text{ — постоянный коэффициент};$$

5. определяют индуктивное сопротивление взаимной индукции:

$$X_{\text{мо}} = \frac{1}{\sin(\varphi) - \frac{\sin(\varphi_2)}{Z_2}} = \frac{1}{0,436 - \frac{0,185}{1,142}} = 3,655 \text{ о.е.};$$

где:

$$Z_2 = \sqrt{X_k^2 + \left(\frac{r_2}{s_{\text{НОМ}}} \right)^2} = \sqrt{0,212^2 + \left(\frac{0,022}{0,02} \right)^2} = 1,142 \text{ о.е.};$$

$$\sin(\varphi_2) = \frac{X_k}{Z_2} = \frac{0,212}{1,142} = 0,185.$$

6. задаются относительным значением внешнего вращающего момента. Так как расчётная модель асинхронного двигателя предусматривает работу двигателя при постоянной нагрузке на валу, то данный параметр принимается равным единице:

$$K_M = \frac{M}{M_{\text{НОМ}}} = 1;$$

7. задаются относительным значением напряжения питающей сети:

$$U_* = \frac{U}{U_{\text{ном}}} = 1,2,$$

где:

U – напряжение питающей сети;

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение асинхронного двигателя.

8. определяют базисное значение мощности:

$$S_{\text{баз}} = \frac{P_{\text{ном}}}{K_{\text{эв}}} = \frac{315}{0,843} = 378,5 \text{ кВА};$$

9. определяют скольжение асинхронного двигателя при заданном относительном напряжении питающей сети U_* :

$$s = \frac{c_1}{2} - \sqrt{\left(\frac{c_1}{2}\right)^2 - c_0} = \frac{0,855}{2} - \sqrt{\left(\frac{0,855}{2}\right)^2 - 0,011} = 0,013 \text{ о.е.};$$

где:

$$c_0 = \left(\frac{r_2}{X_k}\right)^2 = \left(\frac{0,022}{0,212}\right)^2 = 0,011;$$

$$c_1 = \frac{U_*^2 \cdot r_2}{K_M \cdot K_{\text{эв}} \cdot X_k^2} = \frac{U_*^2 \cdot r_2}{K_M \cdot K_{\text{эв}} \cdot X_k^2} = \frac{1,2 \cdot 0,022}{1 \cdot 0,843 \cdot 0,212^2} = 0,855.$$

10. определяют сопротивление фазы обмотки ротора при скольжении s и напряжении питающей сети U_* :

$$Z_{2s} = \sqrt{X_k^2 + \left(\frac{r_2}{s}\right)^2} = \sqrt{0,212^2 + \left(\frac{0,022}{0,013}\right)^2} = 1,694 \text{ о.е.}$$

11. определяют ток фазы обмотки ротора при заданном напряжении питающей сети U_* , а также угол сдвига тока фазы обмотки ротора относительно напряжения:

$$I_2 = \frac{U_*}{Z_{2s}} = \frac{1,2}{1,694} = 0,708 \text{ о.е.};$$

$$\varphi_2 = \arcsin\left(\frac{X_k}{Z_{2s}}\right) = 7,18 \text{ град.}$$

12. определяют индуктивное сопротивление взаимной индукции при заданном напряжении питающей сети U_* :

$$X_m = \frac{X_{mo}}{1 - a + a \cdot U_*^4} = \frac{3,655}{1 - 0,3 + 0,3 \cdot 1,2^4} = 2,764 \text{ о.е.}$$

13. определяют ток намагничивания при заданном напряжении питающей сети U_* :

$$I_m = \frac{U_*}{X_m} = \frac{1,2}{2,764} \text{ о.е.}$$

14. определяют активную, реактивную и полную составляющие тока фазы обмотки статора:

$$\begin{aligned} I_{1a} &= I_2 \cdot \frac{\left(\frac{r_2}{s}\right)}{Z_{2s}} = 0,708 \cdot \frac{\left(\frac{0,022}{0,013}\right)}{1,694} = 0,703 \text{ о.е;} \\ I_{1r} &= I_2 \cdot \frac{X_k}{Z_{2s}} = 0,708 \cdot \frac{0,212}{1,694} = 0,523 \text{ о.е;} \\ I &= \sqrt{I_a^2 + I_r^2} = \sqrt{0,703^2 + 0,523^2} = 0,876 \text{ о.е.} \end{aligned}$$

15. в относительных единицах определяют активную и реактивную мощности, потребляемые асинхронным двигателем, при заданном напряжении U_* :

$$\begin{aligned} P &= U_* \cdot I_a = 1,2 \cdot 0,703 = 0,843 \text{ о.е;} \\ Q &= U_* \cdot I_r = 1,2 \cdot 0,523 = 0,627 \text{ о.е.} \end{aligned}$$

16. изменяя напряжение питающей сети $U_* = \text{var} \in [0,8; 1,2]$ с шагом 0,05 о.е, в относительных единицах рассчитывают активную и реактивную мощности, потребляемые асинхронным двигателем, повторяя расчёт аналогично п. 7–15. Результаты расчётов заносят в таблицу 8.

Таблица 8 – Результаты расчёта зависимостей мощностей от напряжения для асинхронного двигателя

U , о.е.	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1,05	1,1	1,15	1,2
P , о.е.	0,843	0,843	0,843	0,843	0,843	0,843	0,843	0,843	0,843
Q , о.е.	0,401	0,392	0,395	0,407	0,429	0,462	0,504	0,559	0,627

Для получения коэффициентов полиномов СХН асинхронного двигателя воспользуемся методом наименьших квадратов.

Для этого необходимо:

1. обозначить коэффициенты полиномов для активной мощности как a_0, a_1, a_2 , а для реактивной – b_0, b_1, b_2 .
2. сформировать системы уравнений для активной и реактивной мощностей вида:

$$\left. \begin{array}{l} 0,843 = a_0 + a_1 \cdot 0,8 + a_2 \cdot 0,8^2 \\ 0,843 = a_0 + a_1 \cdot 0,85 + a_2 \cdot 0,85^2 \\ 0,843 = a_0 + a_1 \cdot 0,9 + a_2 \cdot 0,9^2 \\ 0,843 = a_0 + a_1 \cdot 0,95 + a_2 \cdot 0,95^2 \\ 0,843 = a_0 + a_1 \cdot 1 + a_2 \cdot 1^2 \\ 0,843 = a_0 + a_1 \cdot 1,05 + a_2 \cdot 1,05^2 \\ 0,843 = a_0 + a_1 \cdot 1,1 + a_2 \cdot 1,1^2 \\ 0,843 = a_0 + a_1 \cdot 1,15 + a_2 \cdot 1,15^2 \\ 0,843 = a_0 + a_1 \cdot 1,2 + a_2 \cdot 1,2^2 \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} 0,401 = b_0 + b_1 \cdot 0,8 + b_2 \cdot 0,8^2 \\ 0,392 = b_0 + b_1 \cdot 0,85 + b_2 \cdot 0,85^2 \\ 0,395 = b_0 + b_1 \cdot 0,9 + b_2 \cdot 0,9^2 \\ 0,407 = b_0 + b_1 \cdot 0,95 + b_2 \cdot 0,95^2 \\ 0,429 = b_0 + b_1 \cdot 1 + b_2 \cdot 1^2 \\ 0,462 = b_0 + b_1 \cdot 1,05 + b_2 \cdot 1,05^2 \\ 0,504 = b_0 + b_1 \cdot 1,1 + b_2 \cdot 1,1^2 \\ 0,559 = b_0 + b_1 \cdot 1,15 + b_2 \cdot 1,15^2 \\ 0,627 = b_0 + b_1 \cdot 1,2 + b_2 \cdot 1,2^2 \end{array} \right\}$$

3. переписать системы уравнений в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} 0,843 \\ 0,843 \\ 0,843 \\ 0,843 \\ 0,843 \\ 0,843 \\ 0,843 \\ 0,843 \\ 0,843 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0,80 & 0,80^2 \\ 1 & 0,85 & 0,85^2 \\ 1 & 0,90 & 0,90^2 \\ 1 & 0,95 & 0,95^2 \\ 1 & 1,00 & 1,00^2 \\ 1 & 1,05 & 1,05^2 \\ 1 & 1,10 & 1,10^2 \\ 1 & 1,15 & 1,15^2 \\ 1 & 1,20 & 1,20^2 \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} 0,401 \\ 0,392 \\ 0,395 \\ 0,407 \\ 0,429 \\ 0,462 \\ 0,504 \\ 0,559 \\ 0,620 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0,80 & 0,80^2 \\ 1 & 0,85 & 0,85^2 \\ 1 & 0,90 & 0,90^2 \\ 1 & 0,95 & 0,95^2 \\ 1 & 1,00 & 1,00^2 \\ 1 & 1,05 & 1,05^2 \\ 1 & 1,10 & 1,10^2 \\ 1 & 1,15 & 1,15^2 \\ 1 & 1,20 & 1,20^2 \end{pmatrix}.$$

5. провести решение в программе *Microsoft Excel* так, как это показано в п. 3.4. В результате получены коэффициенты полиномов, представленные в табл. 9.

Таблица 9 – Коэффициенты полиномов статических характеристик асинхронного двигателя

a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2
0,843	0	0	2,204	-4,049	2,271

Статические характеристики активной и реактивной мощностей по напряжению примут вид:

$$P = S_{\text{баз}} \cdot (a_0 + a_1 \cdot U_* + a_2 \cdot U_*^2) = 378,5 \cdot (0,843 + 0 \cdot U_* + 0 \cdot U_*^2),$$

$$Q = S_{\text{баз}} \cdot (b_0 + b_1 \cdot U_* + b_2 \cdot U_*^2) = 378,5 \cdot (2,204 - 4,049 \cdot U_* + 2,271 \cdot U_*^2).$$

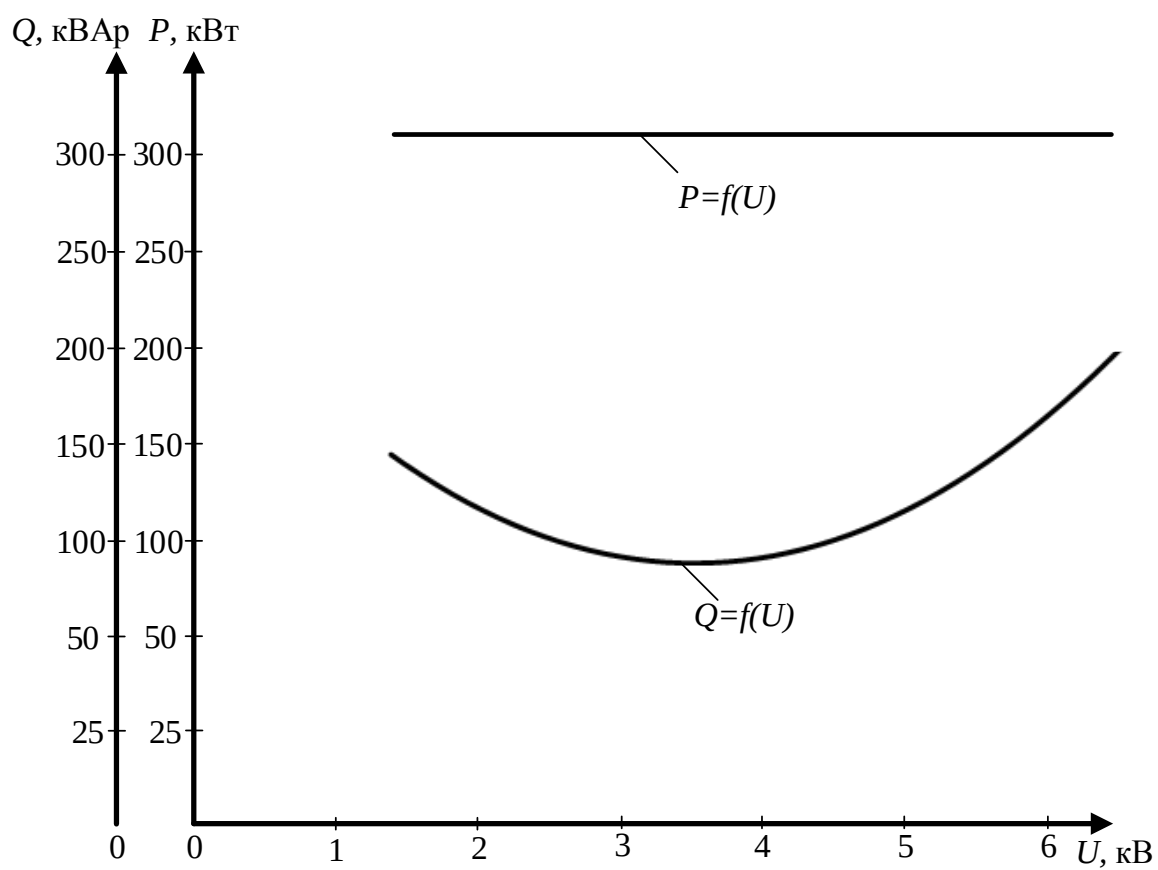


Рисунок 6 – Статические характеристики нагрузки по напряжению для асинхронного двигателя

РАЗДЕЛ 3 ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА RASTRWIN ДЛЯ РАСЧЁТОВ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

Программный комплекс (ПК) RastrWin предназначен для расчётов, анализа и оптимизации режимов электрических сетей энергосистем. В России основными пользователями ПК являются Системный Оператор Единой Энергетической Системы (СО ЕЭС) и его филиалы, Федеральная Сетевая Компания (ФСК), проектные и научно-исследовательские институты.

3.1 Общая характеристика модулей RastrWin3

Программный комплекс содержит следующие модули:

1. Модуль RastrWin, предназначенный для расчётов установившихся режимов. Основными функциями модуля являются:

- расчет установившихся режимов электрических сетей произвольного размера и сложности, напряжением от 0,4 до 1150 кВ;
- расчет установившихся режимов с учетом статических характеристик нагрузки;
- анализ допустимой токовой загрузки ЛЭП и трансформаторов;
- моделирование утяжеления режима и поиск предельных параметров;

2. Модуль RastrKZ, предназначенный для расчета токов коротких замыканий и несимметричных режимов. Основными функциями модуля являются:

- расчет металлических коротких замыканий;
- расчет влияния размыкания линий на токи короткого замыкания и шунты;
- расчет шунта короткого замыкания для моделирования КЗ в расчете установившегося режима и электромеханических переходных процессов;
- расчет тока в грозотросе ЛЭП.

3. Модуль RusTab, предназначенный для расчетов статической и динамической устойчивости двигательной нагрузки, расчетов устойчивости энергосистемы в целом. Основными функциями модуля являются:

- расчёт электромеханических переходных процессов двигательной и генераторной нагрузки с учётом параметров предшествующего режима;
- расчёт электромагнитных переходных процессов двигательной и нагрузки с учётом параметров предшествующего режима;
- моделирование систем возбуждения, АРВ, а также систем форсировки и расфорсировки синхронных машин;
- моделирование систем ограничения перевозбуждения и недовозбуждения синхронных машин.

3.2 Расчёт установившегося режима с учётом статических характеристик нагрузки

Перед проведением расчетов необходимо подготовить исходные данные по схеме электрической сети, а именно:

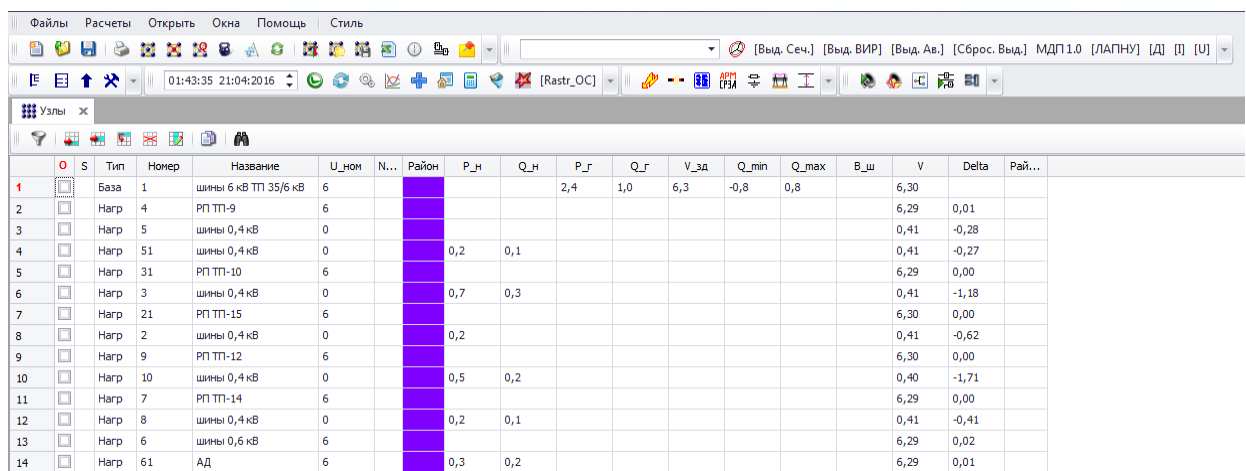
1. начертить схему с указанием всех узлов и ветвей (Приложение А);
2. пронумеровать все узлы электрической сети, включая все промежуточные узлы. Узел в исходных данных программы соответствует электрическим шинам. Номер узла должен быть уникальным положительным числом, сквозная нумерация необязательна. Для каждого узла определить его номинальное напряжение и нанести на схему. Для каждого узла нагрузки определить способ ее задания;
3. для узлов с синхронными машинами определить активную мощность генерации, пределы регулирования реактивной мощности $[Q_{\min}; Q_{\max}]$ и заданный (фиксированный) модуль напряжения ($U_{\text{зад.}}$);
4. при наличии в узле шунтов на землю определить их проводимость в микросименсах;
5. для ЛЭП определить продольное сопротивление и проводимость (проводимость задается в микросименсах, а емкостный характер отражается

знаком минус). При наличии в сети группы параллельных линий желательно присваивать каждой из них свой номер в группе;

6. для трансформаторов определить сопротивления, проводимость шунта на землю и коэффициент трансформации;

7. определить номер балансирующего узла и его модуль напряжения.

Для узлов задают: название, номер, тип, активную и реактивную нагрузки (либо генерацию), заданное (стартовое) и номинальное напряжения, проводимости (для индуктивных и ёмкостных элементов, подключенных в узле), пределы по реактивной мощности (рис. 7).



	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	B_ш	V	Delta	Рай...
1		База	1	шины 6 кВ ТП 35/6 кВ	6					2,4	1,0	6,3	-0,8	0,8		6,30		
2		Нагр	4	РП ТП-9	6											6,29	0,01	
3		Нагр	5	шины 0,4 кВ	0											0,41	-0,28	
4		Нагр	51	шины 0,4 кВ	0		0,2	0,1								0,41	-0,27	
5		Нагр	31	РП ТП-10	6											6,29	0,00	
6		Нагр	3	шины 0,4 кВ	0			0,7	0,3							0,41	-1,18	
7		Нагр	21	РП ТП-15	6											6,30	0,00	
8		Нагр	2	шины 0,4 кВ	0		0,2									0,41	-0,62	
9		Нагр	9	РП ТП-12	6											6,30	0,00	
10		Нагр	10	шины 0,4 кВ	0		0,5	0,2								0,40	-1,71	
11		Нагр	7	РП ТП-14	6											6,29	0,00	
12		Нагр	8	шины 0,4 кВ	0		0,2	0,1								0,41	-0,41	
13		Нагр	6	шины 0,6 кВ	6											6,29	0,02	
14		Нагр	61	АД	6		0,3	0,2								6,29	0,01	

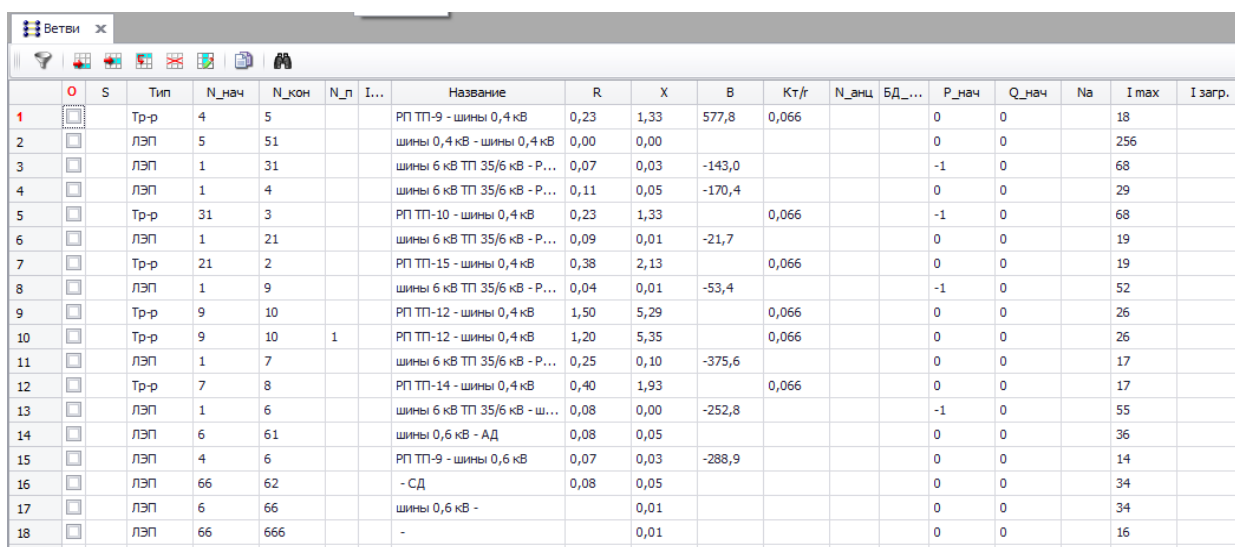
Рисунок 7 – Ввод исходных данных по узлам схемы

На рис. 7 по столбцам слева направо:

- название узла – вводится произвольно, но не более 256 символов;
- номер узла (N) – любое целое число от 1 до 2147483647, кроме нуля;
- тип – в ПК каждый узел имеет определенный тип: балансирующий узел (базисный) – в узле зафиксированы модуль U и угол напряжения dU , а величины активной P_g и реактивной мощностей Q_g рассчитываются с помощью ПК; нагрузочный узел – признак фиксации мощностей нагрузки $P_n = const$, $Q_n = const$ в узле, либо нагрузка задана значениями проводимостей $P_n = g_n U_n^2$, $Q_n = b_n U_n^2$. Рассчитываемыми параметрами являются модуль и фаза напряжения узла. Активная и реактивная мощности нагрузки узла задаются в МВт и МВАр соответственно.

- номинальное напряжение ($U_{\text{ном}}$) – модуль номинального напряжения в узле, кВ;
- активная и реактивная составляющие проводимости шунта в узле ($G_{\text{ш}}$ и $B_{\text{ш}}$), мкСм. Индуктивная проводимость задается со знаком «+», а емкостная – со знаком «-».

Для ветвей задают: названия узлов начала и конца связи, номера узлов, номер параллельности, название связи, сопротивления связи (активные и реактивные), проводимости связи и коэффициент трансформации для трансформаторов (рис. 8).



	O	S	Тип	N_нач	N_кон	N_п	I...	Название	R	X	G	Кт/г	N_анц	БД...	P_нач	Q_нач	Na	I max	I загр.
1	☒		Тр-р	4	5			РП ТП-9 - шины 0,4 кВ	0,23	1,33	577,8	0,066			0	0		18	
2	☐		ЛЭП	5	51			шины 0,4 кВ - шины 0,4 кВ	0,00	0,00					0	0		256	
3	☐		ЛЭП	1	31			шины 6 кВ ТП 35/6 кВ - Р...	0,07	0,03	-143,0				-1	0		68	
4	☐		ЛЭП	1	4			шины 6 кВ ТП 35/6 кВ - Р...	0,11	0,05	-170,4				0	0		29	
5	☐		Тр-р	31	3			РП ТП-10 - шины 0,4 кВ	0,23	1,33		0,066			-1	0		68	
6	☐		ЛЭП	1	21			шины 6 кВ ТП 35/6 кВ - Р...	0,09	0,01	-21,7				0	0		19	
7	☐		Тр-р	21	2			РП ТП-15 - шины 0,4 кВ	0,38	2,13		0,066			0	0		19	
8	☐		ЛЭП	1	9			шины 6 кВ ТП 35/6 кВ - Р...	0,04	0,01	-53,4				-1	0		52	
9	☐		Тр-р	9	10			РП ТП-12 - шины 0,4 кВ	1,50	5,29		0,066			0	0		26	
10	☐		Тр-р	9	10	1		РП ТП-12 - шины 0,4 кВ	1,20	5,35		0,066			0	0		26	
11	☐		ЛЭП	1	7			шины 6 кВ ТП 35/6 кВ - Р...	0,25	0,10	-375,6				0	0		17	
12	☐		Тр-р	7	8			РП ТП-14 - шины 0,4 кВ	0,40	1,93		0,066			0	0		17	
13	☐		ЛЭП	1	6			шины 6 кВ ТП 35/6 кВ - ш...	0,08	0,00	-252,8				-1	0		55	
14	☐		ЛЭП	6	61			шины 0,6 кВ - АД	0,08	0,05					0	0		36	
15	☐		ЛЭП	4	6			РП ТП-9 - шины 0,6 кВ	0,07	0,03	-288,9				0	0		14	
16	☐		ЛЭП	66	62			- СД	0,08	0,05					0	0		34	
17	☐		ЛЭП	6	66			шины 0,6 кВ -		0,01					0	0		34	
18	☐		ЛЭП	66	666			-		0,01					0	0		16	

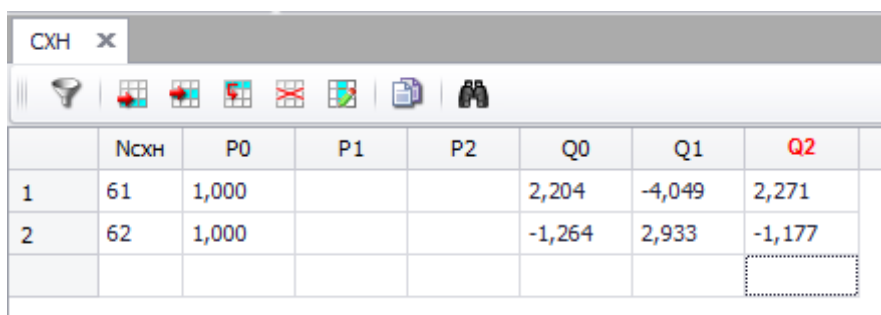
Рисунок 8 – Ввод исходных данных по ветвям схемы

На рис. 8 по столбцам слева направо:

- названия узлов, ограничивающих заданную ветвь – произвольные, но не более 256 символов. Названия узлов не редактируются, так как они автоматически переносятся из таблицы узлов. Номера узлов, ограничивающие заданную ветвь – $N_{\text{нач}}, N_{\text{кон}}$.
- номер параллельности ($N_{\text{п}}$) – номер ветви в группе параллельных ветвей, любое целое число;
- сопротивления связи (R, X) – активное и реактивное сопротивления связи, Ом;

- проводимости связи (G, B) – активная и реактивная проводимости связи, мкСм;
- KT/r , KT/i – вещественная и мнимая составляющие коэффициента трансформации.

Следует отметить, что модели нагрузок могут быть заданы статическими характеристиками активной и реактивной мощности по напряжению: $P_n = f(U)$, $Q_n = f(U)$. ПК обеспечивает возможность задания статических характеристик по напряжению в виде известных коэффициентов полиномов отдельных электроприёмников (ЭП) (рис.9), либо узла нагрузки в целом.



	Nсхн	P0	P1	P2	Q0	Q1	Q2
1	61	1,000			2,204	-4,049	2,271
2	62	1,000			-1,264	2,933	-1,177

Рисунок 9 – Задание статических характеристик по напряжению в виде коэффициентов полиномов

При задании статических характеристик отдельных ЭП базисная активная и реактивная мощность определяются в соответствии с расчётным методом получения СХН. В случае если к узлу подключено несколько ЭП с различными статическими характеристиками, в схеме замещения создается несколько фиктивных узлов, соединённых между собой связями с нулевым сопротивлением, и в каждом из узлов задается статическая характеристика, соответствующая отдельному ЭП.

3.3 Расчёт сопротивления шунта короткого замыкания

Панель программного модуля RastrKZ находится в правом верхнем углу меню (рис.10).

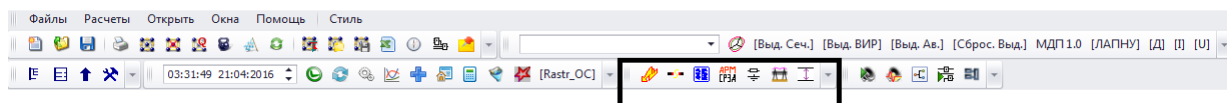


Рисунок 10 – Расположение панели программного модуля RastrKZ в меню программного комплекса RastrWin3

Внешний вид панели, используемой для расчётов сопротивлений шунта короткого замыкания, представлен на рис. 11.

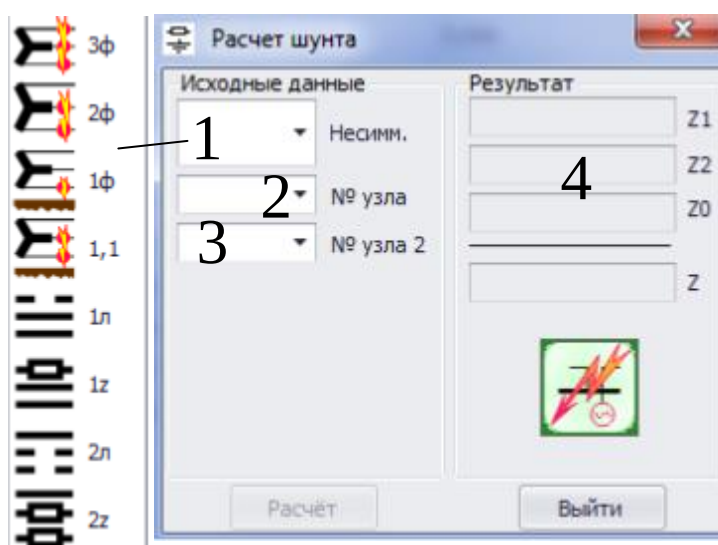


Рисунок 11 – Внешний вид панели для расчета шунта

- в поле №1 задаётся вид несимметрии (3), (2), (1,1), (1);
- в поле №2 выбирается номер узла – начальной точки расчёта сопротивления шунта;
- в поле №3 выбирается номер узла – конечной точки расчёта сопротивления шунта;
- в поле №4 выводятся значения сопротивлений шунта для прямой, обратной и нулевой последовательности, а также суммарное сопротивление шунта для выбранного вида несимметрии.

На рисунке 12 приведен пример расчёта сопротивления шунта трёхфазного короткого замыкания относительно узла №66 исследуемой схемы.

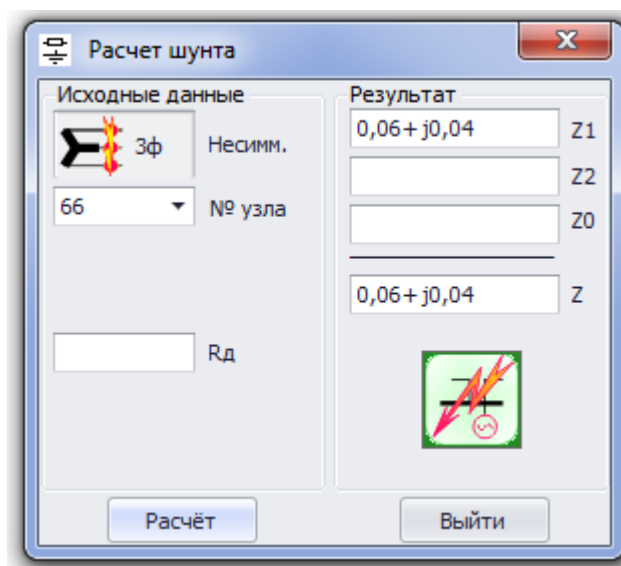


Рисунок 12 – Расчёт сопротивления шунта трёхфазного короткого замыкания исследуемой схемы

3.4 Расчёт электромеханических переходных процессов синхронных и асинхронных двигателей

3.4.1 Принципы формирования исходных данных для расчета электромеханических переходных процессов

При импорте данных установившегося режима необходимо **загрузить файл в формате rg2 и сохранить его по типу «динамика.rst», затем снова загрузить файл «динамика.rst»**, только тогда файл дополняется полями, необходимыми для расчета динамики.

Для упрощения ввода данных возможно создание и ведение справочника оборудования, в котором описаны типовые характеристики устройств. Такой справочник хранится в отдельном файле (оборудование.brd) и может быть загружен с любым файлом динамики.

Панель программного модуля RusTab находится в правом верхнем углу меню программного комплекса RastrWin3 (рис.13).



Рисунок 13 – Расположение панели программного модуля RusTab в меню программного комплекса RastrWin3

Для перехода в окно ввода исходных данных для синхронного и асинхронного двигателей необходимо из главного меню перейти по вкладкам: «Открыть»→«Динамика (ИД)»→«СД (ИД)» и «АД (ИД)» соответственно (рис.14).

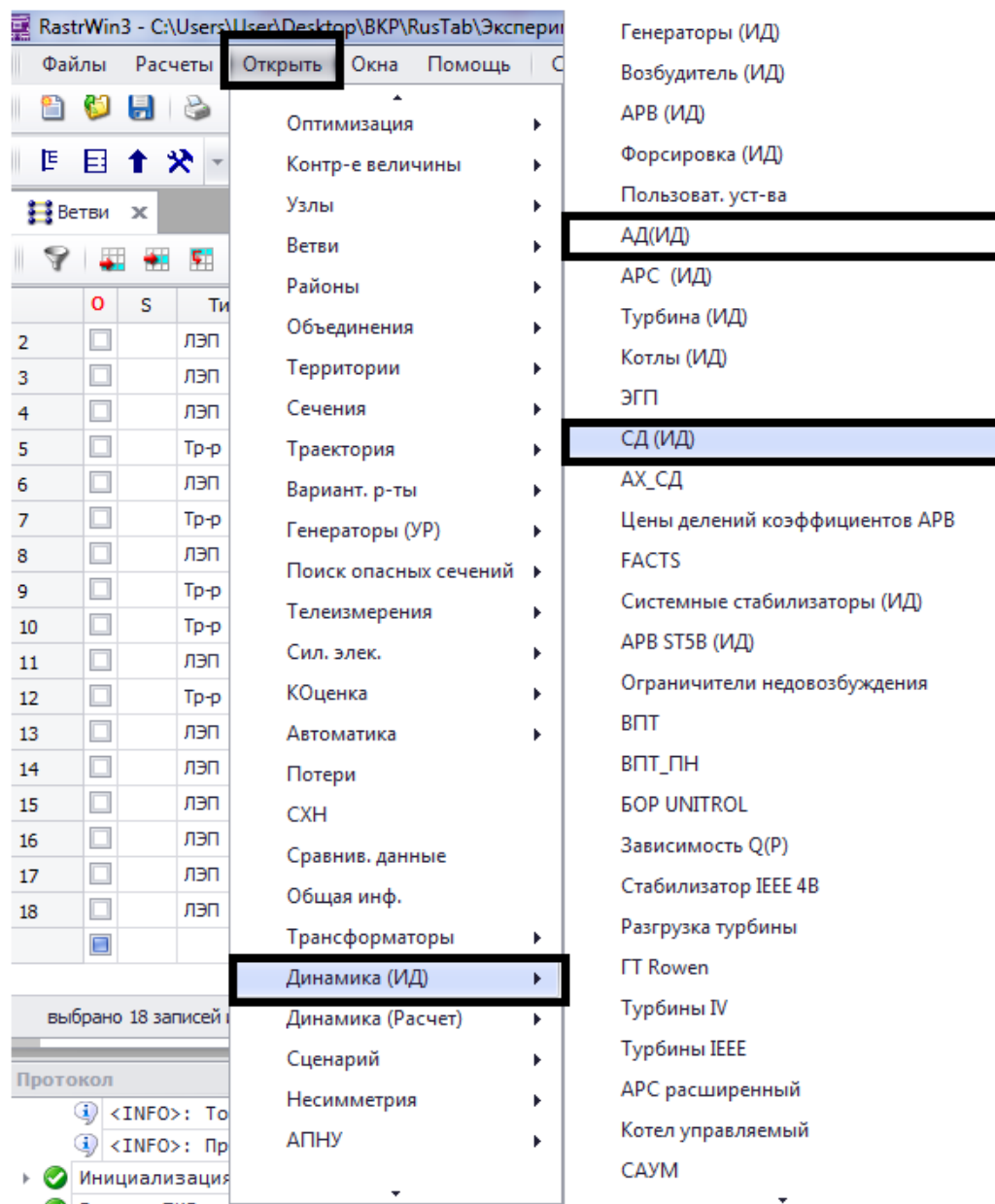


Рисунок 14 – Переход в окно ввода исходных данных для синхронного и асинхронного двигателей

Вид окна задания исходных данных для синхронного двигателя показан на рис. 15.

S	N_агр	Название	N узла	Модель	Марка	N_взб	%	COS(Φ...	P	P_ном	U_ном	COS(Φ...	Mст	Mтрог	Mпуск	s_f	N_ах	K_деп	Mj	Xd
1	2	СДР3-14-56-12У3	62	Эк-Мус...		62	100,000	0,900		0	6	0,900	0,500	0,100			1		10	25,07

Рисунок 15 – Окно задания исходных данных для синхронного двигателя

Для синхронного двигателя задают:

- $[N_{\text{агр}}]$ – номер двигателя (любое целое число). Каждому двигателю присваивается уникальный идентификационный номер;
- $[Модель]$ – тип расчётной модели, например «3-k Mustang»;
- $[N_{\text{узла}}]$ – номер узла, в котором задан двигатель;
- $[N_{\text{взб}}]$ – номер возбuditеля (любое целое число). Каждому двигателю должен соответствовать возбuditель с уникальным идентификационным номером;
- $[\%]$ – процент мощности вырабатываемой синхронным двигателем в узле. Данное значение показывает, какую часть от суммарной мощности узла составляет мощность синхронного двигателя;
- $[\cos(\Phi)_{\text{раб}}]$ – рабочий коэффициент мощности. Знак «+» соответствует режиму недовозбуждения, «-» – режиму перевозбуждения;
- $[U_{\text{ном}}]$ – номинальное напряжение двигателя, кВ;
- $[\cos(\Phi)_{\text{ном}}]$ – номинальный (паспортный) коэффициент мощности;
- $[M_{\text{ст}}]$ – статический момент сопротивления на валу двигателя в долях от номинального, о.е.;
- $[M_{\text{трог}}]$ – дополнительный момент сопротивления в долях от номинального, возникающий при трогании, о.е.;
- $[M_{\text{пуск}}]$ – пусковой момент двигателя в долях от номинального, о.е.;
- $[N_{\text{ах}}]$ – номер асинхронной характеристики;

- $[M_j]$ – механическая постоянная инерции двигателя, сек;
- $[x_d]$ – синхронное реактивное сопротивление по продольной оси, Ом;
- $[x_d']$ – переходное реактивное сопротивление по продольной оси, Ом;
- $[x_d'']$ – сверхпереходное реактивное сопротивление по продольной оси, Ом;
- $[T_{d0}']$ – переходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутой обмотке статора, сек.

Все задаваемые параметры синхронного двигателя, кроме $[M_j]$, $[x_d]$, $[x_d']$, $[x_d'']$ являются справочными и исходными данными.

Пример расчёта сверхпереходного реактивного сопротивления по продольной оси синхронного двигателя.

1. Определяется номинальная полная мощность синхронного двигателя:

$$S_{\text{номСД}} = \frac{P_{\text{номСД}}}{\eta_{\text{ном}} \cdot \cos(\varphi_{\text{ном}})} = \frac{315}{0,925 \cdot 0,9} = 378,4 \text{ кВА},$$

где:

$P_{\text{номСД}}$ – номинальная мощность синхронного двигателя, кВт;

$\eta_{\text{ном}}$ – номинальный коэффициент полезного действия (КПД) СД, о.е;

$\cos(\varphi_{\text{ном}})$ – номинальный коэффициент активной мощности СД, о.е.

2. Определяется сверхпереходное реактивное сопротивление по продольной оси:

$$\begin{aligned} x_d'' &= \left[\frac{1}{I_{\text{пуск}^*}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{M_{\text{пуск}^*} \cdot \cos(\varphi_{\text{ном}})}{I_{\text{пуск}^*}} \right)^2} \right] \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{номСД}}} = \\ &= \left[\frac{1}{5,5} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{1,1 \cdot 0,9}{5,5} \right)^2} \right] \cdot \frac{6,3^2}{378,4} = 18,76 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

где:

$I_{\text{пуск}^*}$ – кратность пускового тока по отношению к номинальному о.е;

$M_{\text{пуск}^*}$ – кратность пускового момента по отношению к номинальному о.е;

$U_{\text{ср.ном}}$ – средне номинальное напряжение, кВ.

Для асинхронной характеристики задают:

- $[N]$ – номер характеристики (любое целое число). Каждой асинхронной характеристике присваивается уникальный идентификационный номер;
- $[s]$ – скольжение, %
- $[M_{\text{ас}}]$ – значение асинхронного момента в долях от номинального, о.е.

Таблица для ввода параметров возбудителей синхронных машин расположена: Открыть – Динамика (ИД) – Возбудитель (ИД) (рис. 16).

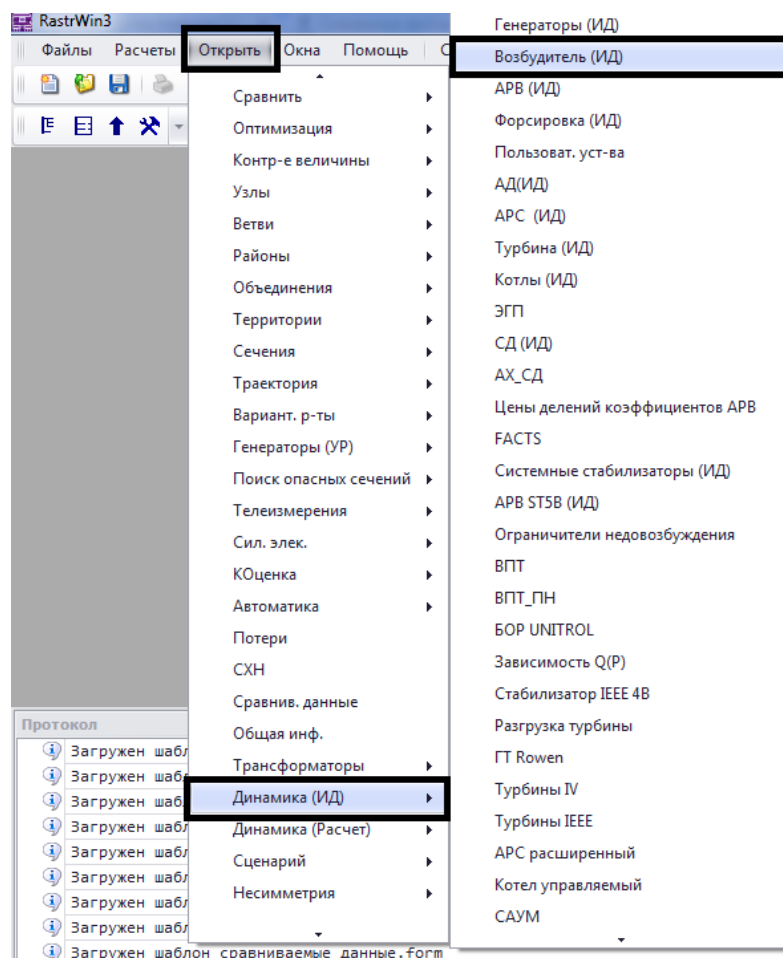


Рисунок 16 – Возбудитель (ИД)

Для возбудителя задают:

- $[N_{\text{агр}}]$ – номер возбудителя (любое целое число). Каждому возбудителю присваивается уникальный идентификационный номер;
- $[T_{\text{возб}}]$ – постоянная времени возбудителя, сек;
- $[\text{Тип}]$ – тип возбуждения (независимое/зависимое);
- $[U_{f\text{ мин}}]$ – минимальное значение напряжения возбуждения, о.е;
- $[U_{f\text{ макс}}]$ – максимальное значение напряжения возбуждения, о.е;
- $[I_{f\text{ мин}}]$ – минимальное значение тока возбуждения, о.е;
- $[I_{f\text{ макс}}]$ – максимальное значение тока возбуждения, о.е.

Пример ввода данных по возбудителям, представлен на рис. 17.

S	N агр	Название	Модель	Марка	N_АПВ	N форс	T_возб	K_иг	K_jf	Uf_min	Uf_max	If_min	If_max	Тип
1	1 319		Мустанг		1 319		0,040			-1,600	2,000	0,600	2,000	Нез...
2	1 320		Мустанг		1 320		0,040			-1,600	2,000	0,600	2,000	Нез...
3	1 321		Мустанг		1 321		0,040			-1,600	2,000	0,600	2,000	Нез...
4	1 322		Мустанг		1 322		0,040			-1,600	2,000	0,600	2,000	Нез...
5	1 323		Мустанг		1 323		0,040			-1,600	2,000	0,600	2,000	Нез...
6	1 324		Мустанг		1 324		0,040			-1,600	2,000	0,600	2,000	Нез...

Рисунок 17 – Ввод данных по возбудителям

Примечания:

1. Номера возбудителей должны быть уникальными для каждого двигателя (генератора) и могут совпадать его номером;
2. Ввод информации о возбудителе осуществляется построчно для каждого возбудителя с занесением необходимых численных значений в соответствующие поля. Отсутствие в каком-либо поле числового значения означает, что параметр равен нулю.

Если синхронный двигатель имеет АРВ, то необходимо ввести параметры регуляторов возбуждения (рис. 18). Регулирование возбуждения оказывает

существенное влияние на процессы при больших возмущениях и применении управляющих воздействий.

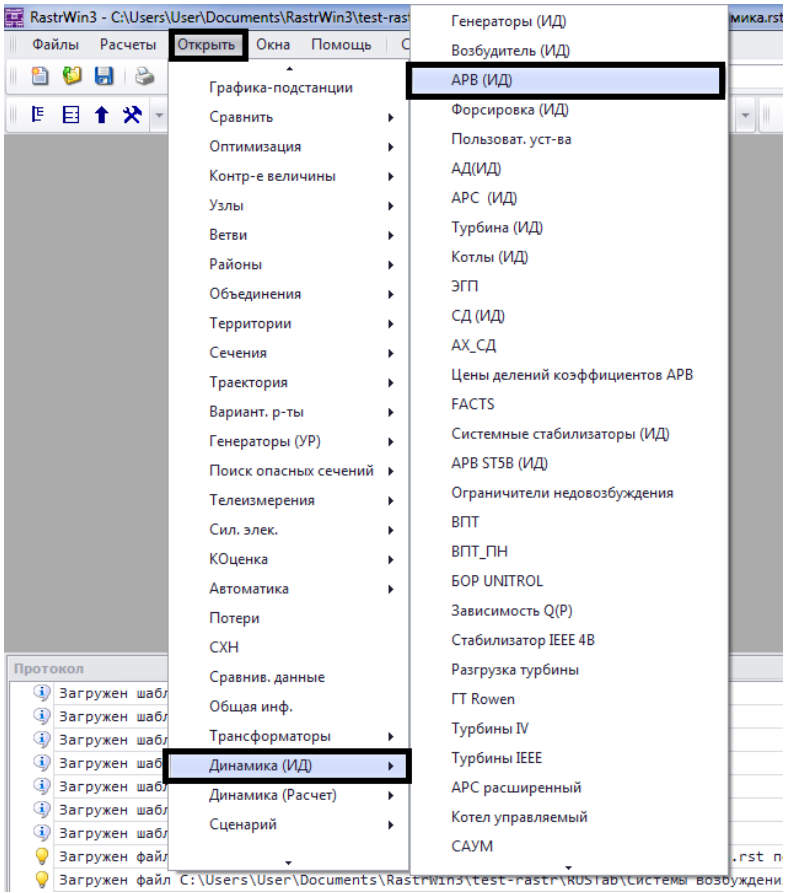


Рисунок 18 – АРВ (ИД)

Все исходные данные для моделирования АРВ вносятся в таблицу (рис. 19), расположенную: Открыть – Динамика (ИД) – АРВ (ИД).

СД (ИД) x		АРВ (ИД) x													
S	N arp	Название	Модель	Марка	T_рв	Ku	K'u	K'if	Kf	K'f	Tf	Umin	Umax	Alpha	

Рисунок 19 – Окно задания исходных данных АРВ для синхронного двигателя

Описание параметров АРВ представлено в табл. 10.

Таблица 10 – Параметры регуляторов возбуждения

Параметр	Описание
S	Состояние АРВ
Na _{rp}	Номер АРВ
Название	Название АРВ
Модель	Модель АРВ. Элементы перечисления: Автовыбор Выбор Пользов. Упрощенная Полная.
Марка	Марка АРВ
T _{рв}	Постоянная времени регулятора возбуждения [с].
U _{min} , U _{max}	Ограничения входного сигнала РВ [ед.ном.воз.].
K _u	Коэффициент регулирования по отклонению напряжения [(ед. ном. воз.)/(ед. напр.)]
K' _u	Коэффициент регулирования по производной напряжения [делений]
K' _{If}	Коэффициент регулирования по производной тока ротора [делений]
K _f	Коэффициент регулирования по отклонению частоты на шинах генератора от ее предшествующего значения [делений]
K' _f	Коэффициент регулирования по производной частоты [делений]
T _f	Постоянная времени в канале отклонения частоты [с]
ALFA	Коэффициент, позволяющий учесть изменение уставки по напряжению при отклонении частоты в сети [о.е.]

Пример ввода исходных данных по АРВ представлен на рис. 20.

S	N арв	Название	Модель	Марка	T_рв	Ku	K'u	K'f	Kf	K'f	Tf	Umin	Umax	Alpha
1	1 320		Пропорциональная		0,040	50,000	3,600	1,000	2,600	2,500	0,900	-6,000	6,000	
2	1 319		Пропорциональная		0,040	50,000	3,600	1,000	2,600	2,500	0,900	-6,000	6,000	
3	1 321		Пропорциональная		0,040	50,000	3,600	1,000	2,600	2,500	0,900	-6,000	6,000	
4	1 322		Пропорциональная		0,040	50,000	3,600	1,000	2,600	2,500	0,900	-6,000	6,000	
5	1 323		Пропорциональная		0,040	50,000	3,600	1,000	2,600	2,500	0,900	-6,000	6,000	
6	1 324		Пропорциональная		0,040	50,000	3,600	1,000	2,600	2,500	0,900	-6,000	6,000	
7	1 325		Пропорциональная		0,040	50,000	3,600	1,000	2,600	2,500	0,900	-6,000	6,000	

Рисунок 20 – Ввод исходных данных по АРВ

Примечания:

1. Номера регуляторов возбуждения должны быть уникальными для каждого двигателя (генератора) и могут совпадать его номером;
2. Ввод информации по АРВ осуществляется построчно для каждого РВ с занесением необходимых численных значений в соответствующие поля. Отсутствие в каком-либо поле числового значения означает, что параметр равен нулю.

Перечень исходных данных для асинхронного двигателя представлен на рис. 21.

S	N	Название	N узла	Модель	Марка	%	P	Q	Tдв	CosФ	Кзг	Мст	Мтрот	Кн	Uдв/У...	Mmax	Mпуск	Iпуск	s_ном	s_г
1	61	ДА3304-400К-ФМУ1	61	ДХН-1		100,000	0,336	0,199	0,800	0,860	0,700	0,500	0,100	4,000	1,000	2,800	1,300	7,000	2,000	70,000

Рисунок 21 – Окно задания исходных данных для асинхронного двигателя

Для асинхронного двигателя задают:

- $[N_{арв}]$ – номер двигателя (любое целое число). Каждому двигателю присваивается уникальный идентификационный номер;
- $[Модель]$ – тип расчётной модели, например «ДХН–1»;
- $[N узла]$ – номер узла, в котором задан двигатель;

- $[\%]$ – процент мощности, вырабатываемой асинхронным двигателем в узле. Данное значение показывает, какую часть от суммарной мощности узла составляет мощность асинхронного двигателя;
- $[T_{\text{дв}}]$ – механическая постоянная времени вместе с приводным механизмом, сек;
- $[\cos(\Phi)_{\text{ном}}]$ – номинальный (паспортный) коэффициент мощности;
- $[K_{\text{заг}}]$ – коэффициент загрузки асинхронного двигателя, о.е.;
- $[M_{\text{ст}}]$ – статический момент сопротивления на валу двигателя в долях от номинального, о.е.;
- $[M_{\text{трог}}]$ – дополнительный момент сопротивления в долях от номинального, возникающий при трогании, о.е.;
- $[M_{\text{пуск}}]$ – пусковой момент двигателя в долях от номинального, о.е.;
- $[U_{\text{дв}}/U_{\text{ном}}]$ – напряжение двигателя в долях от номинального напряжения, о.е.;
- $[M_{\text{макс}}]$ – максимальный момент двигателя в долях от номинального, о.е.;
- $[I_{\text{пуск}}]$ – пусковой ток в долях номинального, о.е.;
- $[s_{\text{ном}}]$ – номинальное скольжение, о.е.;
- $[s_r]$ – скольжение, начиная с которого вводится учет вытеснения тока в роторе.

Все задаваемые параметры асинхронного двигателя являются справочными и исходными данными.

После заполнения таблиц исходных данных, необходимо произвести их сохранение согласно процедуре: Главное меню → Файлы → Сохранить как (рис. 22).

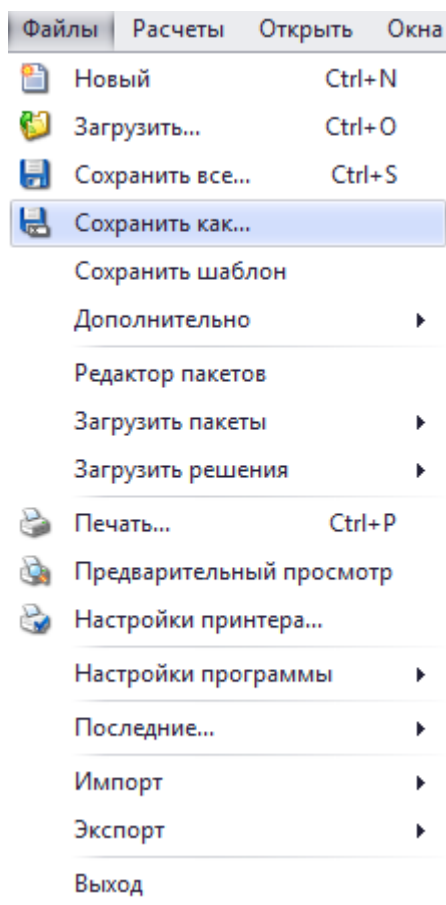


Рисунок 22 – Сохранение данных динамики

Данные о двигателях, АРВ, возбудителях и режим будут объединены в одном файле – динамика.rst (рис. 23).

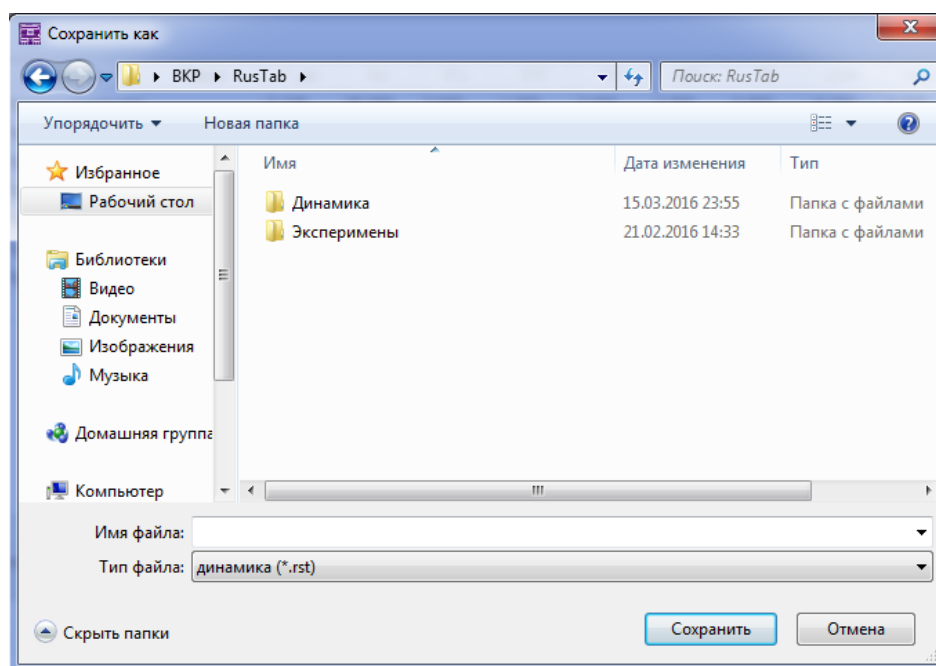


Рисунок 23 – Сохранение данных динамики

В ПК предусмотрена система моделирования событий, которые могут происходить в процессе расчета. Эта система объединяет две очень близкие по смыслу подсистемы: подсистему моделирования автоматики и подсистему моделирования сценария расчета динамики.

Описание автоматики хранится в шаблоне «автоматика.dfw», описание сценариев – в шаблоне «сценарий.scn». Описание автоматики задается в трех таблицах **Открыть/Автоматика**, описание сценария – в трех таблицах **Открыть/Сценарий**.

Каждая подсистема для пользователя представлена тремя однотипными таблицами – **Пусковые органы**, **Логика**, **Действия**. Таблицы **Пусковые органы** и **Действия** оперируют с параметрами режима объектов – генератор N, узел N, Ветвь N1,N2 модели (текущей расчетной схемы). Таблица **Пусковые органы** предназначена для измерения параметров, а таблица **Действие** – для изменения параметров расчетной модели. Таблица **Логика** описывает логические выражения для активизации **Действий** на основании значений контролируемых параметров, задаваемых в таблице **Пусковые органы**.

Общая структура подсистем автоматики и сценария показана на рис. 24.

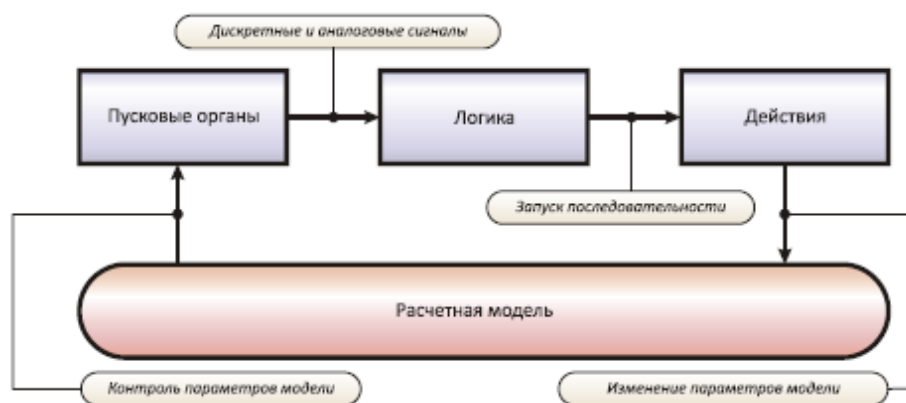


Рисунок 24 – Структура подсистем автоматики и сценария

Исходные данные по автоматике и сценарию последовательно вводятся в таблицы, расположенные по ссылке: **Главное меню** → **Открыть** → **Сценарий (Автоматика)** (рис. 25).

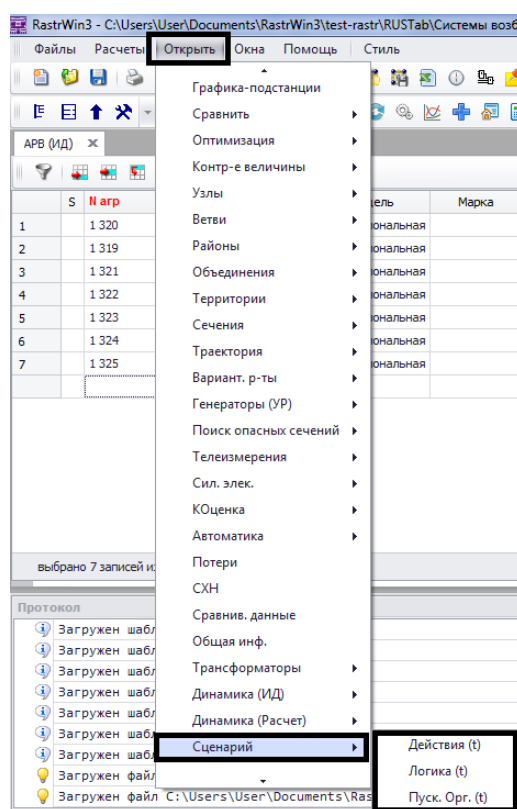


Рисунок 25 – Открытие окна «Сценарий»

Примечание: разделение автоматики и сценария сделано с целью обеспечения независимости описания автоматики от описания событий, и тем самым получить возможность выполнения разных вариантов расчетов на одной и той же автоматике.

Внешний вид этих окон «Сценарий Действия» и «Сценарий Логика» показан на рис. 26 и 27 соответственно.

Действия (t) X										
	N	N группы	Тип	Название	Формула	Тип объекта	Свойство объекта	Ключ объекта	Режим	N сраб
1	5	2	Узел Rш		0.06			666	0	1
2	7	1	Узел Rш		0.3			666	0	1
3	6	2	Узел Xш		0.04			666	0	1
4	8	1	Узел Xш		0.5			666	0	1

Рисунок 26 – Окно моделирования сценария переходного процесса «Сценарий Действия»

Логика (t) X							
	N	Название	N модуля	Тип	Формула	Действия	Выдержка
1	1			Формула	1	A1	0.5
2	2			Формула	1	A2	0.1

Рисунок 27 – Окно моделирования сценария переходного процесса «Сценарий Логика»

«Действие» должно иметь собственный уникальный идентификатор в поле **N** и идентификатор группы, в которую оно входит в поле **N группы**. Выполняться могут только действия, входящие в группу.

Для директивы «Действия» задают:

- **[N]** – номер действия (любое целое число). Каждому действию присваивается уникальный идентификационный номер;
- **[N группы]** – номер группы действий (любое целое число), которые происходят одновременно. Каждой группе присваивается уникальный идентификационный номер;
- **[Тип]** – тип действия. Данное поле характеризует тип параметров, которые подвергаются изменениям в результате сценария, например, сопротивление шунта, потребление/генерация активной и реактивной мощности и т.д.;

- [Формула] – поле содержит расчётное выражение для получения числовых значений параметров, выбранных в поле «Тип»;
- [Ключ объекта] – номер узла, в котором моделируется возмущение;
- [N сраб] – количество срабатываний действий.

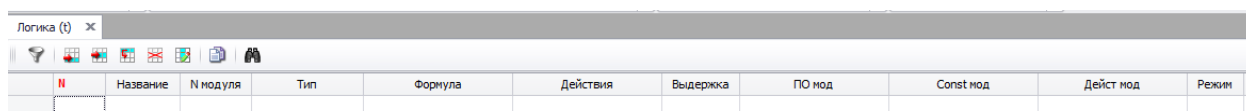
В поле **Формула** может быть задано выражение, по которому рассчитывается значение, присваиваемое параметру объекта, управляемого действием. В выражении можно использовать символические ссылки, что позволяет динамически рассчитывать требуемое значение параметров по любой комбинации параметров модели.

В поле **Нсраб** должно быть указано допустимое количество срабатываний данного действия. По умолчанию допускается одно срабатывание. Если в поле **Нсраб** установлен ноль, действие не будет исполняться.

Примечания:

1. Элементы **Действия** можно объединять в группы, что позволяет задавать сложные действия, одновременно изменяющие параметры нескольких объектов модели;
2. **Действия** не привязаны ко времени и выполняются только по команде от элемента Логика.

Для ввода, коррекции и просмотра информации о логике предлагается табличный редактор (рис.28).



N	Название	N модуля	Тип	Формула	Действия	Выдержка	ПО мод	Const мод	Дейст мод	Режим

Рисунок 28 – Табличный редактор «Логика»

Каждая строка таблицы соответствует одному элементу логики. Элемент логики должен иметь уникальный номер, задаваемый в поле **N**.

Для директивы «Логика» задают:

- [N] – номер элемента логики (любое целое число). Каждому элементу логики присваивается уникальный идентификационный номер;
- [Тип] – тип логического выражения. Тип элемента логики – «Формула» означает, что программа будет анализировать выражение в поле «Формула». Если оно истинно, то необходимо выполнить действие, указанные в поле «Действия»;
- [Формула] – данное поле содержит выражение, являющееся критерием совершения действия. Задание любой константы, отличной от нуля, обуславливает его истинность. В этом случае «Логика» срабатывает сразу же после начала расчёта.
- [Выдержка] – выдержка времени, сек. Числовое значение этого поля устанавливает задержку срабатывания действия после срабатывания элемента логики;
- [Действия] – указывает на группу действий, которые необходимо выполнить (например A1 означает «Action 1», т.е. срабатывание первой группы действий).

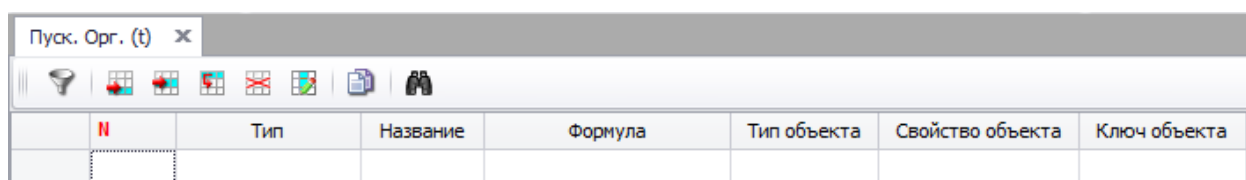
В поле **Действия** размещаются ссылки на группы действий, которые будут исполнены в случае, если расчет по выражению в поле **Формула** даст логическую единицу. Группы действий задаются в виде списка, разделенного запятыми. Каждая группа действий может быть исполнена с параметрами. **Действия** могут быть исполнены сразу после того, как формула возвратит единицу, при условии, что в поле **Выдержка** установлено значение ноль. Если в поле **Выдержка** указан интервал времени, действия будут исполнены по истечении этого интервала и при условии, что на протяжении всего интервала формула возвращала единицу.

Поле **Режим** управляет способом исполнения действий, связанных с элементом логики. В положении «Нормальный» (по умолчанию) действия будут исполняться для всех моментов времени, для которых выражение в

поле **Формула** дает истину. В положении «Импульс» действия будут исполняться при переходе значения выражения в поле Формула из состояния ложь в состояние истина.

В случае если результат вычисления может быть трактован как логическая единица, элемент логики запускает выдержку времени, на протяжении которой продолжает контролировать результат вычисления. Если в течение выдержки результат вычисления сохранит значение логической единицы, элемент логики запускает действия, заданные в его списке.

Пусковые органы задаются в табличной форме (рис.29).



N	Тип	Название	Формула	Тип объекта	Свойство объекта	Ключ объекта

Рисунок 29 – Табличный редактор «Пусковые органы»

Каждый пусковой орган должен иметь уникальный номер, задаваемый в поле **N**. Пусковой орган задается типом, который определяет параметр, значение которого поступает в пусковой орган из расчетной модели. В поле **Тип** предусмотрены варианты, представленные в табл. 11.

Таблица 11 – Список параметров, поступающих из расчетной модели

Откл	Пусковой орган отключен, на выходе всегда 0
Объект	Пусковой орган отнесен к объекту модели, который описывается в полях «Тип объекта», «Свойство объекта» и «Ключ объекта».
Время	На выходе пускового органа выдается текущее время расчета в секундах в виде числа с плавающей точкой.
Откл	Пусковой орган вне зависимости от параметров всегда выдает 0

Таблица 11 – Продолжение

Сост. Узла	На выходе пускового органа состояние узла с номером, заданным в поле «Ключ объекта». Выходное значение «0» соответствует отключенному состоянию, «1» – включенному состоянию узла.
Сост Ветви	На выходе пускового органа состояние ветви, с номерами узлов начала и конца и номером параллельной цепи, заданными через запятую в поле «Ключ объекта». Выходное значение «0» соответствует отключенному состоянию, «1» – включенному состоянию ветви.
Ветвь Инач	Ток в начале ветви в килоамперах.
Ветвь Икон	Ток в конце ветви в килоамперах.
Ветвь Рнач	Поток активной мощности в начале ветви в мегаваттах.
Ветвь Ркон	Поток активной мощности в конце ветви в мегаваттах.
Ветвь Qнач	Поток реактивной мощности в начале ветви в мегаварах.
Ветвь Qкон	Поток реактивной мощности в конце ветви в мегаварах.
Ветвь РНнач	Угол мощности в начале ветви в радианах
Ветвь РНкон	Угол мощности в конце ветви в радианах

В поле **Название** задается произвольное название пускового органа. Значение этого поля в процессе работы автоматики не используется. В поле **Формула** задается расчетное выражение, которое определяет значение,

передаваемое на выход. В случае если в поле ничего не задано, на выход передается значение параметра объекта модели, к которому привязан данный пусковой орган. Номер узла задается в поле **Ключ объекта**. Пусковой орган любого типа с любой формулой не может изменить параметры модели, поскольку параметры в пусковом органе доступны только для чтения.

После ввода необходимых данных для всех элементов сценария производится сохранение: **Главное меню – Файлы – Сохранить как – имя файла.scn** (рис. 30).

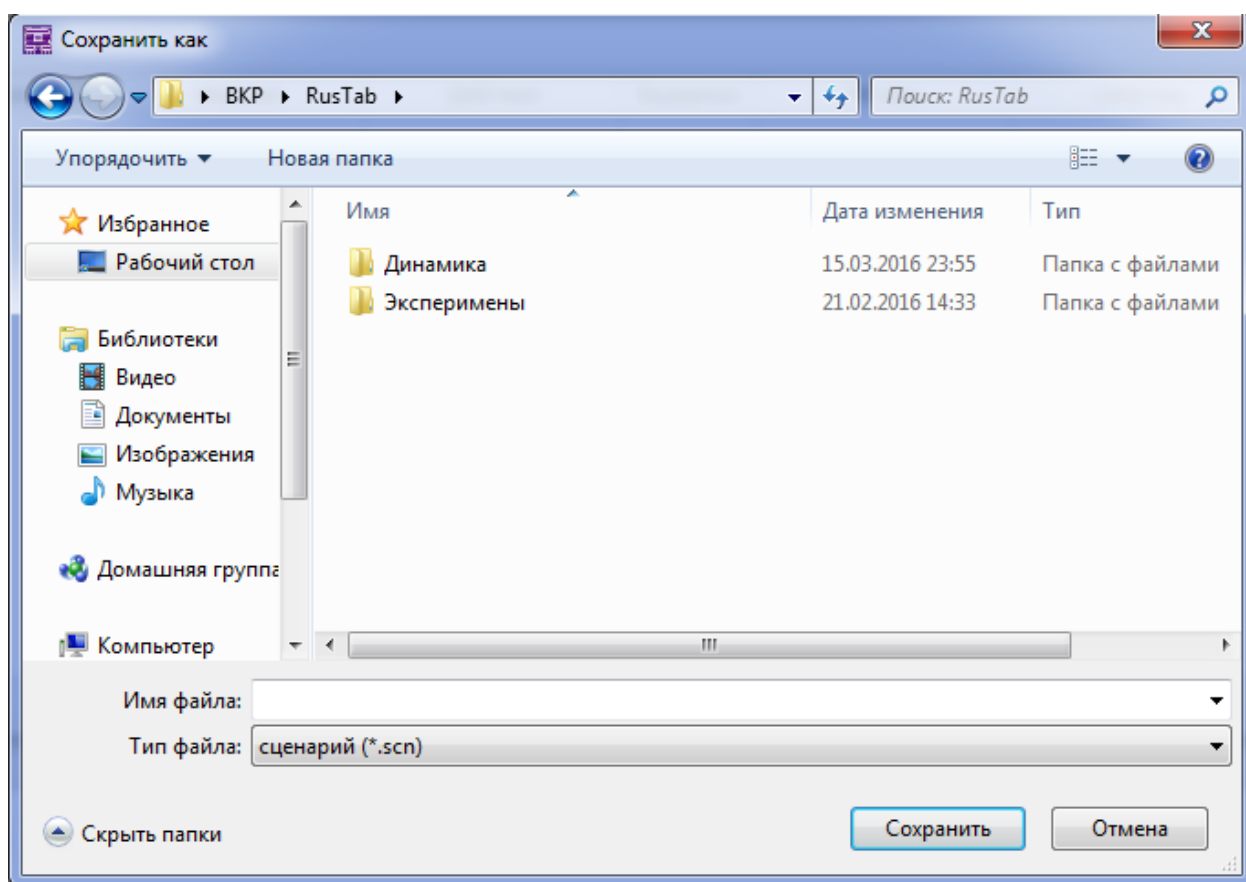


Рисунок 30 – Пример сохранения сценария

3.4.2 Расчет переходных процессов и вывод результатов

После задания исходных данных и сценария, нажатием кнопки «Начать расчёт переходного процесса» (рис.31) производится расчёт переходного процесса. Для просмотра полученных характеристик необходимо левой кнопкой мыши в строке задания исходных данных для двигателей открыть графики (рис.32).



Рисунок 31 – Начало расчёта переходного процесса

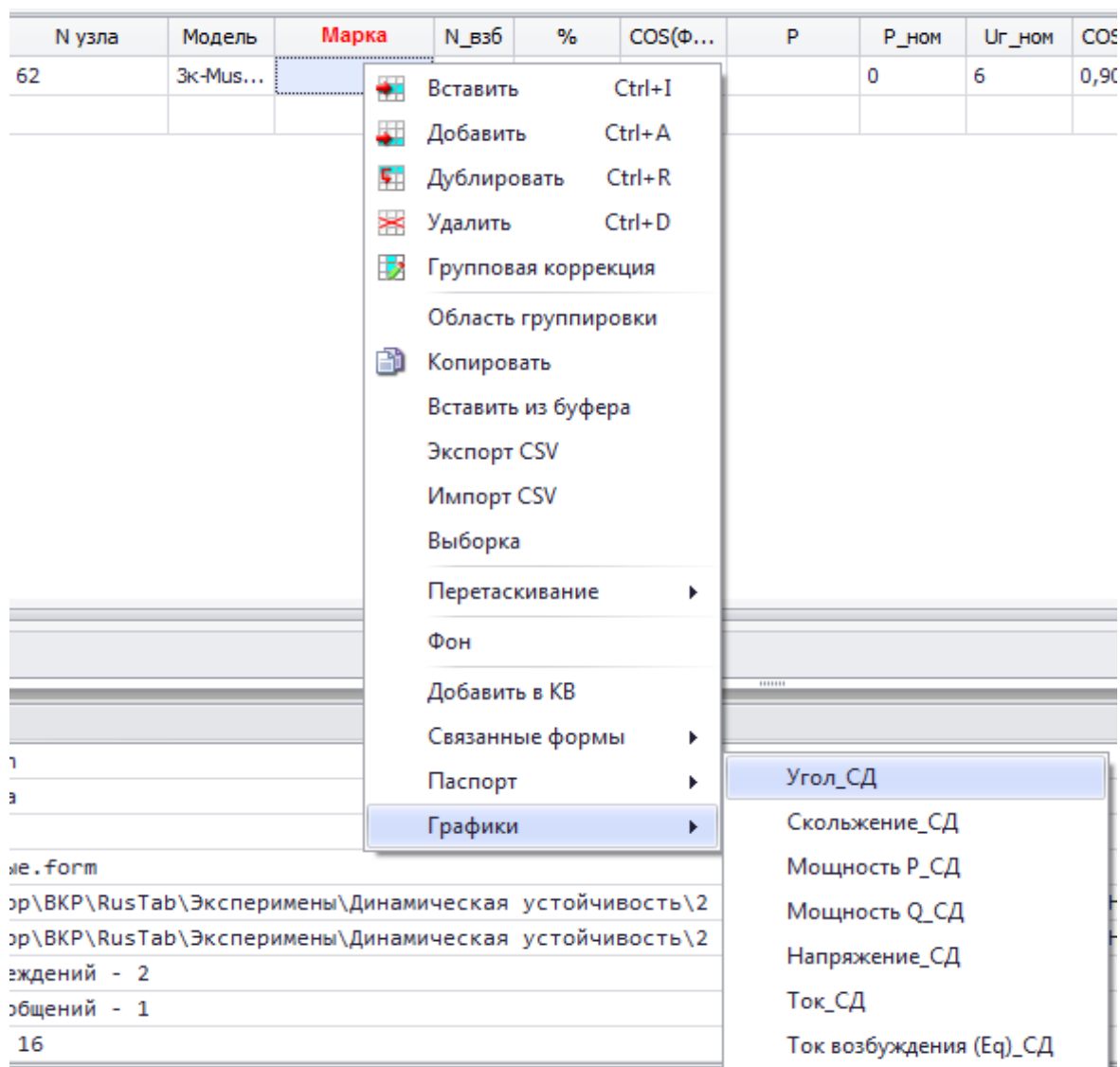


Рисунок 32 – Переход в окно отображения результатов расчёта переходного процесса для синхронного двигателя

Окно вывода результатов расчёта представлено на рис.33.

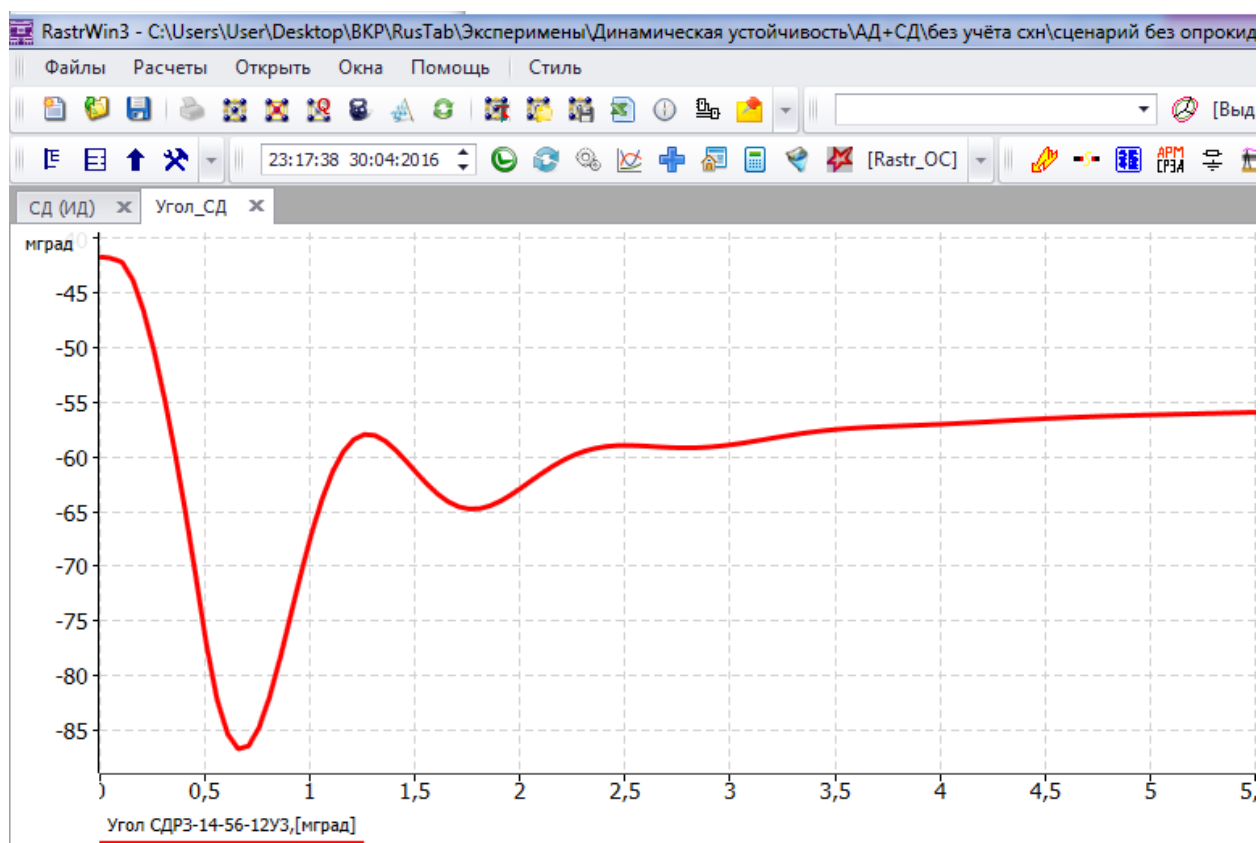


Рисунок 33 – Окно вывода результатов расчёта

РАЗДЕЛ 4 ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ, ЗАПИТАННОЙ ОТ ВТОРОЙ СЕКЦИИ ШИН ПОДСТАНЦИИ 35/6 кВ ЗАО «СИБКАБЕЛЬ»

Раздел посвящен исследованию устойчивости асинхронных двигателей марки ДАЗ04–400ХК–4МУ1 и синхронных двигателей марки СДРЗ–14–56–12УЗ. Двигатели получают питание от второй секции шин трансформаторной подстанции 35/6 кВ ЗАО «Сибкабель».

Для исследования устойчивости, взаимного влияния двигателей, а также влияния статических характеристик нагрузки на устойчивость целесообразно вначале исследовать переходные режимы при работе только асинхронных двигателей, затем при работе только синхронных двигателей, а потом их совместную работу.

4.1 Методика исследования динамической устойчивости асинхронных двигателей

Механической характеристикой асинхронного двигателя называется зависимость $M = f(s)$, уравнение которой имеет вид [7,8]:

$$M = \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2 \cdot r_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}, \quad (13)$$

где:

$M \equiv P_M$ – механический момент, развиваемый двигателем пропорциональный активной мощности, потребляемой двигателем из сети;

$U_{1\phi}$ – напряжение фазы обмотки статора;

r_2' – приведенное активное сопротивление фазы обмотки ротора;

s – скольжение двигателя;

ω_0 – синхронная угловая частота вращения основного магнитного потока;

x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора;

x_2' – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора;

r_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора;

Внешний вид характеристики (13) показан на рис. 34.

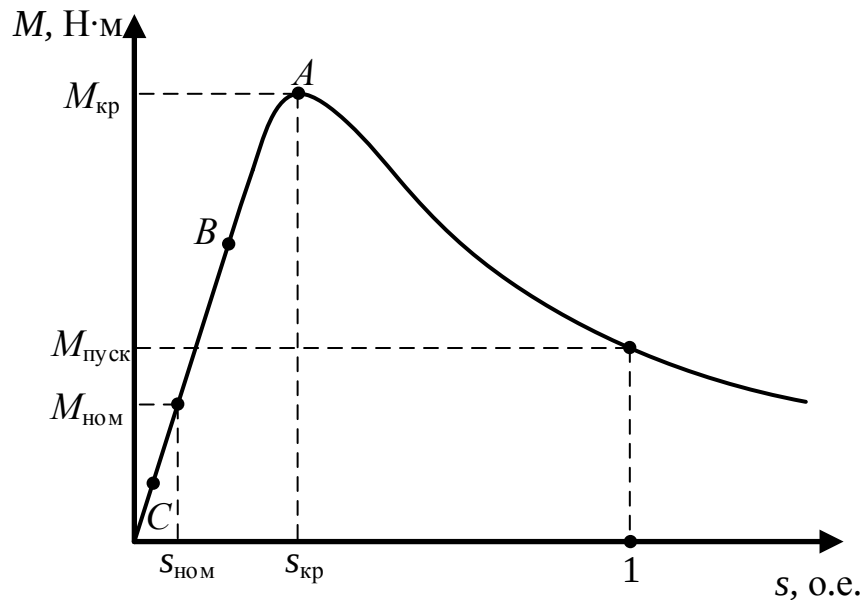


Рисунок 34 – Механическая характеристика асинхронного двигателя

Для анализа нормального режима работы асинхронного двигателя воспользуемся ею.

При включении двигателя в сеть магнитный поток статора, не обладая инерцией, начинает вращение с синхронной частотой n_1 , ротор двигателя под влиянием сил инерции в начальный момент пуска остается неподвижным ($n=0$), скольжение двигателя $s=1$. Под действием пускового момента начинается вращение ротора двигателя, при этом скольжение уменьшается, а вращающий момент возрастает в соответствии с механической характеристикой.

При критическом скольжении $s = s_{\text{кр}}$ момент, развиваемый двигателем, достигает своего максимального значения. С дальнейшим нарастанием частоты вращения момент M начинает уменьшаться, пока не достигнет значения, равного сумме противодействующих моментов, приложенных к ротору двигателя: момента холостого хода M_0 и полезного нагрузочного

момента M_2 ($M = M_0 + M_2 = M_{CT}$ – статический момент). Данный режим работы асинхронного двигателя называется номинальным установившимся режимом, при котором: $s = s_{ном}$, $U_{1ф} = U_{ном}$, $M = M_{ном}$.

Анализ механической характеристики показывает, что устойчивая работа асинхронного двигателя возможна при скольжениях меньше критического ($s < s_{кр}$), т.е. на участке OA механической характеристики. Именно на этом участке изменение нагрузки на валу двигателя сопровождается соответствующим изменением электромагнитного момента. При увеличении полезного нагрузочного момента на валу двигателя равенство моментов на валу нарушается, и частота вращения ротора начинает уменьшаться, скольжение будет увеличиваться, что приведет к росту электромагнитного момента до нового установившегося значения (точка B механической характеристики). Аналогичные выводы можно сделать и о том режиме, когда полезный нагрузочный момент на валу двигателя уменьшается (точка C механической характеристики).

Работа асинхронного двигателя становится неустойчивой при скольжениях $s \geq s_{кр}$. При работе двигателя в точке A электромагнитный момент двигателя равен максимальному $M = M_M$, а скольжение равно критическому значению $s = s_{кр}$, т.е. даже незначительное увеличение нагрузочного момента приведет к уменьшению электромагнитного момента M . За этим последует увеличение скольжения до тех пор, пока оно не достигнет значения $s = 1$, т.е. пока ротор двигателя не остановится.

Для анализа работы асинхронного двигателя в переходном режиме, полагаем, что ранее двигатель работал в номинальном установившемся режиме с номинальным моментом на валу $M_{ном}$.

В момент времени t_0 происходит трёхфазное короткое замыкание (рис. 35), питающее напряжение снижается до значения U_0 , рабочая точка двигателя переходит из точки A в точку B механической характеристики.

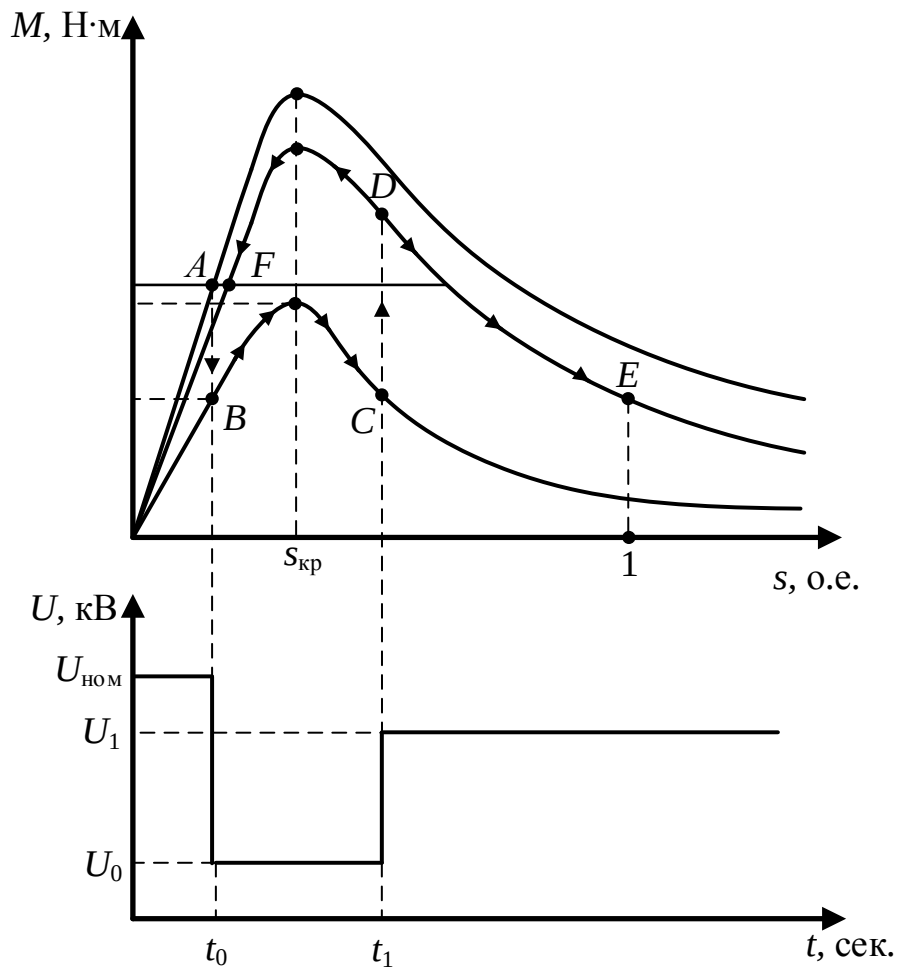


Рисунок 35 – Потеря устойчивости и самозапуск асинхронного двигателя

При пониженном напряжении критический момент асинхронного двигателя становится меньше нагрузочного момента на валу $M_{\text{кр}} < M_{\text{ном}}$, в результате чего он начинает тормозиться, скольжение двигателя увеличивается до критического и становится больше этого значения, рабочая точка двигателя переходит в точку C механической характеристики. Режим работы двигателя на интервале $s \in [s_{\text{кр}}; 1]$ называется «выбегом», особенности этого режима будут описаны далее.

В момент времени t_1 происходит отключение короткого замыкания релейной защитой, в результате чего питающее напряжение восстанавливается до значения $U_1 < U_{\text{ном}}$, рабочая точка двигателя переходит в точку D механической характеристики. В точке D скольжение двигателя

больше критического значения. В данной ситуации существует два варианта развития событий, зависящие от величины U_1 . Если величина восстановленного напряжения достаточно велика, то ротор двигателя снова разгоняется и рабочая точка переходит из точки D в точку F механической характеристики. Этот процесс носит название «самозапуск» асинхронного двигателя, который также как и «выбег» будет рассмотрен позднее.

Если величина U_1 недостаточно велика, чтобы осуществить «самозапуск», то после восстановления напряжения ротор двигателя продолжит торможение вплоть до его полного останова, рабочая точка двигателя перейдёт из точки D в точку E механической характеристики, соответствующей режиму короткого замыкания двигателя.

Совсем иной оказывается картина, когда отключение короткого замыкания и восстановление питания происходит до того, как скольжение двигателя станет больше критического значения (рис. 36).

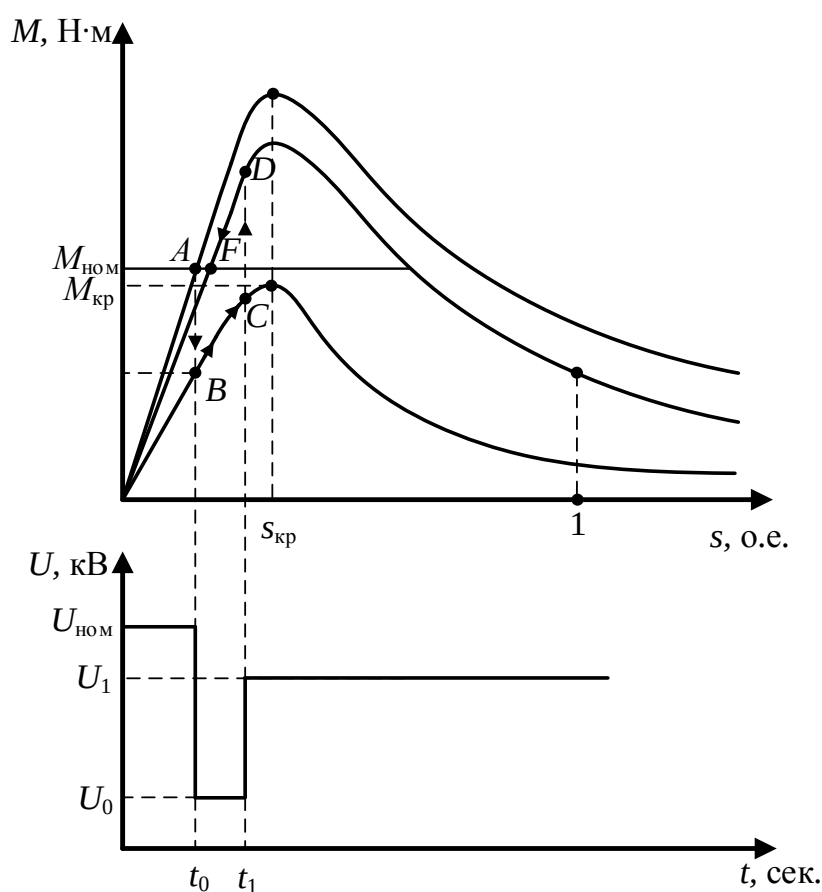


Рисунок 36 – Сохранение устойчивости асинхронного двигателя

Если в момент времени t_1 происходит отключение короткого замыкания релейной защитой, то рабочая точка двигателя переходит из точки C в точку D механической характеристики. В точке D скольжение двигателя меньше критического значения. Следовательно, ротор двигателя, обладая избыточным вращающим моментом, ускорится, и рабочая точка двигателя перейдет из точки D в точку F механической характеристики, соответствующей послеаварийному установившемуся режиму.

Таким образом, можно сформировать условие динамической устойчивости для асинхронного двигателя: «для сохранения асинхронным двигателем устойчивости после больших возмущений, если воздействие, вызвавшее это возмущение, было снято, необходимо, чтобы за время этого возмущения скольжение двигателя не превысило критического значения».

4.1.1 Особенности работы асинхронного двигателя в режиме «выбега»

«Выбегом» асинхронного двигателя называется режим торможения, когда скольжение двигателя изменяется на интервале $s \in [s_{кр}; 1]$. В этом режиме асинхронный двигатель дополнительно потребляет активную и реактивную мощность из сети (рис. 37) [11], вследствие чего питающее напряжение уменьшается, что в свою очередь отягощает процесс дальнейшего «самозапуска».

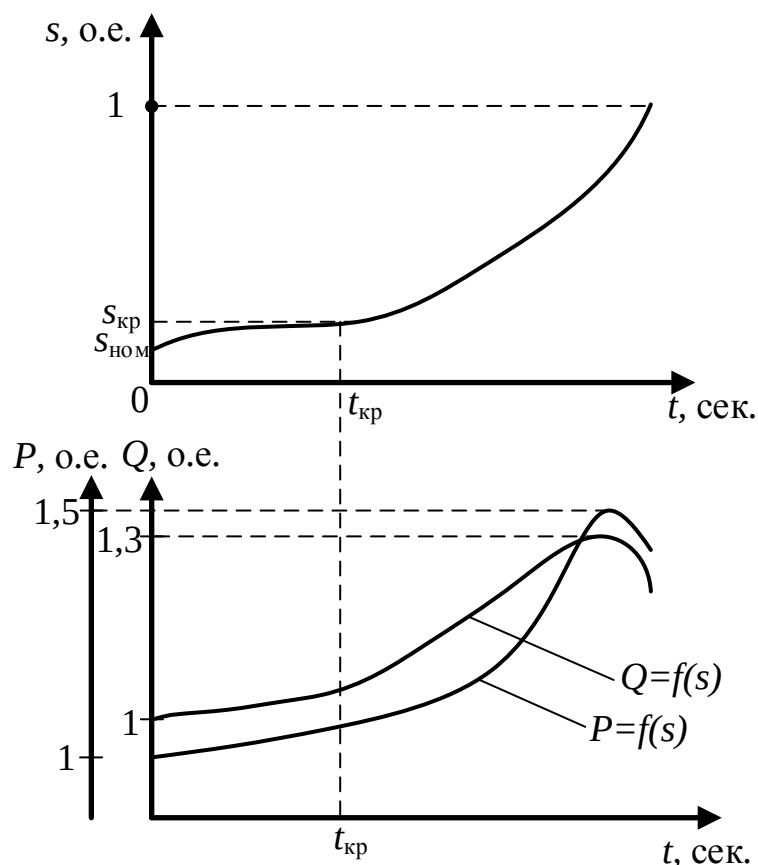


Рисунок 37 – Потребление активной и реактивной мощности асинхронным двигателем при выбеге

4.1.2 «Самозапуск» асинхронного двигателя

«Самозапуском» называется процесс восстановления нормального режима работы двигателя после значительного возмущения, если в процессе этого возмущения скольжение двигателя превысило критическое значение. Основная задача «самозапуска» заключается в том, чтобы не допустить остановки ответственных рабочих механизмов и тем самым предотвратить нарушение технологического процесса.

По условиям «самозапуска» приводные механизмы делятся на две группы:

1. Механизмы, имеющие постоянный момент сопротивления, которые при кратковременном нарушении питания быстро теряют скорость вращения, а при восстановлении напряжения медленно разгоняются (шаровые мельницы, конвейеры, прокатные станы и т.д.).

2. Механизмы, имеющие нелинейную характеристику момента сопротивления (центрифуги, дымососы, компрессоры и т.д.). «Самозапуск» этих двигателей происходит легче, чем для первой группы, так как моменты сопротивления значительно снижаются при уменьшении скорости вращения. «Самозапуск» можно считать осуществимым, если при пониженном напряжении избыточный электромагнитный момент двигателя достаточен для доведения их до номинальной скорости, и, если за это время нагрев обмоток не превысит максимально допустимой величины.

В общем случае на возможность «самозапуска» оказывают влияние следующие параметры:

1. Величина выбега и время возмущения;
2. Величина аварийного и послеаварийного напряжения;
3. Температура нагрева обмоток;
4. Влияние «самозапуска» на режимы работы энергосистемы и других потребителей, находящихся в электрической близости с двигателем.

4.1.3 Описание экспериментов для асинхронных двигателей

Схема, используемая для исследования динамической устойчивости асинхронных двигателей, представлена на рис. 38.

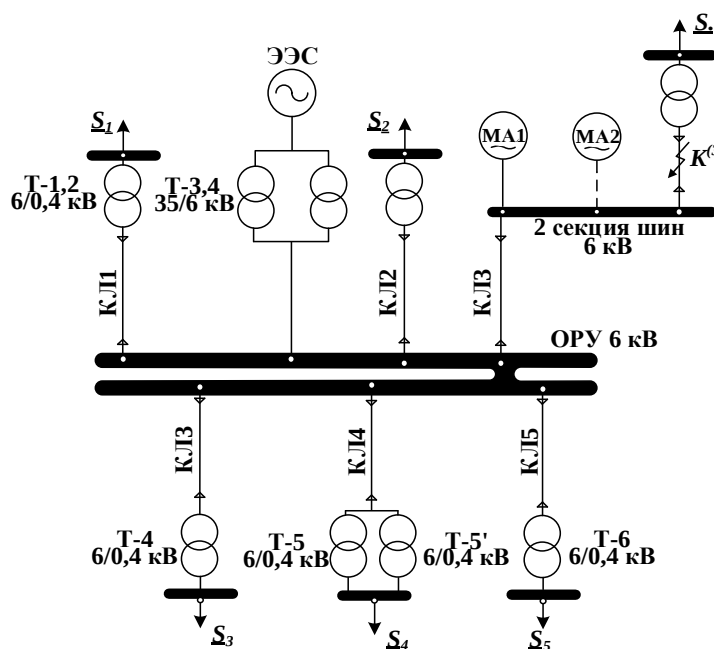


Рисунок 38 – Схема для экспериментов с асинхронными двигателями

Алгоритм проведения эксперимента следующий:

1. Определить критическое скольжение асинхронного двигателя путём плавного снижения напряжения на второй секции шин 6 кВ. Для оценки взаимного влияния двигателей, эксперимент по определению критического скольжения проводится для двух режимов: на шинах работает один либо два асинхронных двигателя;

2. В точке $K^{(3)}$ схемы рис. 38 смоделировать трёхфазное короткое замыкание, построить зависимость изменения скольжения от времени переходного процесса $s = f(t)$. По зависимости определить предельное время отключения, чтобы двигатель сохранил устойчивость, то есть время, за которое скольжение двигателя увеличится до критического значения во время переходного процесса;

3. Для оценки влияния статических характеристик асинхронных двигателей на динамическую устойчивость, в узлах задают статические характеристики асинхронных двигателей, и расчеты по пунктам 1, 2 повторяют.

4. Сформировать таблицу результатов экспериментов.

4.1.4 Эксперимент по определению критического скольжения, предельного времени отключения короткого замыкания, оценки влияния двигателей друг на друга при возмущении и влияния статических характеристик на динамическую устойчивость

Рассмотрим эксперимент по исследованию динамической устойчивости для режима, когда на шинах работает один асинхронный двигатель, при его задании без учёта статических характеристик.

1. Путём плавного снижения напряжения на шинах по характеристике $s = f(t)$ определяем критическое скольжение асинхронного двигателя, при котором, в соответствии с механической характеристикой (рис. 34), двигатель развивает максимальный механический момент на валу.

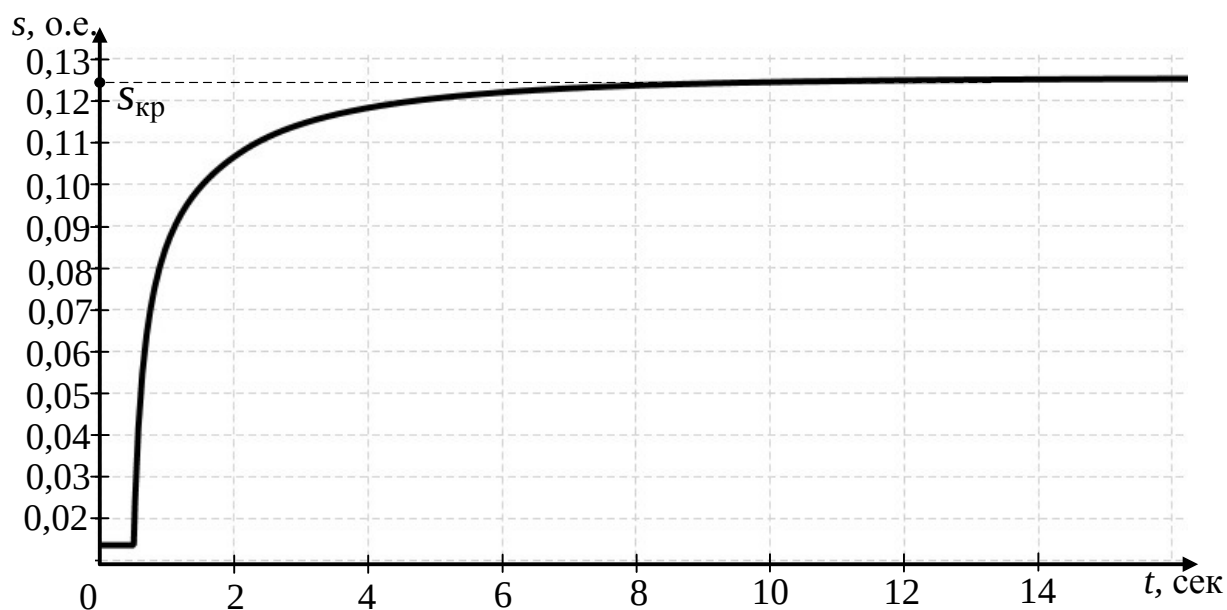


Рисунок 39 – Определение критического скольжения асинхронного двигателя

Критическое скольжение $s_{кр} = 12,53 \%$.

2. Определяем сопротивление шунта трёхфазного короткого замыкания относительно точки $K^{(3)}$ рассматриваемой схемы, при помощи специальной функции программного комплекса: $\underline{Z}_{ш}^{(3)} = 0,06 + j0,04$ Ом (рис. 40).

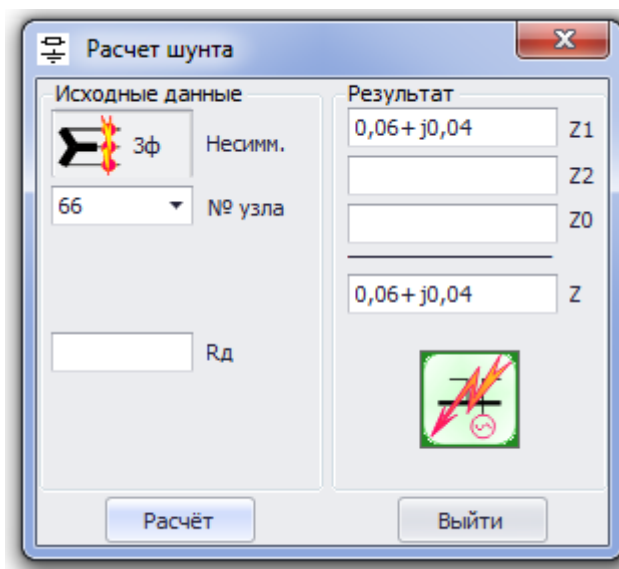


Рисунок 40 – Определение сопротивления шунта трёхфазного короткого замыкания

3. Моделируем в точке $K^{(3)}$ трёхфазное короткое замыкание и строим зависимость изменения скольжения от времени переходного процесса $s = f(t)$ (рис. 41).

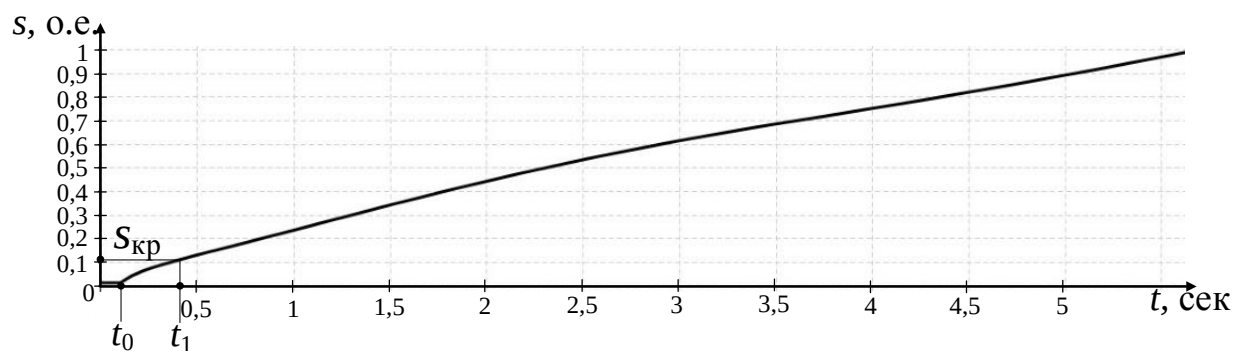


Рисунок 41 – Зависимость $s = f(t)$ исследуемого асинхронного двигателя при трёхфазном коротком замыкании в точке $K^{(3)}$

4. Определяем время $t_1 = 0,467$ с. В соответствии с задаваемым сценарием возмущения, время начала переходного процесса $t_0 = 0,1$ с, тогда предельное время, за которое необходимо отключить поврежденную ветвь, чтобы асинхронный двигатель сохранил устойчивость:

$$t_{\text{пред}} = t_1 - t_0 = 0,467 - 0,100 = 0,367 \text{ с.}$$

Эксперименты по определению критического скольжения и предельного времени возмущения для режима работы двух двигателей и при учёте статических характеристик полностью идентичны предыдущему эксперименту, поэтому не приводятся.

5. Составляем сводную таблицу результатов (табл. 12).

Таблица 12 – Результаты исследования динамической устойчивости АД

Эксперимент	$s_{\text{кр}}, \%$	$t_{\text{пред}}, \text{сек.}$
1 АД без учёта СХН	12,53	0,367
2 АД без учёта СХН	12,38	0,359
1 АД с учётом СХН	13,83	0,429
2 АД с учётом СХН	13,51	0,412

4.2 Методика исследования динамической устойчивости синхронных двигателей

Угловой характеристикой неявнополюсного синхронного двигателя называется зависимость $P = f(\delta)$, уравнение которой имеет вид [7,8]:

$$P = \frac{m \cdot E_1 \cdot U}{x_d} \cdot \sin(\delta), \quad (14)$$

где:

m – число фаз обмотки статора;

P – механическая мощность, развиваемая синхронным двигателем;

E_1 – ЭДС фазы обмотки статора синхронного двигателя;

U – напряжение фазы обмотки статора;

x_d – синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора;

δ – угол сдвига между векторами E_1 и U ;

Внешний вид этой характеристики показан на рис. 42.

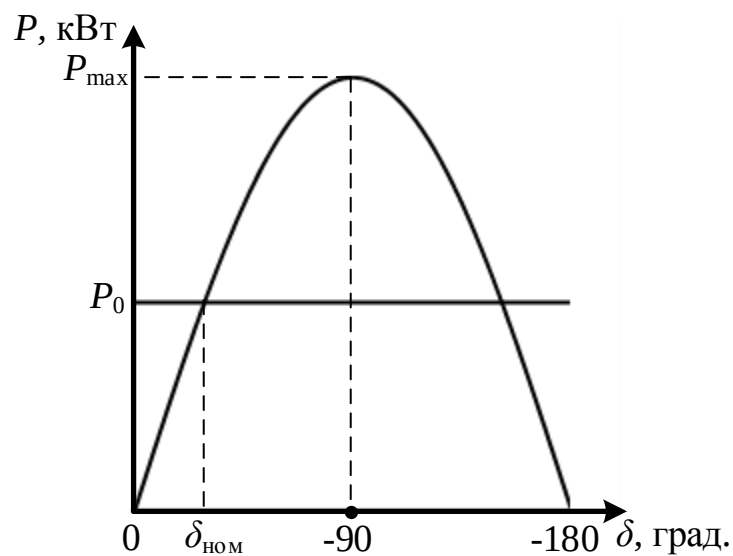


Рисунок 42 – Угловая характеристика неявнополюсного синхронного двигателя

Согласно уравнению угловой характеристики неявнополюсного синхронного двигателя, амплитуда угловой характеристики прямо пропорциональна величине подведенного к нему напряжения. На рис. 43 представлены зависимости $P = f(\delta)$ при различных значениях питающего напряжения: $U_{\text{ном}} > U_1 > U_2 > U_{\text{кр}}$.

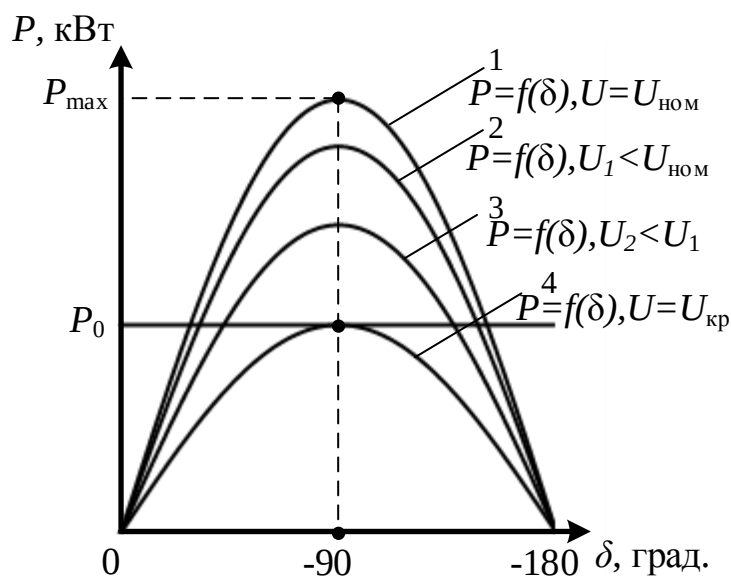


Рисунок 43 – Угловые характеристики неявнополюсного синхронного двигателя при уменьшении питающего напряжения

Пусть в начальный момент времени t_0 синхронный двигатель работает в номинальном режиме, обладая механической характеристикой 1 (рис. 44, а) при $U = U_{\text{ном}}$; $\delta = \delta_{\text{ном}}$.

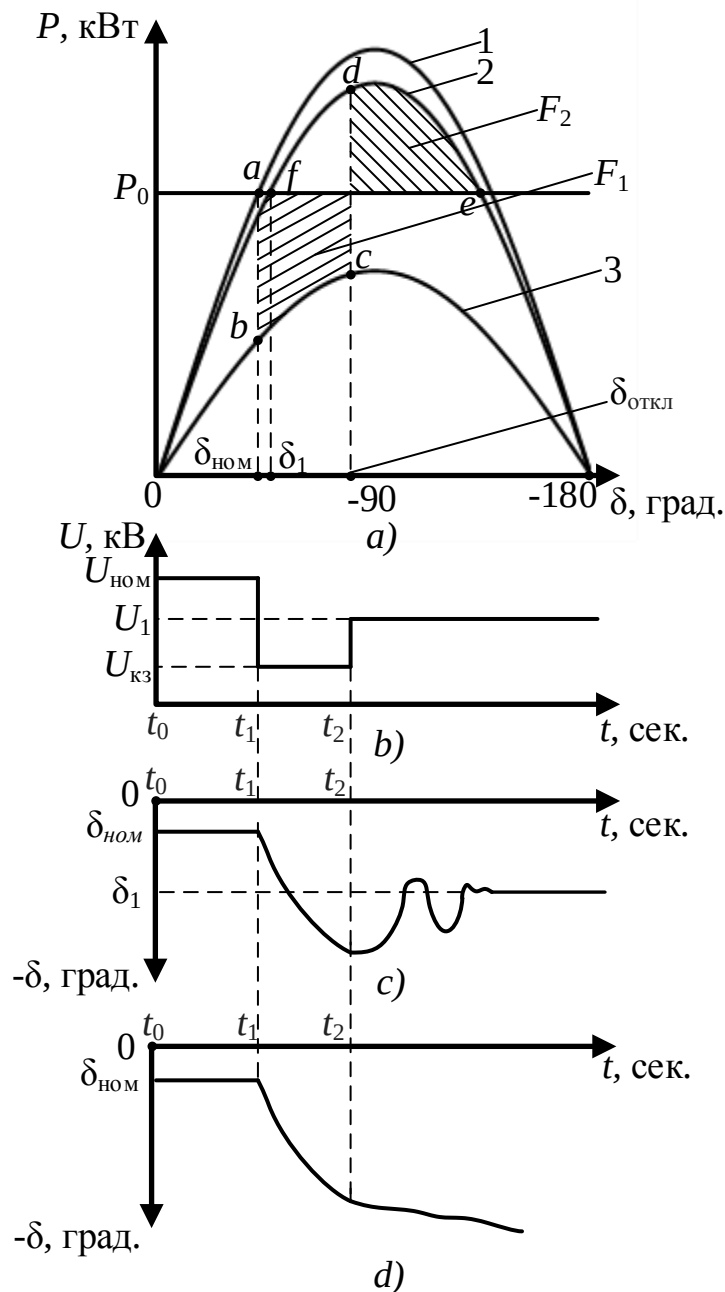


Рисунок 44 – Зависимости: $P = f(\delta)$, $U = f(t)$, $\delta = f(t)$ при коротком замыкании

В момент времени t_1 происходит трёхфазное короткое замыкание. В результате напряжение на питающих шинах уменьшается до значения $U_{\text{КЗ}}$. При уменьшении напряжения процесс работы двигателя иллюстрируется механической характеристикой 3. Электромагнитная мощность двигателя уменьшается. В результате ротор двигателя под воздействием тормозящего

момента начинает уменьшать скорость вращения и происходит торможение двигателя.

В момент времени t_2 происходит отключение короткого замыкания релейной защитой, напряжение на питающих шинах восстанавливается до значения $U_1 < U_{\text{ном}}$, процесс работы синхронного двигателя показан с помощью механической характеристики 2, электромагнитная мощность увеличивается. В результате этого ротор получает ускоряющий момент. В дальнейшем процесс работы может перейти в точку e , в результате чего произойдёт потеря устойчивости и двигатель выпадет из синхронизма (рис.44, d), или же в точку f , которая соответствует устойчивому режиму работы двигателя в послеаварийном режиме (рис. 44, c).

Каким будет сценарий развития событий, определяется правилом площадей [4,9]. Критерием сохранения устойчивости синхронного двигателя является коэффициент запаса динамической устойчивости:

$$k_d = \frac{F_2}{F_1} \geq 1, \quad (15)$$

где:

F_2 – величина площадки ускорения;

F_1 – величина площадки торможения.

Величина площадок ускорения и торможения определяются временем отключения короткого замыкания t_2 . В данной работе не рассматривается вопрос о том, как зависит динамическая устойчивость синхронного двигателя при $t_2 = \text{var}$, а рассматривается вопрос о взаимном влиянии двигателей и влиянии представления двигателей с учётом и без учёта статических характеристик при больших возмущениях, поэтому во всех экспериментах принято $t_2 = \text{const}$.

При исследовании динамической устойчивости синхронных двигателей с помощью современных программных комплексов, определение величин площадок ускорения и торможения не представляется возможным.

Однако, исследуя характер зависимости $\delta = f(t)$, можно определить, сохраняет ли синхронный двигатель устойчивость в результате большого возмущения или выпадает из синхронизма. Следует отметить и то, что устойчивость двигателя во многом определяется не только параметрами переходного процесса, но и параметрами послеаварийного режима, т.е. при исследовании динамической устойчивости важно исследовать поведение синхронного двигателя, как в период протекания переходного процесса, так и после его окончания.

Рисунок 45 иллюстрирует возможные случаи поведения угла $\delta = f(t)$ в результате большого возмущения.

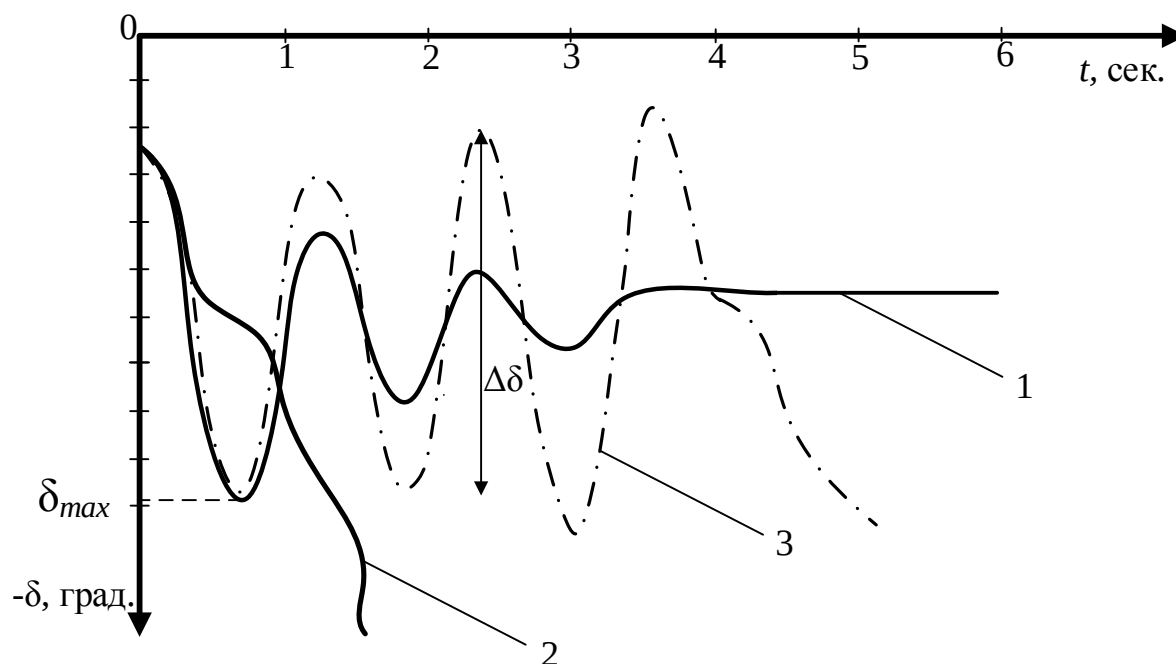


Рисунок 45 – Характеристики $\delta = f(t)$ синхронного двигателя

Характеристика №1 (рис.45) иллюстрирует сохранение устойчивости синхронного двигателя, как в период переходного процесса, так и после его окончания. В этом случае угол $\delta = f(t)$ в момент возмущения возрастает до максимального значения $\delta_{\max}$, а затем начинает совершать колебания с затухающей амплитудой до момента установления нового установившегося режима.

Характеристика №2 (рис.45) иллюстрирует потерю устойчивости синхронного двигателя во время переходного процесса. В этом случае угол $\delta = f(t)$ неуклонно уменьшается во время возмущения, и двигатель выпадает из синхронизма.

Характеристика №3 (рис.45) иллюстрирует потерю устойчивости синхронного двигателя после окончания переходного процесса. В этом случае двигатель сохраняет устойчивость в момент возмущения, однако выпадает из синхронизма при установлении послеаварийного режима. Угол $\delta = f(t)$ в момент возмущения возрастает до максимального значения $\delta_{\max}$, а затем начинает совершать колебания с возрастающей амплитудой до момента выпадения синхронного двигателя из синхронизма.

Для определения условия сохранения устойчивости синхронного двигателя в послеаварийном установившемся режиме необходимо исследовать дифференциальное уравнение [9], описывающее свободные колебания приращения $\Delta\delta$ угла ротора δ двигателя:

$$T_j \frac{d^2(\Delta\delta)}{dt^2} + \frac{dP}{d\delta} = 0, \quad (16)$$

где:

T_j – механическая постоянная инерции двигателя.

Для определения условия сохранения устойчивости необходимо исследовать тенденцию возрастания приращения угла ротора $\Delta\delta(t)$:

- Если зависимость $\Delta\delta(t)$ возрастает, то такой режим будет неустойчив, так как колебания угла $\delta = f(t)$ в послеаварийном режиме будут происходить с увеличивающейся амплитудой.
- Если тенденции к возрастанию $\Delta\delta(t)$ не наблюдается, то такой режим может считаться устойчивым, так как колебания угла $\delta = f(t)$ будут проходить с затухающей амплитудой.

Для выявления тенденции изменения переменной $\Delta\delta$ рассмотрим варианты общего решения уравнения (16), которое имеет вид [9]:

$$\Delta\delta(t) = C_1 \cdot e^{p_1 t} + C_2 \cdot e^{p_2 t}, \quad (17)$$

где:

C_1, C_2 – произвольные постоянные;

p_1, p_2 – корни характеристического уравнения (17).

Корни характеристического уравнения определяются как:

$$p_1, p_2 = \pm \sqrt{-\frac{1}{T_j} \cdot \frac{dP}{d\delta}}; \quad (18)$$

Рассмотрим варианты видов корней характеристического уравнения (18).

Вариант №1: $\frac{dP}{d\delta} < 0$, корни характеристического уравнения $p_1, p_2 = \pm\alpha$

вещественные. В этом случае решение дифференциального уравнения (16) представляет собой сумму двух экспоненциальных составляющих (рис. 46):

$$\Delta\delta_1(t) = C_1 \cdot e^{\alpha t} + C_2 \cdot e^{-\alpha t}; \quad (19)$$

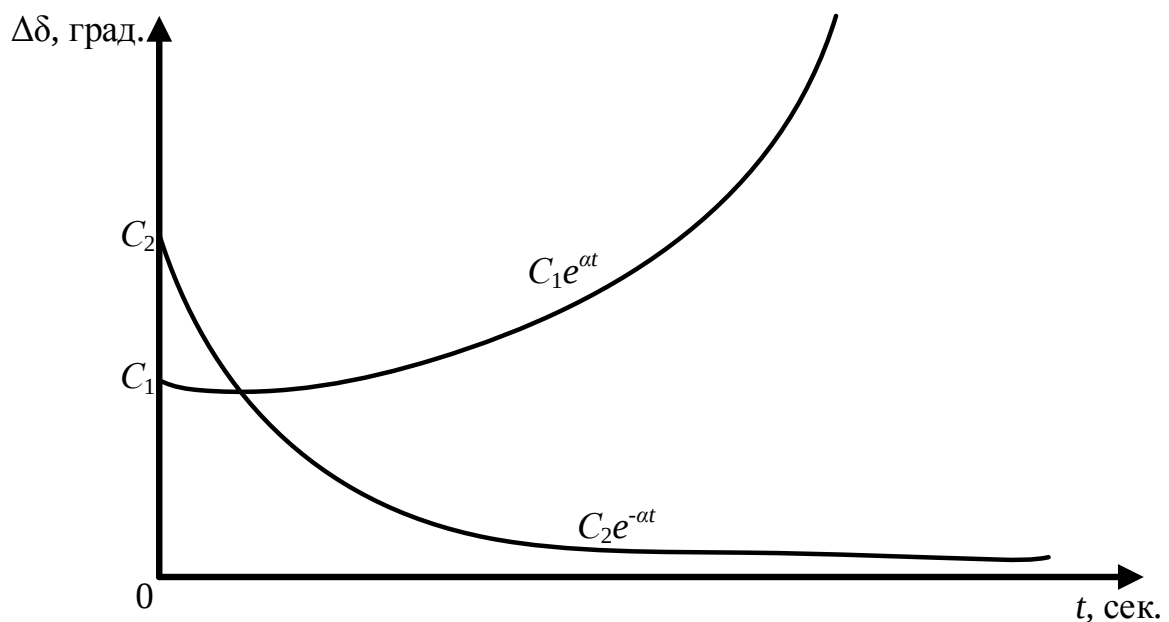


Рисунок 46 –Графическое решение дифференциального уравнения (16) для варианта 1

Анализируя данный случай, можно сделать вывод, что приращение $\Delta\delta$ угла ротора δ имеет тенденцию к возрастанию, что является признаком неустойчивой работы двигателя. Колебания угла ротора $\delta = f(t)$ в послеаварийном режиме будут происходить с увеличивающейся амплитудой, до того момента пока синхронный двигатель не выйдет из синхронизма (рис.45, характеристика № 3).

Вариант №2: $\frac{dP}{d\delta} > 0$, корни характеристического уравнения $p_1, p_2 = \pm j\nu$ мнимые. В этом случае решение дифференциального уравнения (16) представляет собой зависимость, изменяющуюся по гармоническому закону (рис. 47):

$$\Delta\delta_2(t) = 2C \cdot \cos(\nu t - \varphi), \quad (20)$$

где:

$$C_1 = A + jB, \quad C_2 = A - jB;$$

$$C = \sqrt{A^2 + B^2};$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{B}{A}\right);$$

$$\nu = \sqrt{\frac{1}{T_j} \cdot \frac{dP}{d\delta}}; \text{ — частота свободных колебаний линейного приращения угла;}$$

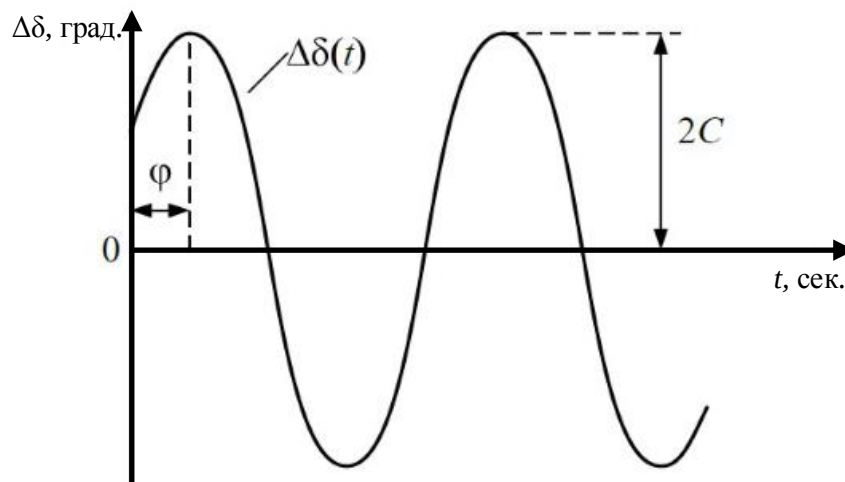


Рисунок 47 – Графическое решение дифференциального уравнения (16) для варианта 2

Анализируя данный случай, можно сделать вывод, что изменение малого линейного приращения угла происходит по закону незатухающих гармонических колебаний с постоянной амплитудой (рис.47). Это свидетельствует о сохранении устойчивости синхронного двигателя в послеаварийном режиме, так как отсутствует тенденция к возрастанию амплитуды свободных колебаний рассматриваемого параметра режима.

Критерием сохранения устойчивости синхронного двигателя по окончании большого возмущения является положительный знак производной $\frac{dP}{d\delta} > 0$, т.е. установившийся режим работы синхронного двигателя в послеаварийном режиме возможен лишь на интервале $\delta_{п.а.} \in [0^0; 90^0)$.

Таким образом, исследование динамической устойчивости синхронного двигателя заключается в исследовании характеристики $\delta = f(t)$ в момент переходного процесса, а также после его окончания. Максимальное значение угла $\delta_{\max}$ характеризует тяжесть протекания переходного процесса. Чем больше этот угол, тем тяжелее протекает переходный процесс.

4.2.1 Описание экспериментов с синхронными двигателями

Схема, используемая для исследования, представлена на рис. 48.

Исследование заключается в следующем:

1. При выполнении первой части эксперимента в точке $K^{(3)}$ исследуемой схемы моделируется трёхфазное короткое замыкание, путём ввода сопротивления шунта. Напряжение на питающих шинах уменьшается до значения $U_{кз} = 2,4$ кВ.

2. Спустя время $t_2 = 0,4$ сек. происходит отключение короткого замыкания релейной защитой, напряжение на питающих шинах восстанавливается до значения $U_1 = 5,1$ кВ.

3. По осциллограмме характеристики $\delta = f(t)$, полученной в ходе расчётов, делаются выводы о сохранении устойчивости в результате возмущения, либо о выпаде двигателя из синхронизма.

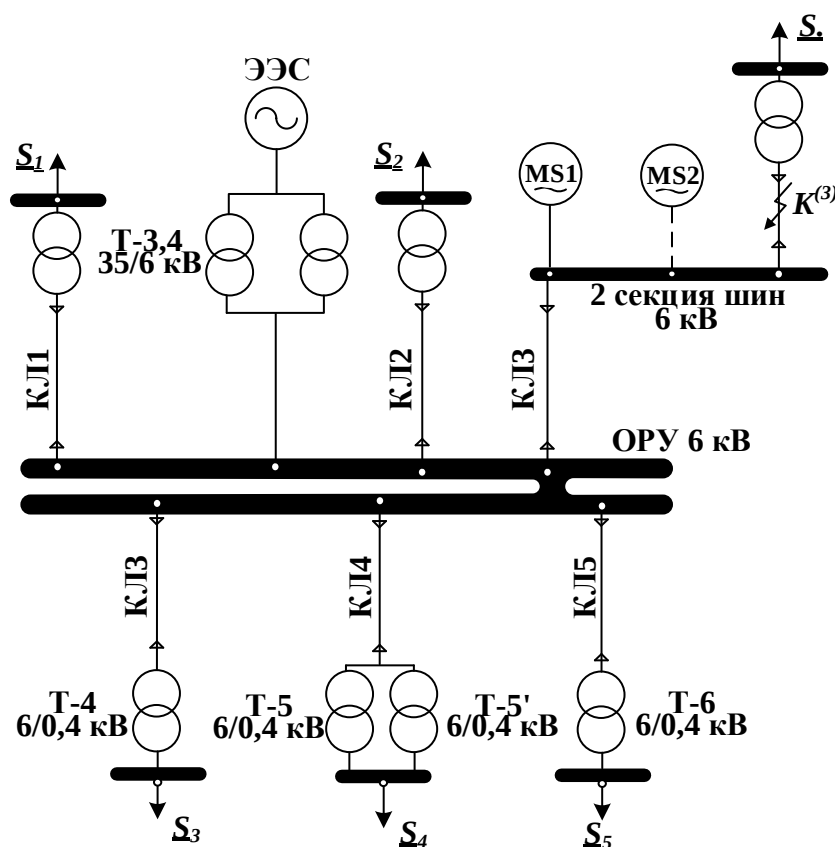


Рисунок 48 – Схема электроснабжения для экспериментов с СД

4. Для оценки влияния статических характеристик нагрузки в узлах с синхронными двигателями задаются статические характеристики нагрузки по напряжению, и расчеты по пунктам 1–3 повторяют.

Для оценки взаимного влияния двигателей все эксперименты проводятся для двух режимов: когда на исследуемых шинах работает один и два синхронных двигателя.

4.2.2 Результаты экспериментов по исследованию динамической устойчивости, взаимного влияния двигателей и влияния статических характеристик на динамическую устойчивость синхронных двигателей

Эксперимент №1: Исследуется режим работы одного синхронного двигателя, заданного без учета статической характеристики. Результаты представлены на рис. 49.

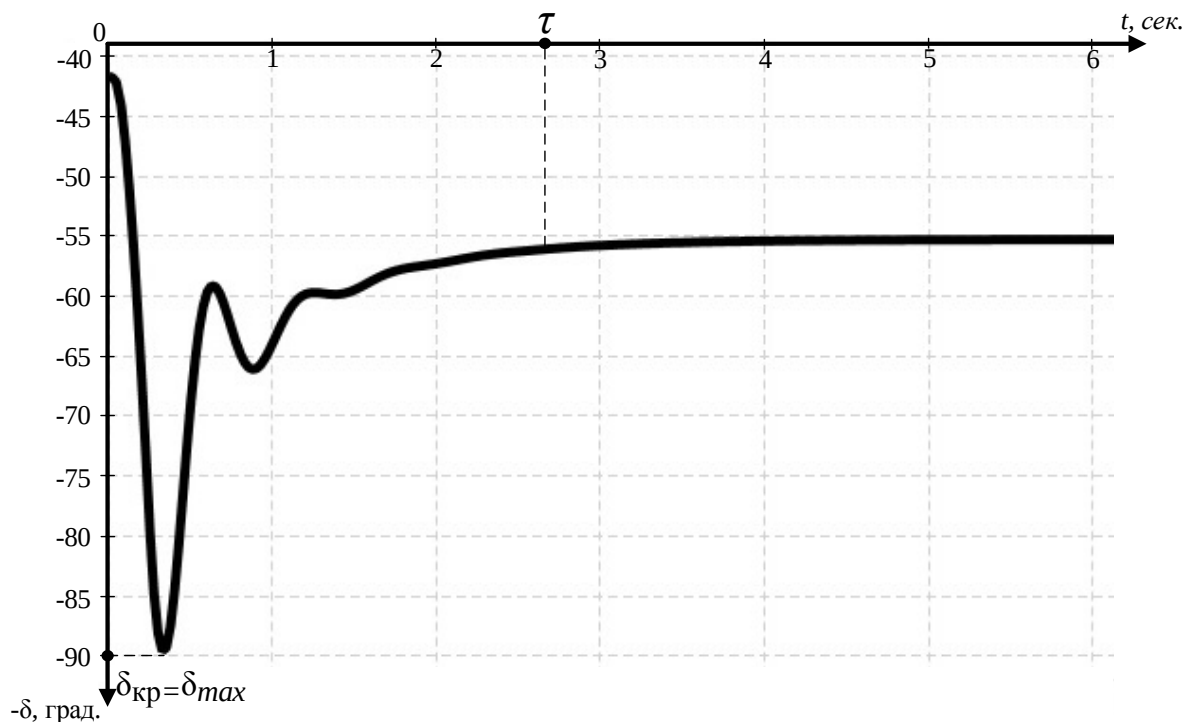


Рисунок 49 – Зависимость $\delta = f(t)$, полученная в ходе эксперимента №1

Время переходного процесса составило $t = 2,68$ с. Максимальное значение угла составляет $\delta_{\max} = -90^\circ$. Анализ характеристики $\delta = f(t)$ свидетельствует о том, что синхронный двигатель сохраняет устойчивость и остаётся в синхронизме, как в период переходного процесса, так и после его окончания. В ходе переходного процесса угол δ уменьшается до критического значения $\delta_{кр} = -90^\circ$, величина угла δ в послеаварийном установившемся режиме $\delta_{п.а.} = -55^\circ$.

Эксперимент №2: Исследуется режим работы одного синхронного двигателя, заданного статической характеристикой (рис. 50).

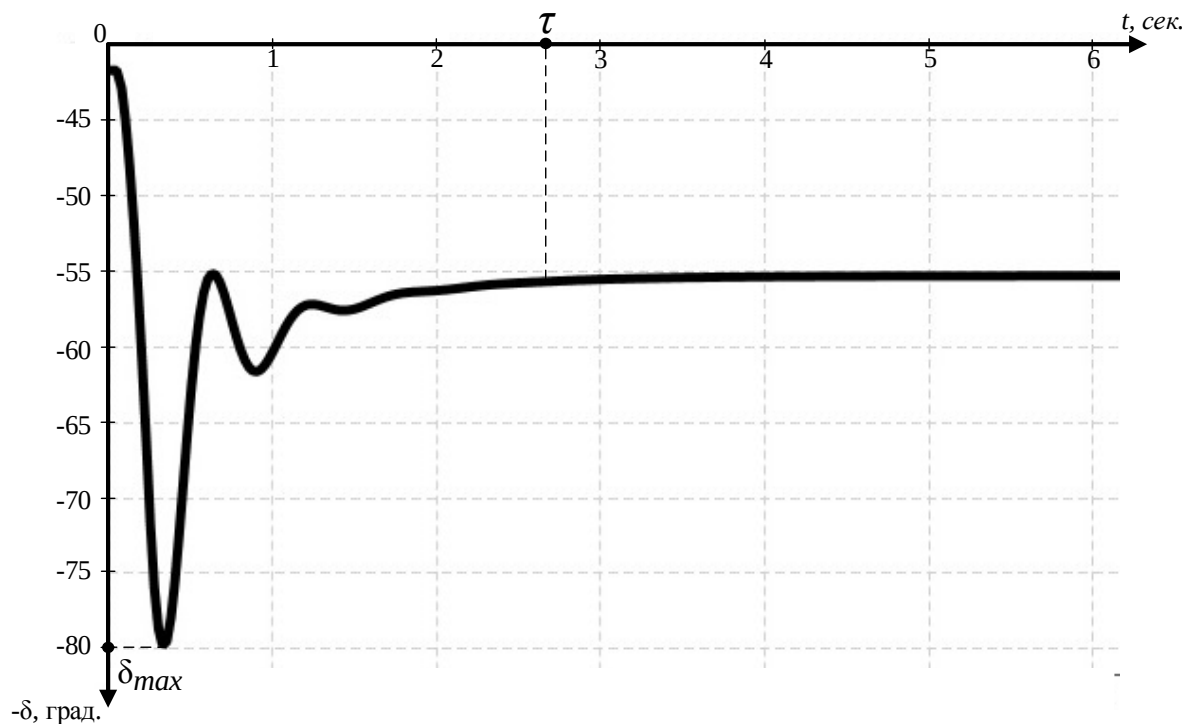


Рисунок 50 – Зависимость $\delta = f(t)$, полученная в ходе эксперимента №2

Время переходного процесса составило $t = 2,68$ с. Максимальное значение угла составляет $\delta_{max} = -80^\circ$. Анализ характеристики $\delta = f(t)$ свидетельствует о том, что синхронный двигатель сохраняет устойчивость и остаётся в синхронизме, как в период переходного процесса, так и после его окончания. Во время переходного процесса угол δ не уменьшается до критического значения $\delta_{кр} = -90^\circ$, величина угла δ в послеаварийном установившемся режиме $\delta_{п.а.} = -55^\circ$.

Эксперимент №3: Исследуется режим работы двух синхронных двигателей, заданных без учета статических характеристик. Зависимость для анализа приведена на рис. 51.

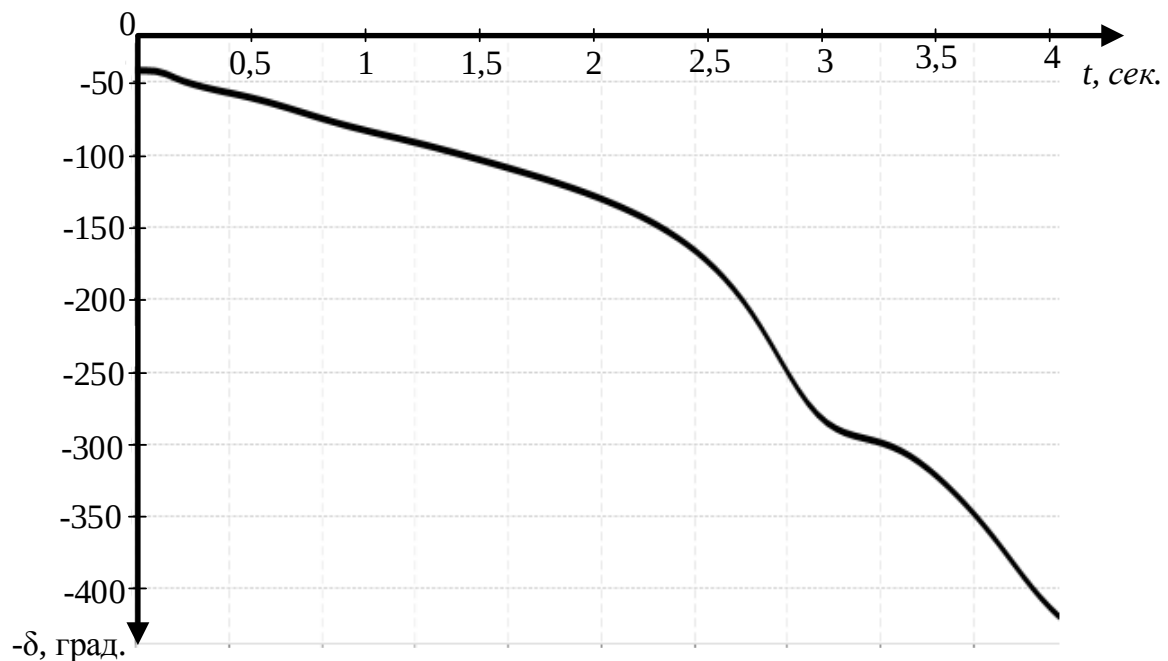


Рисунок 51 – Зависимость $\delta = f(t)$, полученная в ходе эксперимента №3

Зависимости $\delta = f(t)$, полученные в ходе эксперимента для двух двигателей полностью идентичны друг другу, поэтому для анализа их устойчивости достаточно характеристики одного из исследуемых двигателей.

Анализ характеристики $\delta = f(t)$ одного из исследуемых двигателей свидетельствует о том, что синхронные двигатели теряют устойчивость и необратимо выпадают из синхронизма, о чём свидетельствует монотонное уменьшение угла δ , как в период переходного процесса, так и после его окончания.

Эксперимент №4: Исследуется режим работы двух синхронных двигателей, заданных с учетом статических характеристик. Зависимость для анализа приведена на рис. 52.

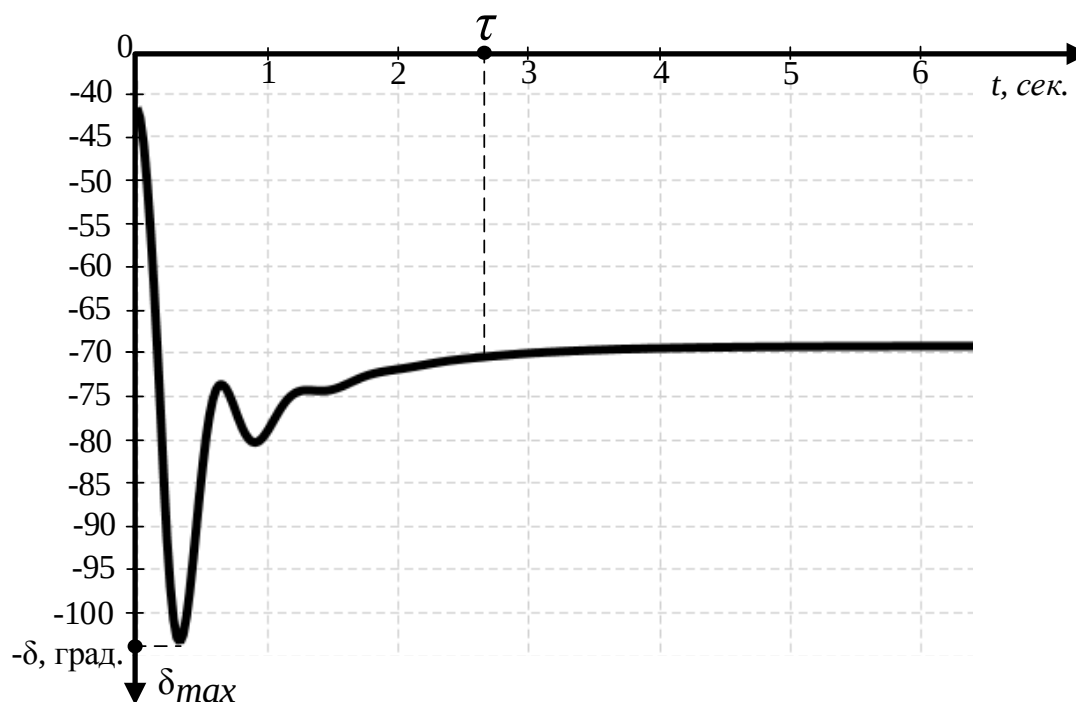


Рисунок 52 – Зависимость $\delta = f(t)$, полученная в ходе эксперимента №4

Зависимости $\delta = f(t)$, полученные в ходе эксперимента для двух двигателей полностью идентичны друг другу, поэтому для анализа их устойчивости достаточно характеристики одного из исследуемых двигателей.

Время переходного процесса составило $t = 2,68 \text{ с}$. Максимальное значение угла составляет $\delta_{\max} = -107,7^\circ$. Анализ характеристики $\delta = f(t)$ свидетельствует о том, что синхронные двигатели сохраняют устойчивость и остаются в синхронизме, как в период переходного процесса, так и после его окончания. В ходе переходного процесса угол δ уменьшается до значения большего, чем критическое значение $\delta_{\text{кр}} = -90$ градусов, величина угла δ в послеаварийном установившемся режиме $\delta_{\text{п.а.}} = -70^\circ$.

4.3 Описание экспериментов по исследованию динамической устойчивости для режимов совместной работы синхронных и асинхронных двигателей

Схема, используемая для исследования динамической устойчивости совместной работы синхронных и асинхронных двигателей, представлена на рис. 53.

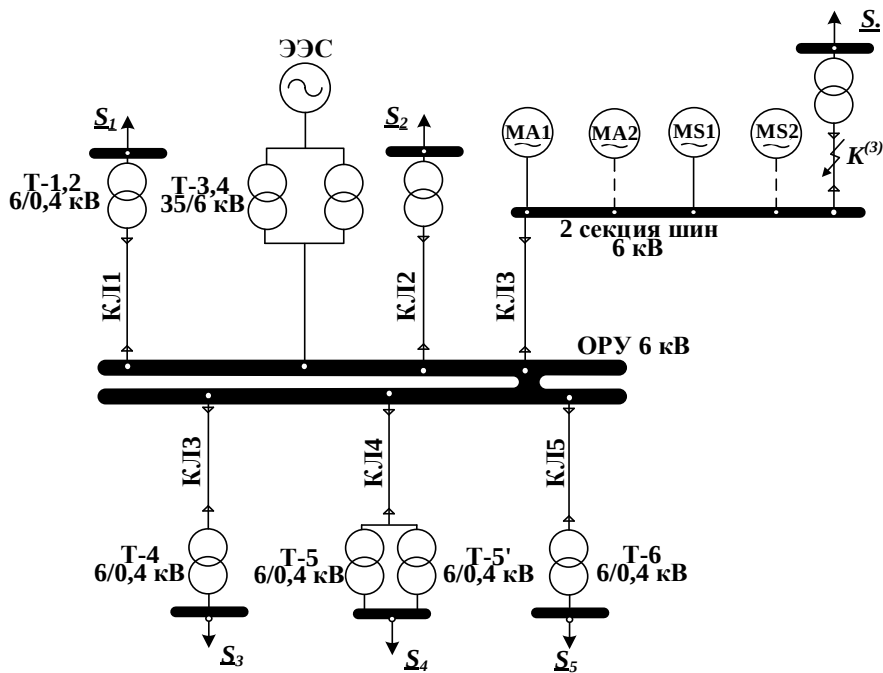


Рисунок 53 – Схема для экспериментов совместных режимов работы синхронных и асинхронных двигателей

Эксперимент состоит из двух частей:

1. Исследуется режим совместной работы одной пары синхронных и асинхронных двигателей, как с учётом, так и без учёта статических характеристик. Для оценки взаимного влияния двигателей друг на друга в результате большого возмущения параметры сценария трёхфазного короткого замыкания, моделируемого в точке $K^{(3)}$ схемы, принимаются точно такими же, как и в эксперименте по исследованию устойчивости синхронных двигателей.

Для исследования влияния режима выбега и дальнейшего самозапуска асинхронного двигателя на устойчивость синхронного двигателя, время отключения короткого замыкания релейной защитой принимается равным

$t_2 = 0,7$ с, что больше любого из предельных значений времени отключения для асинхронных двигателей.

2. Исследуется режим совместной работы двух пар синхронных и асинхронных двигателей, как с учётом, так и без учёта статических характеристик. Порядок проведения исследований такой же, как и в п. 1.

4.3.1 Результаты экспериментов по исследованию динамической устойчивости для режимов совместной работы синхронных и асинхронных двигателей

Эксперимент №1: Исследуется режим совместной работы синхронного и асинхронного двигателей, заданных без учета статических характеристик, без перехода асинхронного двигателя в режим «выбега» и дальнейшего «самозапуска». Время переходного процесса $t = 2,68$ с. Максимальное значение угла $\delta_{\max} = -86,4^\circ$. Анализ характеристики $\delta = f(t)$ (рис. 54) свидетельствует о том, что синхронный двигатель сохраняет устойчивость и остаётся в синхронизме, как в период переходного процесса, так и после его окончания. Величина угла δ в послеаварийном установившемся режиме $\delta_{\text{п.а.}} = -55^\circ$.

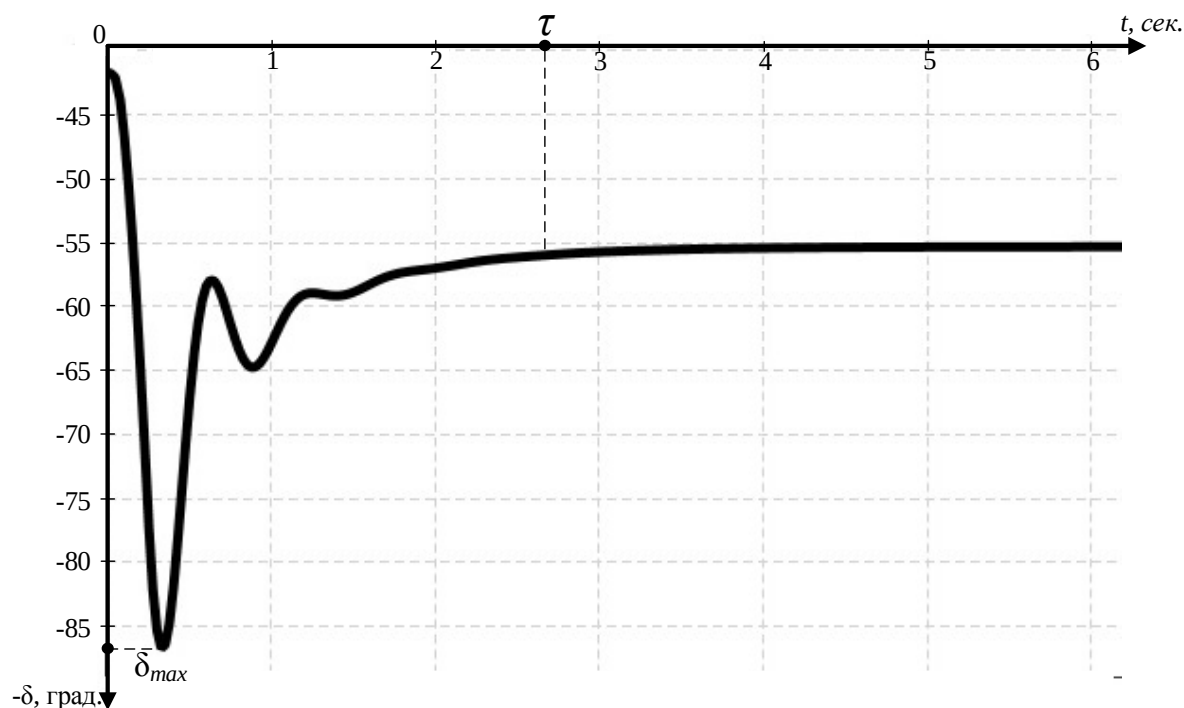


Рисунок 54 – Зависимость $\delta = f(t)$, полученная в ходе эксперимента №1

Во время переходного процесса угол δ не уменьшается до критического значения $\delta_{кр} = -90^\circ$.

Эксперимент №2: Исследуется режим совместной работы синхронного и асинхронного двигателей, заданных с учетом статических характеристик без перехода асинхронного двигателя в режим «выбега» и дальнейшего «самозапуска». Время переходного процесса $t = 2,68$ с. Максимальное значение угла $\delta_{max} = -74,8^\circ$. Анализ характеристики $\delta = f(t)$ (рис. 55) свидетельствует о том, что синхронный двигатель сохраняет устойчивость и остаётся в синхронизме, как в период переходного процесса, так и после его окончания.

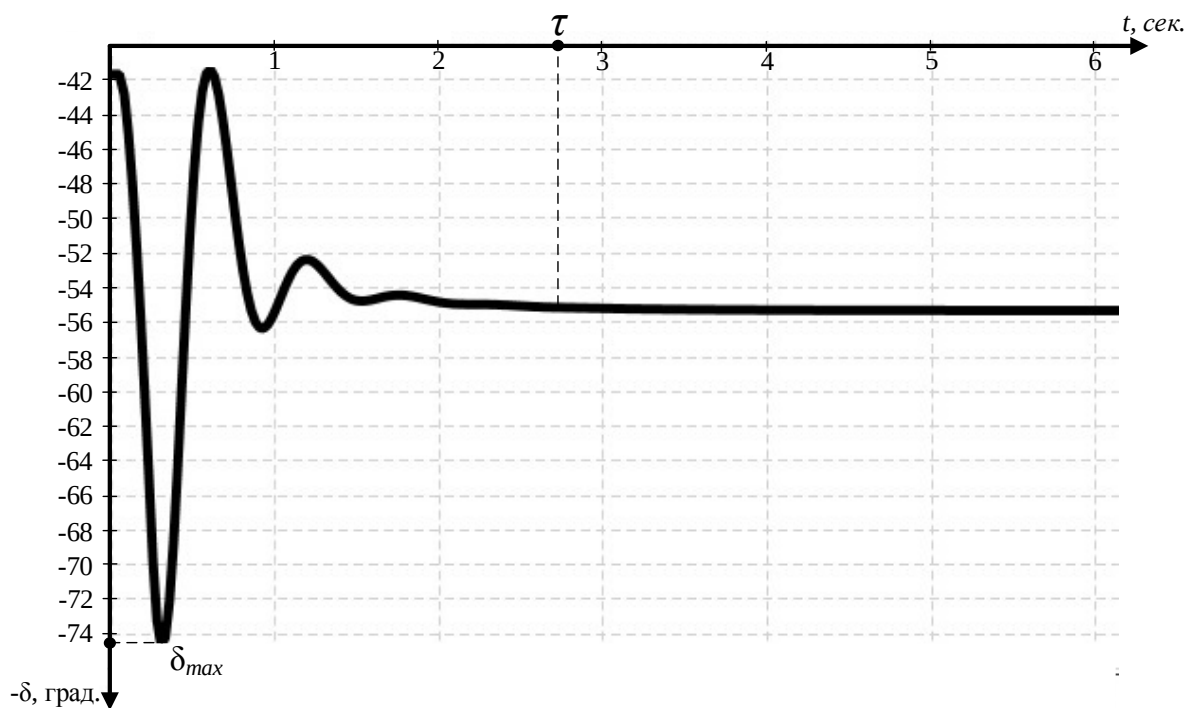


Рисунок 55 – Зависимость $\delta = f(t)$, полученная в ходе эксперимента №2

Во время переходного процесса угол δ не уменьшается до критического значения $\delta_{\text{кр}} = -90^\circ$, величина угла δ в послеаварийном установившемся режиме $\delta_{\text{п.а.}} = -55^\circ$.

Эксперимент №3: Исследуется режим совместной работы синхронного и асинхронного двигателей, заданных без учета статических характеристик при переходе асинхронного двигателя в режим «выбега» и дальнейшего «самозапуска». Время переходного процесса составило $t = 3,44$ с.

Максимальное значение угла $\delta_{\max} = -125,8^\circ$.

Анализ характеристики (рис. 56) свидетельствует о том, что синхронный двигатель сохраняет устойчивость и остаётся в синхронизме, как в период переходного процесса, так и после его окончания.

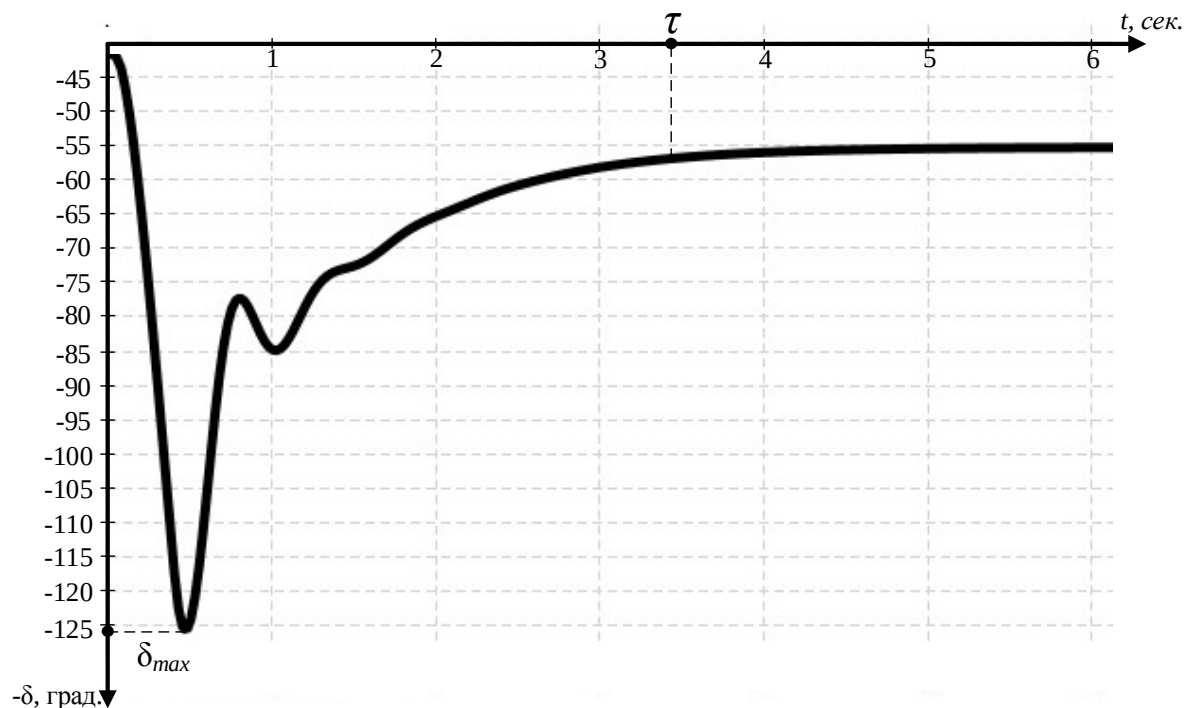


Рисунок 56 – Зависимость $\delta = f(t)$, полученная в ходе эксперимента №3

В ходе переходного процесса угол δ уменьшается до значения большего, чем критическое значение $\delta_{кр} = -90^\circ$ градусов, величина угла δ в послеаварийном установившемся режиме $\delta_{п.а.} = -55^\circ$.

Эксперимент №4: Исследуется режим совместной работы синхронного и асинхронного двигателей, заданных с учетом статических характеристик, при переходе асинхронного двигателя в режим «выбега» и дальнейшего «самозапуска». Время переходного процесса составило $t = 1,87$ с. Максимальное значение угла $\delta_{\max} = -103,3^\circ$. Анализ характеристики (рис. 57) свидетельствует о том, что синхронный двигатель сохраняет устойчивость и остаётся в синхронизме, как в период переходного процесса, так и после его окончания.

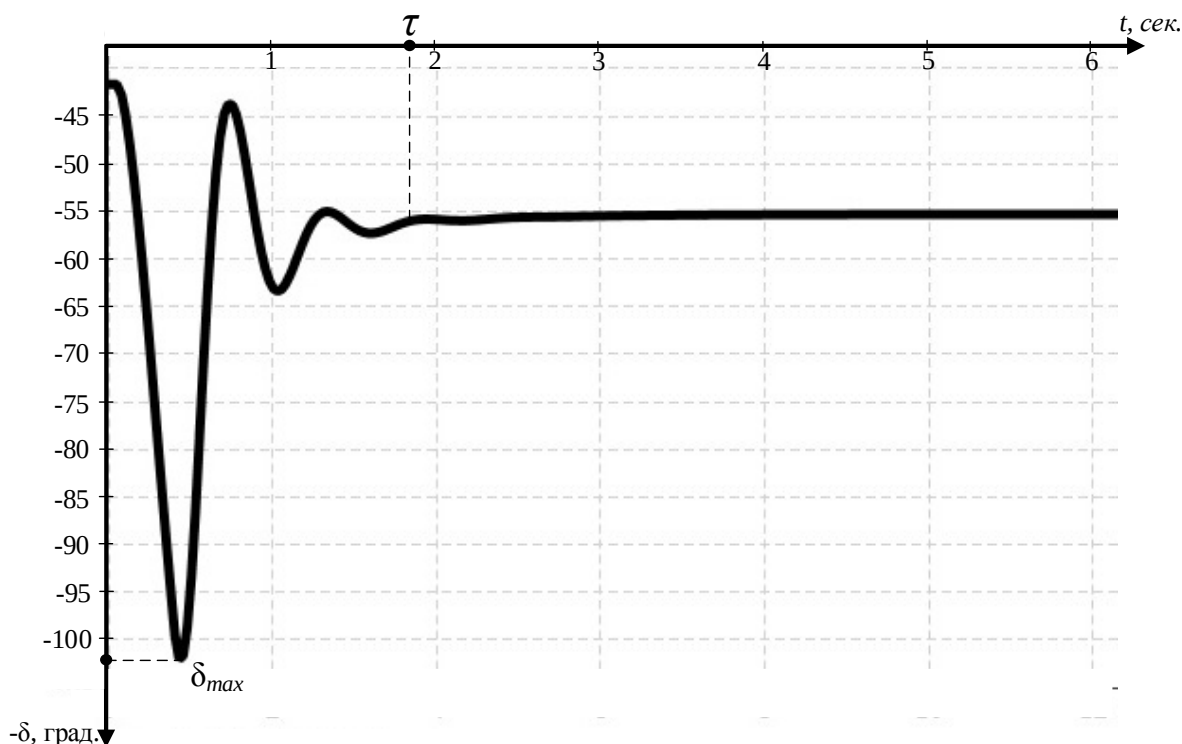


Рисунок 57 – Зависимость $\delta = f(t)$, полученная в ходе эксперимента №4

В ходе переходного процесса угол δ уменьшается до значения большего, чем критическое значение $\delta_{кр} = -90$ градусов, величина угла δ в послеаварийном установившемся режиме $\delta_{п.а.} = -55^\circ$.

Эксперимент №5: Исследуется режим совместной работы двух синхронных и двух асинхронных двигателей, заданных без учета статических характеристик, без перехода асинхронных двигателей в режим «выбега» и дальнейшего «самозапуска». Время переходного процесса составило $t = 3,58$ с. Максимальное значение угла $\delta_{max} = -104,2^\circ$. Анализ характеристики (рис. 58) свидетельствует о том, что синхронные двигатели сохраняют устойчивость и остаются в синхронизме, как в период переходного процесса, так и после его окончания.

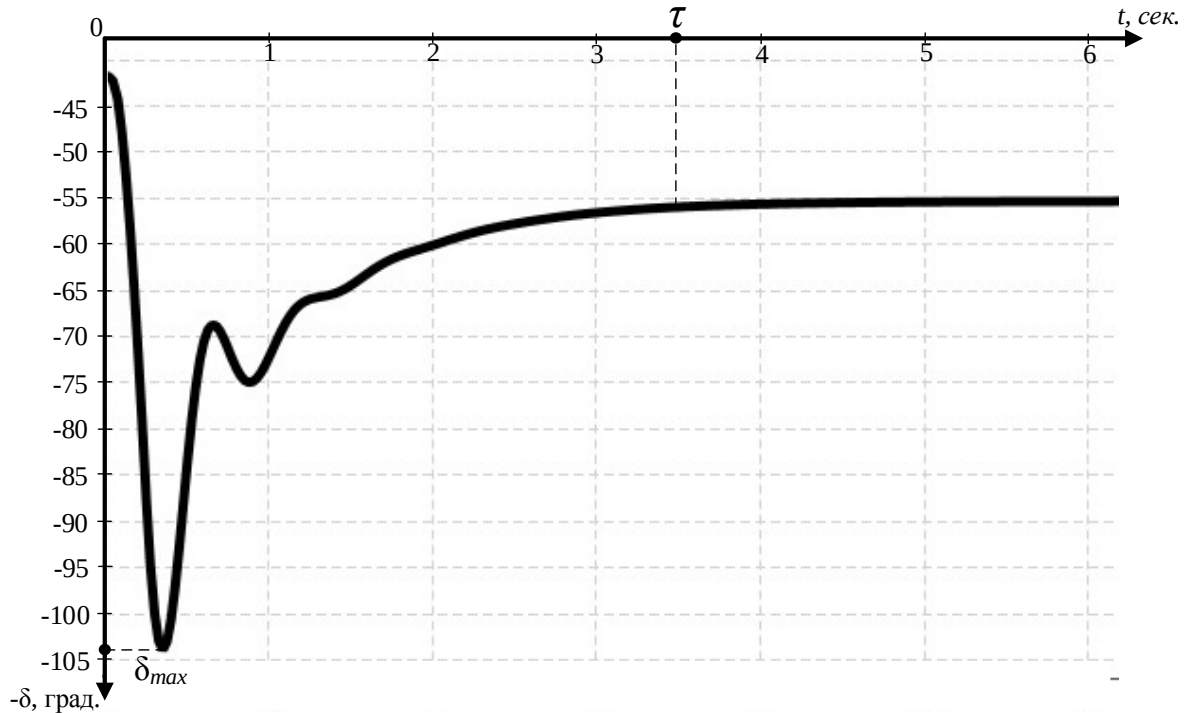


Рисунок 58 – Зависимость $\delta = f(t)$, полученная в ходе эксперимента №5

В ходе переходного процесса угол δ уменьшается до значения большего, чем критическое значение $\delta_{кр} = -90$ градусов, величина угла δ в послеаварийном установившемся режиме $\delta_{п.а.} = -55^\circ$.

Эксперимент №6: Исследуется режим совместной работы двух синхронных и двух асинхронных двигателей, заданных с учетом статических характеристик, без перехода асинхронных двигателей в режим «выбега» и дальнейшего «самозапуска». Время переходного процесса составило $t = 2,73$ с. Максимальное значение угла $\delta_{max} = -93,8^\circ$. Анализ характеристики (рис. 59) свидетельствует о том, что синхронные двигатели сохраняют устойчивость и остаются в синхронизме, как в период переходного процесса, так и после его окончания.

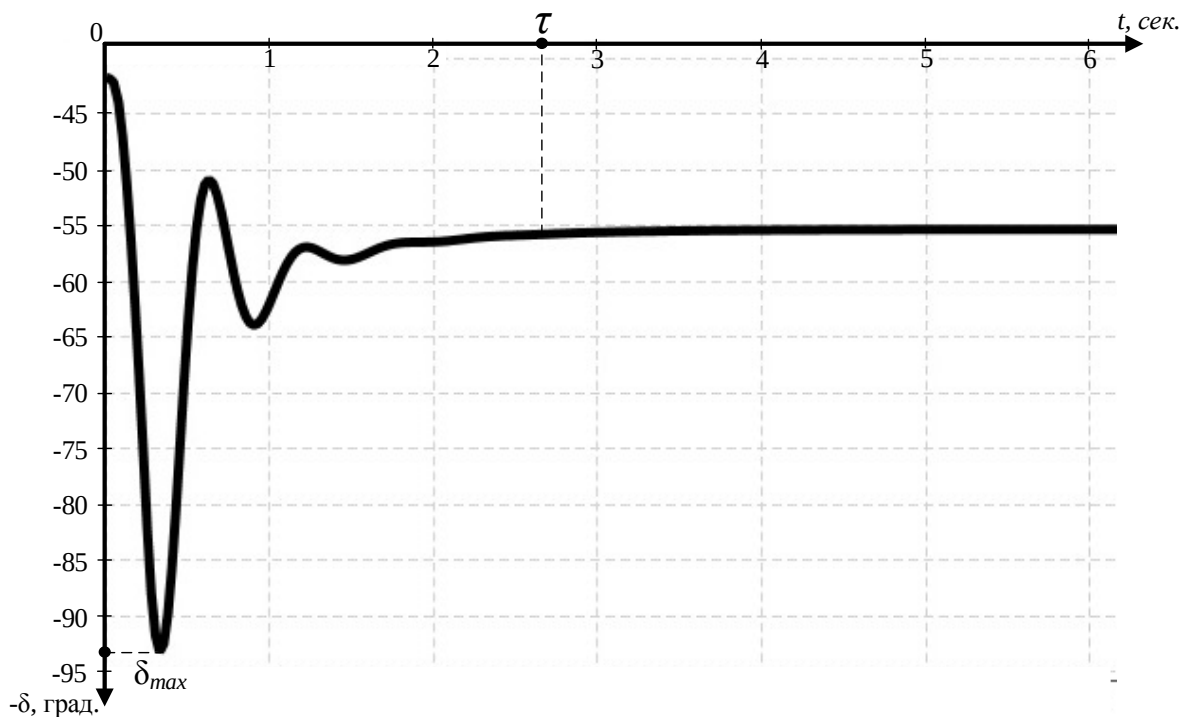


Рисунок 59 – Зависимость $\delta = f(t)$, полученная в ходе эксперимента №6

В ходе переходного процесса угол δ уменьшается до значения большего, чем критическое значение $\delta_{\text{кр}} = -90$ градусов, величина угла δ в послеаварийном установившемся режиме $\delta_{\text{п.а.}} = -55^\circ$.

Эксперимент №7: Исследуется режим совместной работы двух синхронных и двух асинхронных двигателей, заданных без учета статических характеристик, при переходе асинхронных двигателей в режим «выбега» и дальнейшего «самозапуска». Время переходного процесса составило $t = 3,44$ с. Максимальное значение угла $\delta_{\text{max}} = -117,5^\circ$. Анализ характеристики (рис. 60) свидетельствует о том, что синхронные двигатели сохраняют устойчивость и остаются в синхронизме, как в период переходного процесса, так и после его окончания.

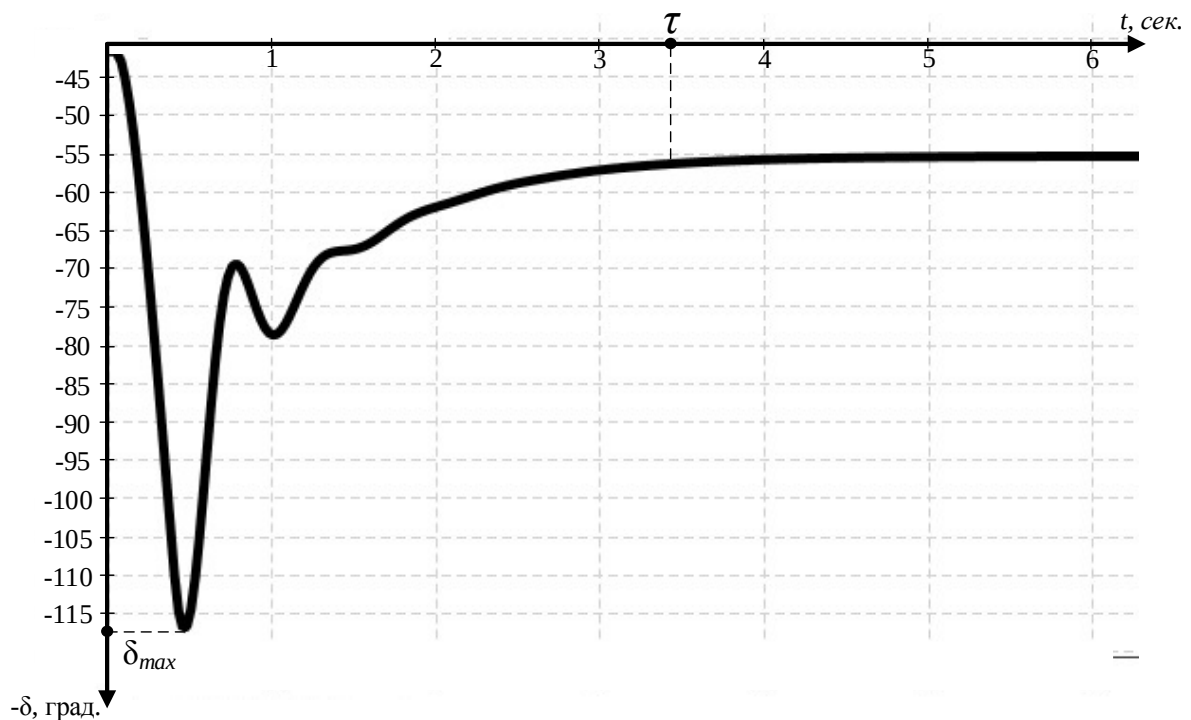


Рисунок 60 – Зависимость $\delta = f(t)$, полученная в ходе эксперимента №7

В ходе переходного процесса угол δ уменьшается до значения большего, чем критическое значение $\delta_{кр} = -90$ градусов, величина угла δ в послеаварийном установившемся режиме $\delta_{п.а.} = -55^\circ$.

Эксперимент №8: Исследуется режим совместной работы двух синхронных и двух асинхронных двигателей, заданных с учетом статических характеристик, при переходе асинхронных двигателей в режим «выбега» и дальнейшего «самозапуска». Время переходного процесса составило $t = 2,86$ с. Максимальное значение угла $\delta_{max} = -98,4^\circ$. Анализ характеристики (рис. 61) свидетельствует о том, что синхронные двигатели сохраняют устойчивость и остаются в синхронизме, как в период переходного процесса, так и после его окончания.

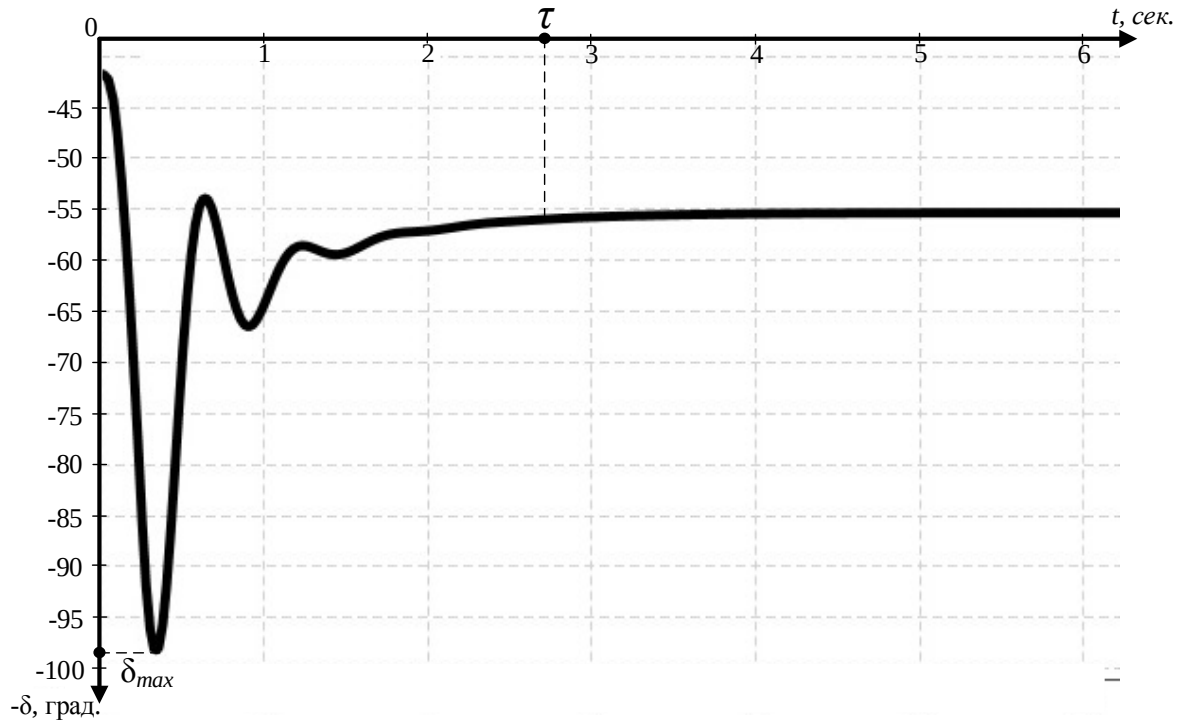


Рисунок 61 – Зависимость $\delta = f(t)$, полученная в ходе эксперимента №8

В ходе переходного процесса угол δ уменьшается до значения большего, чем критическое значение $\delta_{кр} = -90$ градусов, величина угла δ в послеаварийном установившемся режиме $\delta_{п.а.} = -55^\circ$.

4.4 Исследование статической устойчивости асинхронных двигателей

Исследование статической устойчивости предполагает исследование режимов работы двигателей при малых возмущениях, например, при плавном снижении напряжения на питающих шинах.

Критическим моментом асинхронного двигателя называется зависимость $M_{кр} = f(U)$, уравнение которой имеет вид [7,8]:

$$M_{кр} = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_{1ф}^2}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot c_1 \cdot \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 + x_2')^2} \right]}, \quad (21)$$

где:

p – число пар полюсов асинхронного двигателя;

$U_{1ф}$ – напряжение фазы обмотки статора;

m_1 – число фаз обмотки статора;

f_1 – частота питающей сети;

c_1 – постоянный коэффициент, определяемый параметрами Г-образной схемы замещения асинхронного двигателя;

x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора;

x_2' – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора;

r_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора;

Согласно уравнению (21), значение критического момента прямо пропорционально величине подведенного напряжения и не зависит от скольжения. На рис. 62 представлены механические характеристики $M = f(s)$, построенные при различных значениях питающего напряжения: $U_{\text{ном}} > U_1 > U_2 > U_{\text{кр}}$.

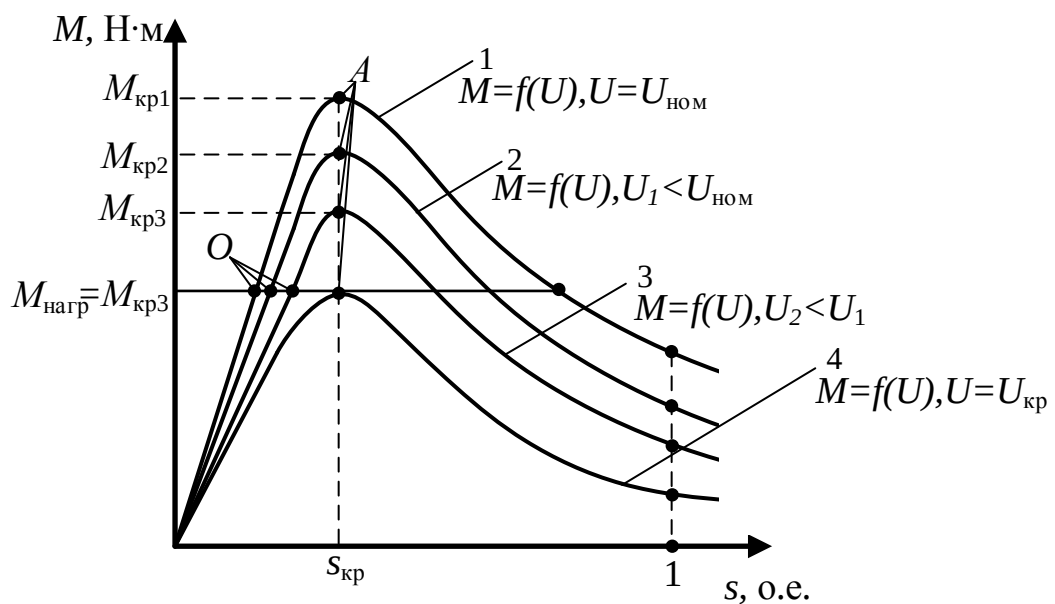


Рисунок 62 – Механические характеристики асинхронного двигателя при уменьшении питающего напряжения

Устойчивая работа асинхронного двигателя возможна при скольжениях меньше критического ($s < s_{\text{кр}}$), т.е. на участке OA механической характеристики. При снижении питающего напряжения ниже критического

значения $U_{кр}$, электромагнитный момент, развиваемый асинхронным двигателем, становится меньше статического момента на валу. Происходит потеря устойчивости, и ротор двигателя начинает тормозиться до его полного останова.

Факт потери асинхронным двигателем устойчивости фиксируется монотонным увеличением характеристики $s = f(t)$ на интервале $s \in [s_{ном}; 1]$ (рис. 63).

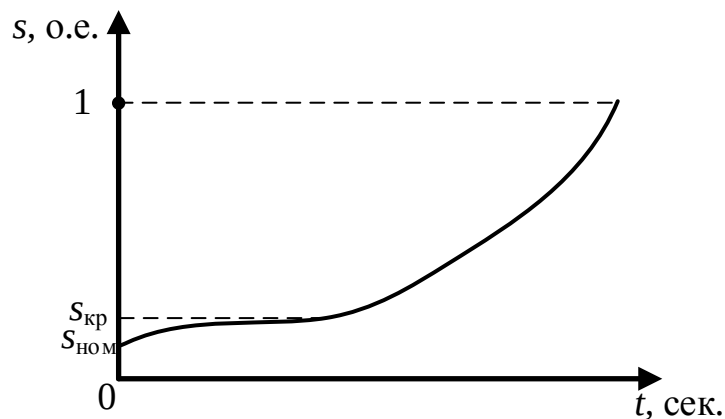


Рисунок 63 – Характеристика $s = f(t)$ при потере устойчивости АД

Таким образом, величинами, характеризующими состояние предельного режима по статической устойчивости асинхронного двигателя, являются: критическое скольжение и критическое напряжение.

Для оценки диапазона напряжений, в котором работа асинхронного двигателя является устойчивой, можно использовать коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению [1,4,9]:

$$K_U = \frac{U_{ном} - U_{кр}}{U_{ном}} \cdot 100\%, \quad (22)$$

где:

$U_{ном}$ – номинальное напряжение питающей сети;

$U_{кр}$ – критическое напряжение.

4.4.1 Описание экспериментов для асинхронных двигателей

Схема, используемая для исследования статической устойчивости асинхронных двигателей, представлена на рис. 64.

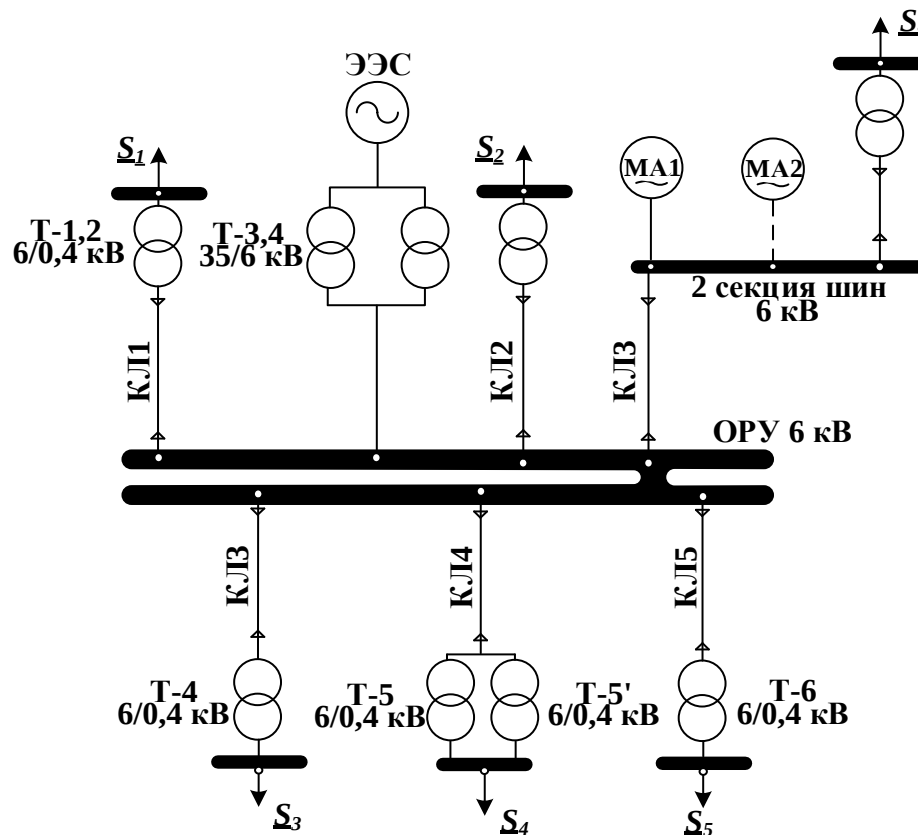


Рисунок 64 – Схема для экспериментов по исследованию статической устойчивости АД

Алгоритм проведения эксперимента следующий:

1. Определить критическое скольжение и критическое напряжение асинхронного двигателя путём плавного снижения напряжения на второй секции шин 6 кВ. Для оценки взаимного влияния двигателей, эксперимент проводится для двух режимов: на шинах работает один либо два асинхронных двигателя;

2. По выражению (22) определить коэффициенты запаса статической устойчивости по напряжению;

3. Для оценки влияния статических характеристик асинхронных двигателей на статическую устойчивость, в узлах задают статические характеристики, и расчеты по пунктам 1, 2 повторяют;

4. Сформировать таблицу результатов экспериментов.

4.4.2 Эксперимент по определению критического скольжения, критического напряжения и влияния статических характеристик на статическую устойчивость асинхронного двигателя

Рассмотрим эксперимент по исследованию статической устойчивости для режима, когда на шинах работает один асинхронный двигатель, при его задании без учёта статических характеристик.

1. Путём плавного снижения напряжения на шинах по характеристике $s = f(t)$ (рис. 65) определяем критическое скольжение асинхронного двигателя, при котором, в соответствии с механической характеристикой (рис. 34), двигатель развивает максимальный механический момент на валу, и критическое напряжение, при котором скольжение двигателя равно критическому значению.

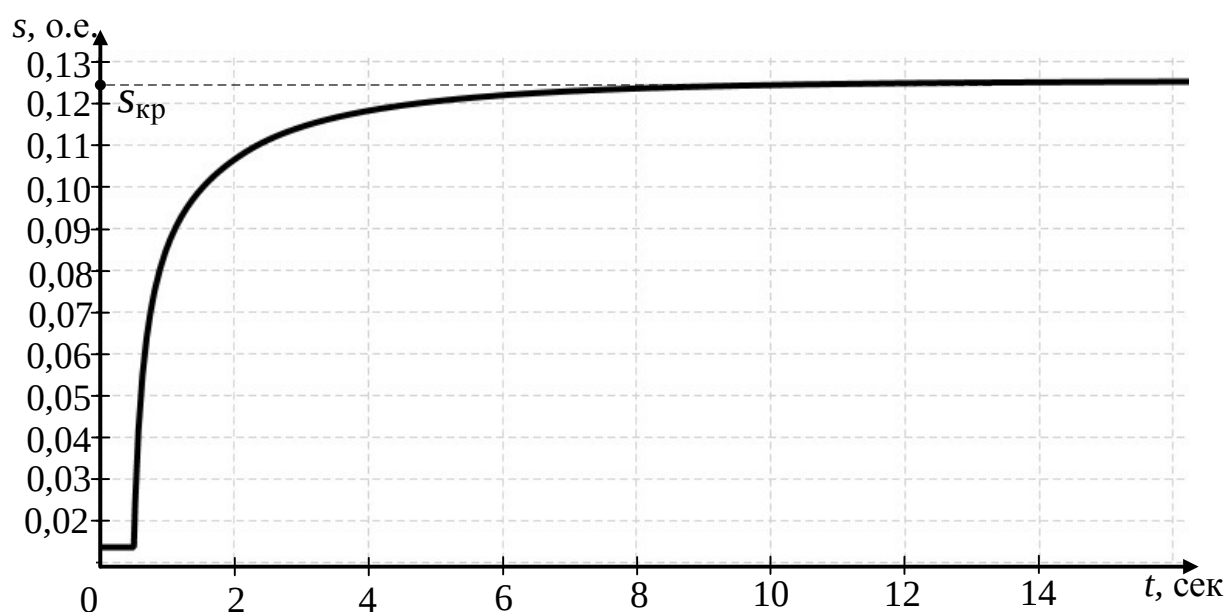


Рисунок 65 – Определение критического скольжения асинхронного двигателя
Критическое скольжение $s_{кр} = 12,53 \%$. Критическое напряжение $U_{кр} = 4,34$ кВ.

2. По выражению (22) определяем коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению.

$$K_U = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\text{кр}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{6,00 - 4,34}{6,00} \cdot 100\% = 27,7\%$$

Согласно методическим указаниям по определению устойчивости, величина коэффициента запаса статической устойчивости двигательной нагрузки в установившемся режиме должна быть не менее 20%. Значение $K_U^{(АД)} = 27,7\%$, полученное в ходе расчётов, удовлетворяет данным требованиям.

Эксперименты по определению критического скольжения и критического напряжения для режима работы двух двигателей и при учёте статических характеристик полностью идентичны предыдущему эксперименту, а все результаты приведены в табл. 13.

Таблица 13 – Результаты исследования статической устойчивости АД

Эксперимент	$s_{\text{кр}}, \%$	$U_{\text{кр}}, \text{кВ}$	$K_U, \%$
1 АД без учёта СХН	12,53	4,34	27,7
2 АД без учёта СХН	12,38	4,34	27,7
1 АД с учётом СХН	13,83	4,55	24,2
2 АД с учётом СХН	13,51	4,55	24,2

Анализ результатов исследования статической устойчивости при работе асинхронных двигателей показывает, что коэффициенты запаса статической устойчивости по напряжению, полученные в ходе расчёта, находятся в рекомендуемом диапазоне: $K_U^{(АД)} \geq 20\%$.

4.5 Исследование статической устойчивости синхронных двигателей

Семейство угловых характеристик синхронного двигателя $P = f(\delta)$, построенных при различных значениях питающего напряжения, были приведены в п. 4.2 (рис. 43).

Работу синхронного двигателя можно считать устойчивой на интервале $\delta \in [0^0; -90^0)$ (рис. 42, п.4.2), так как при работе на этом интервале даже любое случайное уменьшение угла δ приведёт к увеличению механической

мощности, развиваемой двигателем и к новому установившемуся режиму работы.

Режим работы синхронного двигателя на интервале $\delta \in [-90^\circ; -180^\circ]$ устойчивым считаться не может, так как на этом интервале даже незначительное уменьшение угла δ повлечёт за собой уменьшение механической мощности, развиваемой двигателем и неизбежный выпад двигателя из синхронизма.

Факт выпадения синхронного двигателя из синхронизма фиксируется при уменьшении угла $\delta < -90^\circ$ характеристики $\delta = f(t)$, полученной при снижении напряжения на питающих шинах (рис. 66).

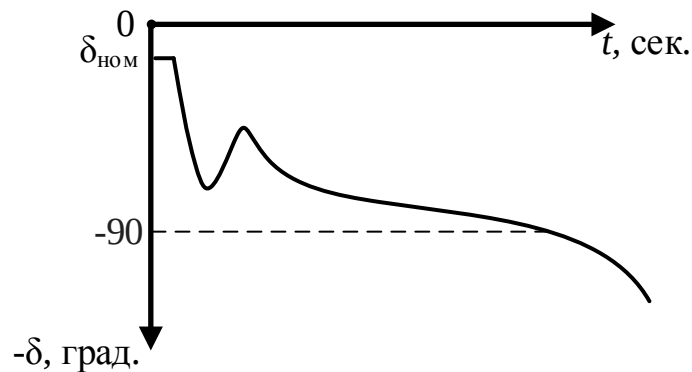


Рисунок 66 – Характеристика $\delta = f(t)$ при выпадении СД из синхронизма

Таким образом, величинами, характеризующими состояние предельного режима по статической устойчивости синхронного двигателя, являются: предельный угол $\delta_{\text{max}} \rightarrow -90^\circ$ и критическое напряжение.

Для оценки диапазона напряжений, в котором работа синхронного двигателя является устойчивой, используется коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению.

4.5.1 Описание экспериментов для синхронных двигателей

Схема, используемая для исследования статической устойчивости синхронных двигателей, представлена на рис. 67.

Исследование заключается в следующем:

1. Путём плавного снижения напряжения на шинах строится семейство характеристик $\delta = f(t)$ при различных значениях питающего напряжения;
2. Исследуя семейство зависимостей $\delta = f(t)$, определяется предельная характеристика, угол нагрузки которой стремится к значению $\delta_{\max} \rightarrow -90^\circ$;
3. Фиксируется критическое напряжение $U_{\text{кр}}$, при котором была получена характеристика. По выражению (22) определяется коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению;

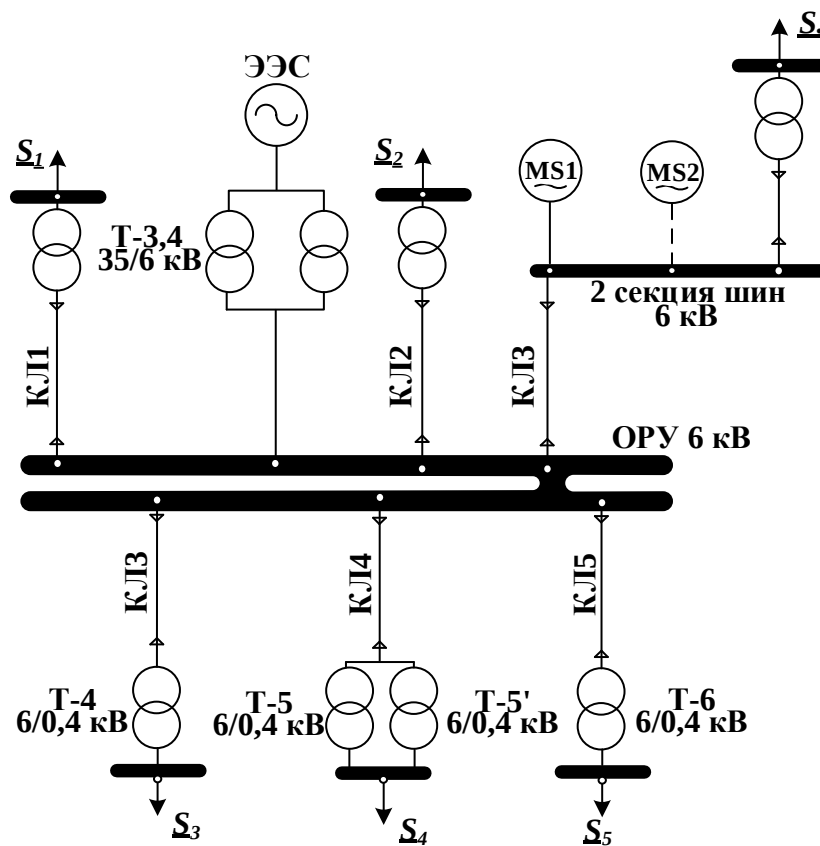


Рисунок 67 – Схема для экспериментов по исследованию статической устойчивости СД

4. Для оценки влияния статических характеристик нагрузки в узлах с синхронными двигателями задаются статические характеристики нагрузки по напряжению, и расчеты по пунктам 1–3 повторяют;

Для оценки взаимного влияния двигателей все эксперименты проводятся для двух режимов: когда на исследуемых шинах работает один и два синхронных двигателя;

5. Формируют таблицу результатов экспериментов.

4.5.2. Эксперимент по определению критического напряжения и влияния статических характеристик на статическую устойчивость синхронного двигателя

Рассмотрим эксперимент по исследованию статической устойчивости для режима, когда на шинах работает один синхронный двигатель, при его задании без учёта статических характеристик.

1. Путём плавного снижения напряжения на шинах строится семейство характеристик $\delta = f(t)$ (рис. 68) при различных значениях питающего напряжения.

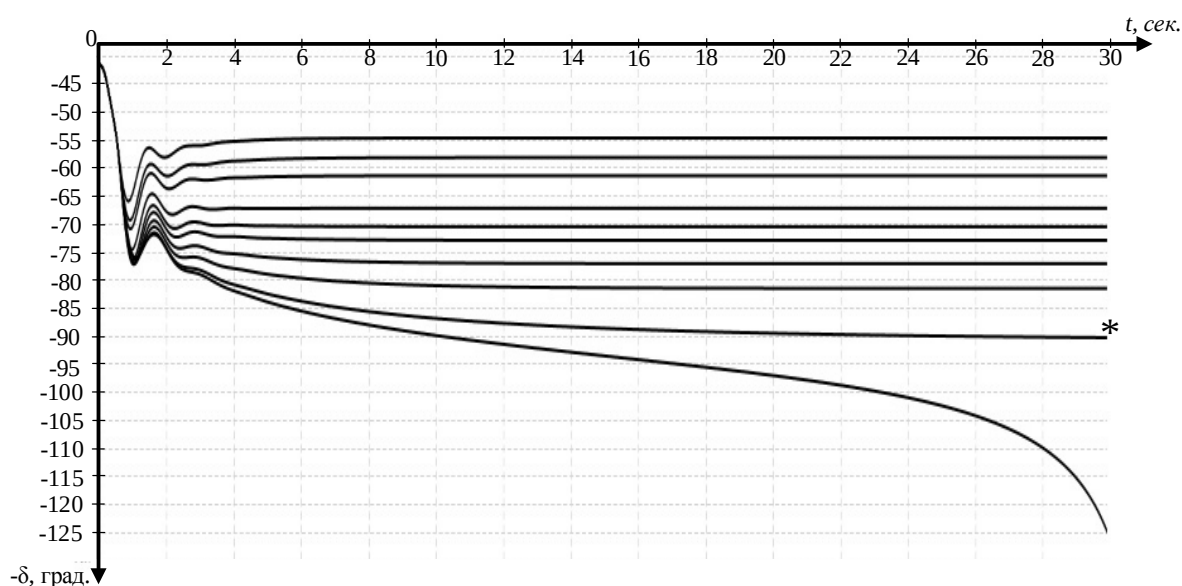


Рисунок 68 – Семейство характеристик $\delta = f(t)$ синхронного двигателя при уменьшении питающего напряжения

2. По зависимостям $\delta = f(t)$ (рис. 68) определяется характеристика, предельный угол которой $\delta_{\max} \rightarrow -90^\circ$ (характеристика обозначена *).

3. Напряжение, при котором была построена предельная характеристика $\delta_{\text{пред}} = f(t): U_{\text{кр}} = 4,46 \text{ кВ}$.

4. По выражению (22) определяется коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению.

$$K_U = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\text{кр}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{6,00 - 4,46}{6,00} \cdot 100\% = 25,7\%$$

Согласно методическим указаниям по определению устойчивости, величина коэффициента запаса статической устойчивости двигательной нагрузки в установившемся режиме должна быть не менее 20%. Значение $K_U^{(\text{СД})} = 25,7\%$, полученное в ходе расчётов, удовлетворяет данным требованиям.

Эксперименты по определению критического напряжения для режима работы двух двигателей и при учёте статических характеристик полностью идентичны предыдущему эксперименту, поэтому не приводятся, а результаты приведены в табл.14.

Таблица 14– Результаты исследования статической устойчивости СД

Эксперимент	$U_{\text{кр}}$, кВ	K_U , %
1 СД без учёта СХН	4,46	25,7
2 СД без учёта СХН	4,46	25,7
1 СД с учётом СХН	4,67	22,2
2 СД с учётом СХН	4,67	22,2

Анализ результатов исследования статической устойчивости при работе синхронных двигателей показывает, что коэффициенты запаса статической устойчивости по напряжению, полученные в ходе расчёта, находятся в рекомендуемом диапазоне: $K_U^{(\text{СД})} \geq 20\%$.

4.6 Описание экспериментов по исследованию статической устойчивости для режимов совместной работы синхронных и асинхронных двигателей

Схема, используемая для исследования статической устойчивости совместной работы синхронных и асинхронных двигателей, представлена на рис. 69.

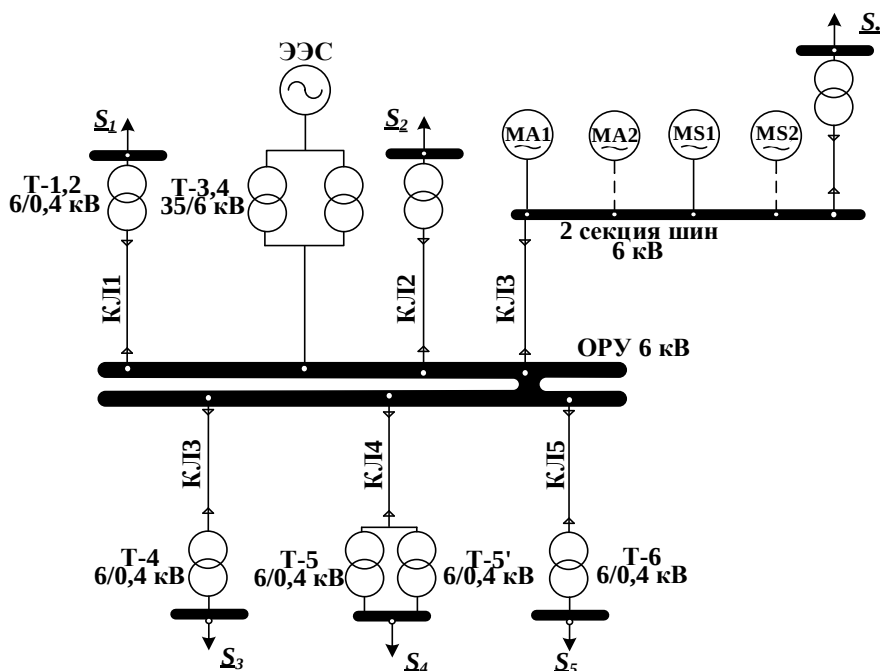


Рисунок 69 – Схема для экспериментов по исследованию статической устойчивости совместных режимов работы синхронных и асинхронных двигателей

Порядок проведения исследования:

1. Определяют критическое скольжение асинхронного двигателя путём плавного снижения напряжения на второй секции шин 6 кВ;
2. Путём плавного снижения напряжения на шинах для синхронного двигателя строят семейство характеристик $\delta = f(t)$ при различных значениях питающего напряжения.
3. Для асинхронного и синхронного двигателей определяют критические напряжения и коэффициенты запаса устойчивости по напряжению;
4. Эксперименты 1–3 проводят для режима работы двух пар двигателей;
5. Для оценки влияния статических характеристик нагрузки в узлах с асинхронными и синхронными двигателями задают статические характеристики нагрузки по напряжению, и расчеты по пунктам 1–4 повторяют;
6. Формируют таблицу результатов экспериментов.

4.7 Результаты экспериментов по исследованию статической устойчивости для режимов совместной работы синхронных и асинхронных двигателей

Рассмотрим эксперимент по исследованию статической устойчивости для режима, когда на шинах работает один синхронный и один асинхронный двигатель при их задании без учёта статических характеристик.

1. Путём плавного снижения напряжения на шинах по характеристике $s = f(t)$ (рис. 70) определяем критическое скольжение асинхронного двигателя, при котором, в соответствии с механической характеристикой (рис. 34), двигатель развивает максимальный механический момент на валу. Критическое скольжение $s_{кр} = 12,53 \%$.

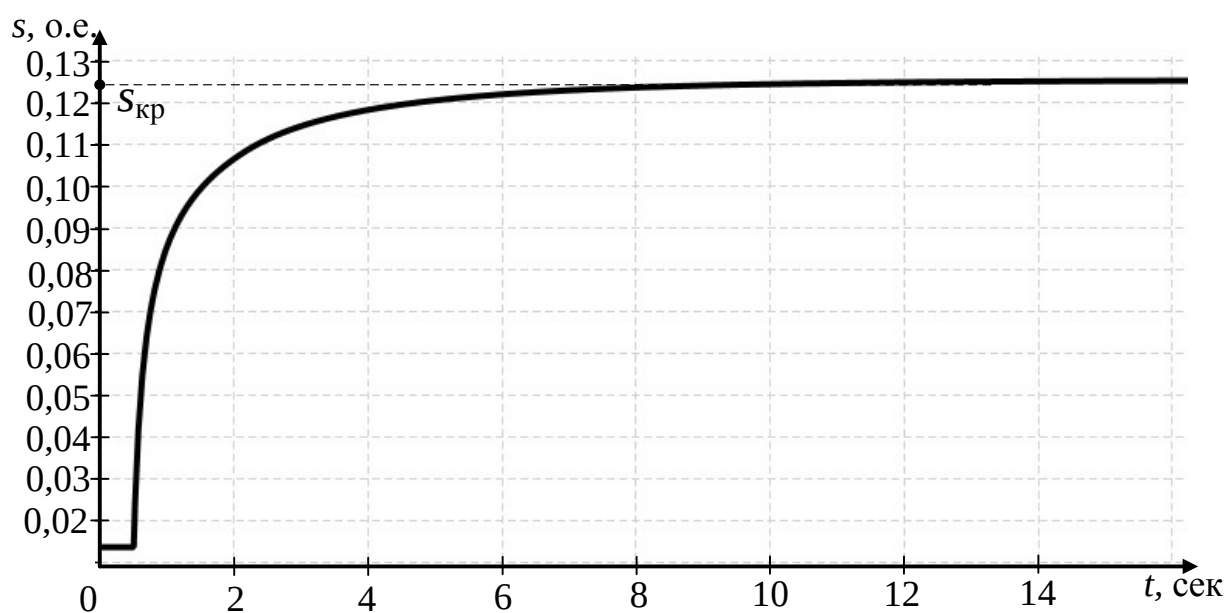


Рисунок 70 – Определение критического скольжения асинхронного двигателя для режима совместной работы АД и СД

2. Путём плавного снижения напряжения на шинах для синхронного двигателя строим семейство характеристик $\delta = f(t)$ (рис. 71) при различных значениях питающего напряжения.

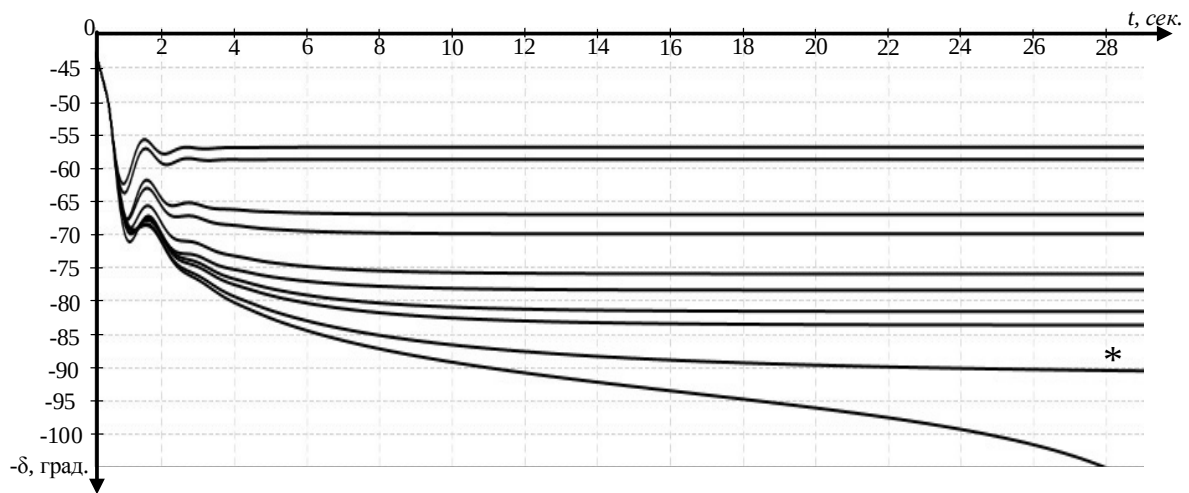


Рисунок 71 – Семейство характеристик $\delta = f(t)$ синхронного двигателя при уменьшении питающего напряжения для режима совместной работы АД и СД

3. Для асинхронного и синхронного двигателей определяем критические напряжения и коэффициенты запаса устойчивости по напряжению:

$$U_{кр}^{(АД)} = 4,34 \text{ кВ}, U_{кр}^{(СД)} = 4,46 \text{ кВ};$$

$$K_U^{(АД)} = \frac{U_{ном} - U_{кр}^{(АД)}}{U_{ном}} = \frac{6,00 - 4,34}{6,00} \cdot 100\% = 27,7 \%,$$

$$K_U^{(СД)} = \frac{U_{ном} - U_{кр}^{(СД)}}{U_{ном}} = \frac{6,00 - 4,46}{6,00} \cdot 100\% = 25,7 \%.$$

Согласно методическим указаниям по определению устойчивости, величина коэффициента запаса статической устойчивости двигательной нагрузки в установившемся режиме должна быть не менее 20%. Значения $K_U^{(АД)} = 27,7\%$ и $K_U^{(СД)} = 25,7\%$, полученные в ходе расчётов, удовлетворяют данным требованиям.

4. Эксперименты исследования статической устойчивости для режима работы двух пар двигателей и при учёте их статическими характеристиками полностью идентичны предыдущему эксперименту, поэтому не приводятся. Результаты всех экспериментов приведены в табл.15.

Таблица 15 – Результаты исследования статической устойчивости при совместной работе АД и СД

Эксперимент	$s_{кр}, \%$	$U_{кр}^{(АД)}, \text{кВ}$	$K_U^{(АД)}, \%$	$U_{кр}^{(СД)}, \text{кВ}$	$K_U^{(СД)}, \%$
1 АД+1 СД без учёта СХН	12,53	4,34	27,7	4,46	25,7
2 АД+2 СД без учёта СХН	12,38	4,34	27,7	4,46	25,7
1 АД+1 СД с учётом СХН	13,83	4,55	24,2	4,67	22,2
2 АД+2 СД с учётом СХН	13,51	4,55	24,2	4,67	22,2

Анализ результатов исследования статической устойчивости при совместной работе асинхронных и синхронных двигателей показывает, что коэффициенты запаса статической устойчивости по напряжению, полученные в ходе расчёта, находятся в рекомендуемом диапазоне: $K_U^{(АД)} \geq 20\%, K_U^{(СД)} \geq 20\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РАЗДЕЛУ 4

В результате проведения серии экспериментов по исследованию статической и динамической устойчивости двигательной нагрузки, запитанной от второй секции шин подстанции 35/6 кВ ЗАО «Сибкабель», были исследованы режимы работы асинхронных и синхронных двигателей в результате малых и больших возмущений. Полученные результаты позволяют оценить поведение двигателей в переходных и послеаварийных режимах, а также при постепенном снижении напряжения на питающих шинах. Полученные результаты позволяют оценить влияние статических характеристик нагрузки на результаты исследования статической и динамической устойчивости.

В качестве модели внешней электрической сети, от которой получает питание подстанция 35/6 кВ, использовался источник, работающий на шины бесконечной мощности, которому присуща некоторая инертность при изменении генерации активной и реактивной мощности. Минимальное время реакции системы на изменение параметров режима составляет $t_{\min} = 1$ сек. Так как время моделируемых больших возмущений значительно меньше минимального времени реакции системы $t_{б.в.} < t_{\min}$, а время малых возмущений много больше минимального времени реакции системы $t_{м.в.} \gg t_{\min}$, то взаимное влияние двигателей было исследовано только для динамической устойчивости.

Обобщенные результаты экспериментов, полученные в ходе исследования динамической устойчивости, представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Результаты исследования динамической устойчивости

Исследуемый режим работы	Учёт статических характеристик	Параметры, характеризующие динамическую устойчивость			
		Асинхронный двигатель		Синхронный двигатель	
		$s_{кр}$, %	$t_{пред}$, сек.	Сохр. устойч.	δ_{max} , град.
1 АД	–	12,53	0,367		
1 АД	+	13,8	0,429		
2 АД	–	12,38	0,359		
2 АД	+	13,51	0,412		
1 СД	–			+	–90
1 СД	+			+	–80
2 СД	–			–	
2 СД	+			+	–107,7

Таблица 16 – Продолжение

Исследуемый режим работы	Учёт статических характеристик	Параметры, характеризующие динамическую устойчивость			
		Асинхронный двигатель		Синхронный двигатель	
		$s_{кр}$, %	$t_{пред}$, сек.	Сохран. устойчив.	δ_{max} , град.
1 АД + 1 СД	–	12,53	0,367	+	–86,4
1 АД + 1 СД	+	13,8	0,429	+	–74,8
2 АД + 2 СД	–	12,38	0,359	+	–104,2
2 АД + 2 СД	+	13,51	0,412	+	–93,8
1 АД (выбег) + 1 СД	–			+	–125,8
1 АД (выбег) + 1 СД	+			+	–103,3
2 АД (выбег) + 2 СД	–			+	–117,5
2 АД (выбег) + 2 СД	+			+	–98,4

1. Для лучшего понимания влияния статических характеристик асинхронного двигателя следует рассмотреть рисунок 72, где зависимости, отражающие потребление реактивной мощности асинхронным двигателем, построены по результатам экспериментов, описанных в разделе 2.

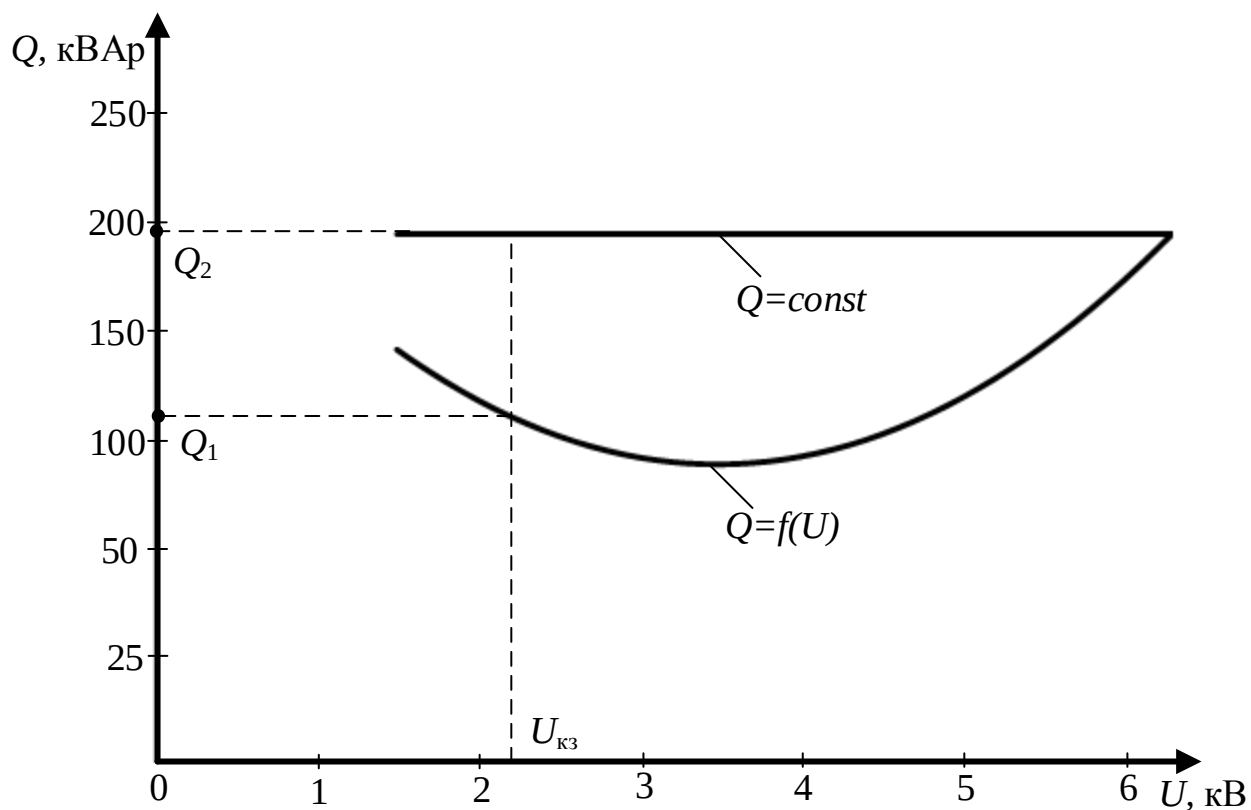


Рисунок 72 – Потребление реактивной мощности асинхронным двигателем с учётом и без учёта статических характеристик нагрузки

Анализируя зависимости, можно сделать вывод о том, что в момент возмущения, при учёте статических характеристик, потребление реактивной мощности асинхронным двигателем Q_1 меньше, чем Q_2 , т.е. при $Q = \text{const}$. Следовательно, величины критического скольжения и предельного времени отключения короткого замыкания при расчете переходного режима без учёта статических характеристик будут определены неточно, что подтверждают результаты экспериментов.

2. Зависимости, отражающие потребление реактивной мощности синхронным двигателем, представлены на рисунке 73.

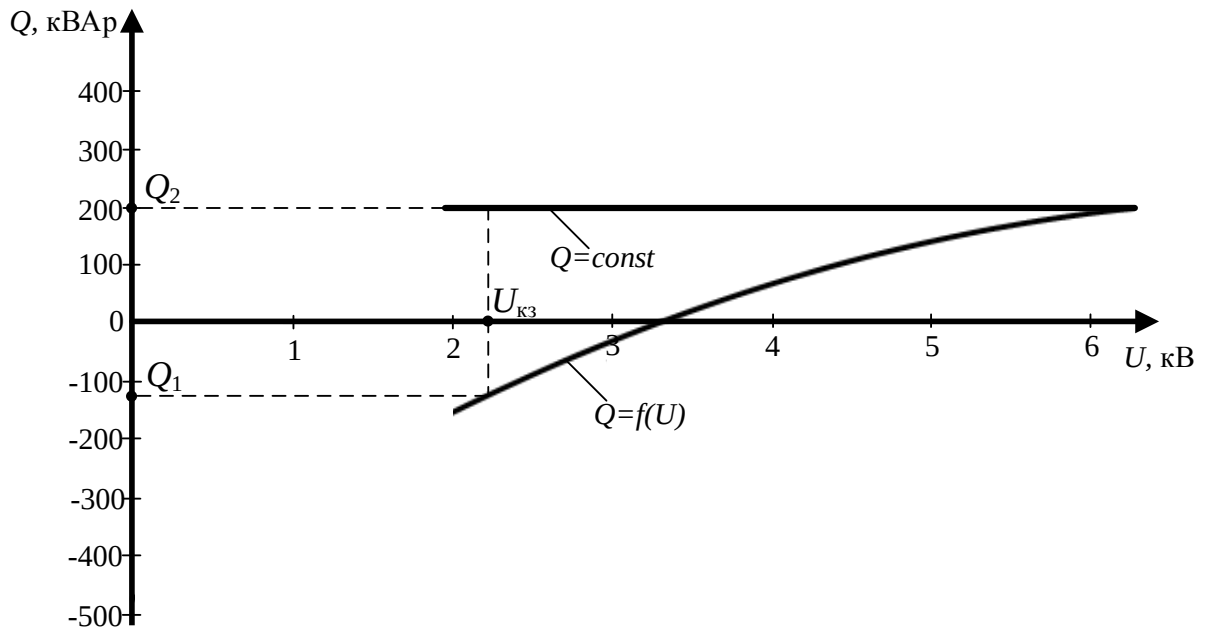


Рисунок 73 – Потребление реактивной мощности синхронным двигателем с учётом и без учёта статических характеристик нагрузки

Анализируя графики, можно сделать вывод о том, что в момент возмущения, при учёте статических характеристик нагрузки, синхронный двигатель переходит в генераторный режим и начинает генерировать реактивную мощность Q_1 в сеть, о чём свидетельствует смена знака статической характеристики $Q = f(U)$. Однако, при расчёте переходного режима без учёта статических характеристик нагрузки, потребление синхронным двигателем реактивной мощности Q_2 больше, чем генерация Q_1 . Следовательно, переходный режим, рассчитанный без учёта статических характеристик, будет выглядеть более тяжёлым, что подтверждают результаты экспериментов: происходит увеличение максимального значения угла $\delta_{\max}$ характеристики $\delta = f(t)$, полученной в результате возмущения, что может привести к ошибочным выводам при анализе устойчивости.

3. Двигатели одного типа, например, СД+СД либо АД+АД оказывают негативное влияние друг на друга во время возмущения. В случае режима работы двух асинхронных двигателей уменьшаются значения критического скольжения и предельного времени отключения короткого замыкания. В

случае режима работы двух синхронных двигателей увеличивается максимальное значение угла $\delta_{\max}$, что свидетельствует о более тяжёлом протекании переходного процесса. Выводы о негативном влиянии можно сделать для переходных режимов рассчитанных, как без учёта статических характеристик, так и с их учётом. Дело в том, что при режиме работы двух асинхронных двигателей, два двигателя потребляют больше реактивной мощности, чем один асинхронный двигатель, поэтому переходный режим оказывается более тяжёлым. Аналогично, при режиме работы двух синхронных двигателей, два двигателя генерируют в сеть больше реактивной мощности, чем один синхронный двигатель, тем самым дополнительно подпитывая место короткого замыкания.

Однако следует отметить, что двигатели разных типов, т.е. АД+СД оказывают положительное влияние друг на друга во время возмущения. В этом случае подпитка короткого замыкания, осуществляемая генерацией реактивной мощности синхронным двигателем, компенсируется потреблением реактивной мощности асинхронным двигателем, поэтому переходный режим оказывается менее тяжёлым, о чём свидетельствуют результаты экспериментов.

4. При переходе асинхронного двигателя в режим выбега, он начинает дополнительно потреблять активную и реактивную мощность из сети, о чём уже было сказано в п.4.1.1. В этом случае, дополнительное потребление активной и реактивной мощности, будет способствовать ещё большему уменьшению питающего напряжения, и, следовательно, ещё большему утяжелению переходного режима. Следует отметить и то, что уменьшение питающего напряжения будет способствовать отягощению дальнейшего самозапуска асинхронного двигателя.

При отключении короткого замыкания и частичном восстановлении напряжения на питающих шинах начинается процесс самозапуска асинхронного двигателя. Процессы при самозапуске подобны процессам при пуске двигателя, т.е. в этом режиме он начинает потреблять ещё больше

реактивной мощности, чем в режиме выбега. В результате этого напряжение в месте подключения двигателя еще больше уменьшается, что способствует большему утяжелению переходного режима для синхронного двигателя. Об этом свидетельствует увеличение максимального значения угла $\delta_{\max}$ характеристики $\delta = f(t)$, полученной в результате возмущения (рис.57).

В проводимых экспериментах, значение напряжения на шинах подключения двигателей при самозапуске асинхронного двигателя оказалось больше критического значения, что способствовало переходу асинхронного в установившийся послеаварийный режим работы. В ином случае, если напряжение на питающих шинах в результате самозапуска уменьшается ниже критического значения, то асинхронный двигатель опрокидывается и снова переходит в режим выбега. Далее процесс уменьшения напряжения на питающих шинах будет происходить до полного обесточивания узла нагрузки (рис. 74). Данный процесс носит название «лавины напряжения».

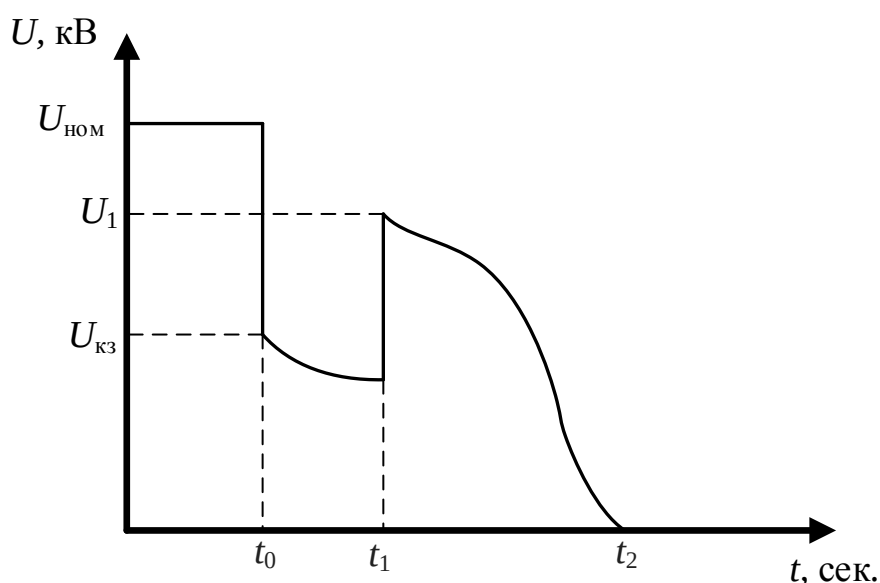


Рисунок 74 – Развитие лавины напряжения

Для предотвращения развития лавины напряжения в узле нагрузки целесообразно отключать неответственных потребителей. Поскольку процесс развития лавины напряжения происходит довольно быстро (несколько секунд), и диспетчер не успевает предотвратить нарушение устойчивости нагрузки, то функция по предотвращению глубокого снижения напряжения в

аварийных режимах возлагается на специальную автоматику отключения нагрузки «САОН» и дополнительную автоматику разгрузки по напряжению «ДАРН».

5. Методические указания по определению устойчивости [1,2] предписывают производить расчёты статической устойчивости только с учётом статических характеристик нагрузки. Анализ положительного или негативного влияния статических характеристик должно выполняться исходя из предписаний данных нормативных документов. При расчётах, произведенных без учёта двигателей статическими характеристиками, происходит уменьшение значения критического напряжения, и, соответственно, увеличение значений коэффициентов запаса устойчивости по напряжению, как для асинхронного, так и для синхронного двигателей, поэтому коэффициенты запаса устойчивости по напряжению оказываются завышенными, что может привести к ошибочным выводам при анализе устойчивости.

Для объяснения результатов исследования статической устойчивости АД и СД, воспользуемся вторичным критерием устойчивости нагрузки. Таким критерием является положительный знак производной эквивалентной ЭДС двигателя по напряжению (критерий устойчивости Жданова) [4]:

$$\frac{dE_{\text{экв}}}{dU} > 0; \quad (23)$$

Для асинхронного двигателя и синхронного двигателей, работающего в режиме недовозбуждения, эквивалентная ЭДС определяется из выражения:

$$E_{\text{э}} = \sqrt{\left(U + \frac{P_{\text{н}} \cdot R + Q_{\text{н}} \cdot X}{U} \right)^2 + \left(\frac{P_{\text{н}} \cdot X - Q_{\text{н}} \cdot R}{U} \right)^2}, \quad (24)$$

где:

U – текущее значение питающего напряжения;

$P_{\text{н}}, Q_{\text{н}}$ – активная и реактивная мощность, потребляемая двигателями;

R, X – активное и индуктивное сопротивление обмотки статора асинхронного и синхронного двигателей.

Зависимость $E_s = f(U)$, построенная при плавном уменьшении напряжения на питающих шинах, имеет вид параболы, внешний вид которой показан на рисунке 75.

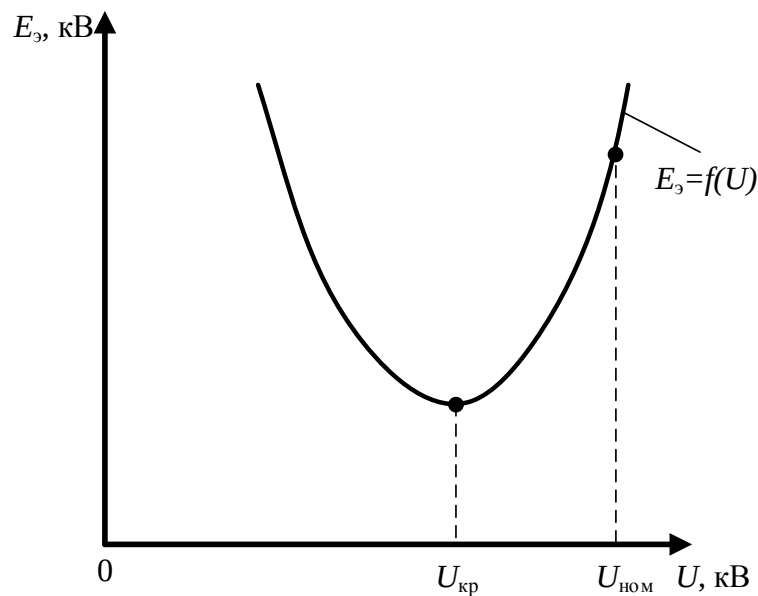


Рисунок 75 – Характеристика $E_s = f(U)$

Анализируя зависимость $E_s = f(U)$ с использованием критерия статической устойчивости $\frac{dE_{э\kappa\theta}}{dU} > 0$, можно отметить, что значение критического напряжения асинхронного и синхронного двигателей является экстремумом функции $E_s = f(U)$.

При учёте асинхронного и синхронного двигателей статическими характеристиками, функция $E_s = f(U)$ достигает своего экстремума при большем значении пониженного напряжения, чем при представлении двигателей неизменными мощностями. Следовательно, при учёте двигателей статическими характеристиками значения критического напряжения увеличиваются, и, соответственно, уменьшаются значения коэффициентов запаса устойчивости по напряжению, о чём и свидетельствуют результаты экспериментов.

РАЗДЕЛ 5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ РЕСУРСО–ЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Достижение цели создания конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения, обеспечивается решением задач:

1. оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
2. определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
3. планирование научно-исследовательских работ;
4. определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

5.1 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Данный анализ целесообразно проводить при помощи оценочной карты.

Оценочную карту проведем для возможных вариантов программных комплексов, предназначенных для выполнения расчётов статической и динамической устойчивости:

- 1) RastrWin
- 2) MUSTANG
- 3) EUROSTAG

При выполнении анализа возможности использования того или иного программного комплекса очень важно, чтобы выбранный вариант соответствовал требованиям ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Говоря об этом, прежде всего, речь идёт о финансовых и человеческих ресурсах.

Таблица 17 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		№1	№2	№3	K_{k1}	K_{k2}	K_{k3}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Элементная база программного комплекса	0,25	5	3	5	1,25	0,75	1,25
2. Функциональные возможности полной версии программного комплекса	0,15	5	3	5	0,75	0,45	0,75
3. Актуальность версии программного обеспечения	0,1	4	1	4	0,4	0,1	0,4
4. Ссылки авторитетных источников на использование программного комплекса	0,05	3	1	4	0,15	0,05	0,2
5. Простота интерфейса программного комплекса	0,05	4	5	1	0,2	0,25	0,05
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Функциональные возможности студенческой версии программного комплекса	0,25	5	3	3	1,25	0,75	0,75
2. Цена программного обеспечения	0,1	3	5	1	0,3	0,5	0,1
3. Затраты на ПК, рекомендованные для использования данного комплекса	0,05	4	5	2	0,2	0,25	0,1
Итого	1	33	21	25	4,5	3,1	3,6

Позиция оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме составляют 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i,$$

где:

K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Пример оценки конкурентоспособности на примере 1 варианта:

$$K_{k1\Sigma} = 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,05 \cdot 3 + 0,05 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 + 0,1 \cdot 3 + \\ + 0,05 \cdot 4 = 4,5.$$

По данным оценочной карты наиболее привлекательным вариантом является вариант № 1 – программный комплекс RastrWin.

По итогам составления оценочной карты необходимо ответить на два вопроса:

1. В чем обусловлена уязвимость других вариантов?
2. В чем конкурентное преимущество программного комплекса?

Основной недостаток других программных комплексов это отсутствие необходимых функциональных возможностей студенческих версий программ, что является определяющим в выборе программного комплекса для проведения исследований. Основными конкурентными преимуществами RastrWin являются обширная элементная база, высокий уровень функциональных возможностей, как в студенческой, так и в полной версии, относительно небольшие затраты на требуемые ПК.

5.2 Оценка конкурентных технических решений при помощи технологии QuaD

Технология оценки QuaD (качественный советник) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект. По своему содержанию данный инструмент близок к методике оценки конкурентных технических решений, описанных в предыдущем пункте.

В основе технологии QuaD лежит нахождение средневзвешенной величины различных групп показателей.

Для упрощения процедуры проведения QuaD анализа целесообразно произвести оценку вариантов в табличной форме.

Таблица 18 – QuaD оценка программного комплекса RastrWin

Критерий	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
1. Функциональные возможности	0,15	100	100	1	0,15
2. Достоверность результатов	0,2	85	100	0,85	0,17
3. Унифицированность	0,08	90	100	0,9	0,072
4. Удобство интерфейса	0,05	90	100	0,9	0,045
5. Элементная база	0,25	95	100	0,95	0,2375
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
6. Конкурентоспособность	0,1	80	100	0,8	0,08
7. Перспективность	0,07	85	100	0,85	0,0595
8. Цена	0,1	85	100	0,85	0,085
Итого	1	710	–	7,1	0,899

Таблица 19 – QuaD оценка программного комплекса MUSTANG

Критерий	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
1. Функциональные возможности	0,15	40	100	0,4	0,06
2. Достоверность результатов	0,2	70	100	0,7	0,14
3. Унифицированность	0,08	90	100	0,9	0,072
4. Удобство интерфейса	0,05	60	100	0,6	0,03
5. Элементная база	0,25	50	100	0,4	0,125
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
6. Конкурентоспособность	0,1	35	100	0,5	0,035
7. Перспективность	0,07	10	100	0,35	0,007
8. Цена	0,1	100	100	0,1	0,1
Итого	1	710	–	4,55	0,569

Таблица 20 – QuaD оценка программного комплекса EUROSTAG

Критерий	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
1. Функциональные возможности	0,15	100	100	1	0,15
2. Достоверность результатов	0,2	90	100	0,9	0,18
3. Унифицированность	0,08	30	100	0,3	0,024
4. Удобство интерфейса	0,05	45	100	0,45	0,0225
5. Элементная база	0,25	95	100	0,95	0,2375
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
6. Конкурентоспособность	0,1	85	100	0,85	0,085
7. Перспективность	0,07	100	100	1	0,07
8. Цена	0,1	25	100	0,25	0,025
Итого	1	570	–	5,7	0,794

Оценка качества и перспективности исследуемого варианта по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum B_i \cdot B_i;$$

где:

P_{cp} – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

Значение P_{cp} позволяет судить о перспективах разработки данной схемы. В нашем случае имеем, что $P_{cp} = 0,899 \cdot 100\% = 89,9\%$. Что демонстрирует перспективность работы в данном направлении.

Возможным движением в данном направлении может послужить разработка и применение комплексных методов компьютерного моделирования для полной реализации имеющихся потенциальных возможностей программного комплекса.

5.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT – анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Он проводится в несколько этапов.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Результаты первого этапа SWOT – анализа представляем в виде табличной формы.

Таблица 21 – матрица SWOT для программного комплекса RastrWin

	Сильные стороны проекта: С1: Широкая элементная база С2: Большие функциональные возможности С3: Низкие требования к ПК	Слабые стороны проекта: Сл1: Низкий уровень использования авторитетными источниками Сл2: Высокая стоимость полной версии программного комплекса
Возможности проекта В1: Унификация элементной базы В2: Комплексный подход к моделированию		
Угрозы проекта У1. Недостаток функциональных возможностей студенческой версии У2. Возможное прекращение обновлений программного комплекса		

Переходим к реализации второго этапа.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Возможно использование этой матрицы в качестве одной из основ для оценки вариантов стратегического выбора. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 22 – Интерактивная матрица сильных, слабых сторон и возможностей проекта.

Сильные стороны проекта				
Возможности проекта		C1	C2	C3
	B1	+	+	+
	B2	+	+	–
Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		СЛ1	Сл2	
	B1	+	-	
	B2	+	-	

Таблица 23 – Интерактивная матрица сильных, слабых сторон и угроз проекта.

Сильные стороны проекта				
Угрозы проекта		C1	C2	C3
	У1	+	+	-
	У2	+	+	-
Слабые стороны проекта				
Угрозы проекта		СЛ1	Сл2	
	У1	+	-	
	У2	+	0	

Анализ интерактивных таблиц представляется в форме записи сильно коррелирующих сильных сторон и возможностей, или слабых сторон и возможностей и т.д.

В рамках третьего этапа должна быть составлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая учитывает сочетание возможностей с сочетанием (корреляцией) сильных сторон.

Таблица 24 – матрица SWOT для программного комплекса RastrWin

	Сильные стороны проекта: С1: Широкая элементная база С2: Большие функциональные возможности С3: Низкие требования к ПК	Слабые стороны проекта: Сл1: Низкий уровень использования авторитетными источниками Сл2: Высокая стоимость полной версии программного комплекса
Возможности проекта В1: Унификация элементной базы В2: Комплексный подход к моделированию	В1В2С1С2 В1С3	В1В2Сл1
Угрозы проекта У1. Недостаток функциональных возможностей студенческой версии У2. Возможное прекращение обновлений программного комплекса	У1У2С1С2	У1У2Сл1

Аналогично выполняем построение SWOT матрицы для двух других вариантов.

Таблица 25 – Итоговая матрица SWOT для программного комплекса MUSTANG

	Сильные стороны проекта: С1: Простота интерфейса программного комплекса коротком замыкании С2: Низкие требования к ПК С3: Бесплатное распространение	Слабые стороны проекта: Сл1: Актуальность версии программного обеспечения Сл2: Низкие функциональные возможности
Возможности проекта В1: Упрощение расчётов В2: Унификация элементной базы	В1С2С3 В2С1С3	В1Сл2

Таблица 25 – Продолжение

Угрозы проекта У1. Большие допущения в процессе моделирования У2. Недостоверные результаты расчётов	У2С3	У1У2Сл1Сл2
--	------	------------

Таблица 26 – Итоговая матрица SWOT для программного комплекса EUROSTAG

	Сильные стороны проекта: С1: Широкая элементная база С2: Большие функциональные возможности С3: Высокий уровень использования авторитетными источниками	Слабые стороны проекта: Сл1: Высокая стоимость полной версии программного комплекса Сл2: Высокие требования к ПК
Возможности проекта В1: Унификация элементной базы В2: Комплексный подход к моделированию	В1В2С2С3	В1В2Сл1Сл2
Угрозы проекта У1. Отсутствие бесплатной версии программы У2. Сложный интерфейс программного комплекса	У1С1С2С3	У1Сл1 У2Сл2

По результатам SWOT – анализа видно, что для научных исследований с использованием программного комплекса RastrWin существует достаточно сильное соответствие между возможностями и сильными сторонами, что говорит о перспективности ведения разработок в данном направлении. Так, например, высокие функциональные возможности и обширная элементная база позволят разрабатывать комплексные методы исследований и унифицировать производимые расчёты. Данные преимущества очень хорошо

сочетаются с низкими требованиями для ПК и наличием студенческой версии программы.

Также следует отметить и то, что для программного комплекса MUSTANG можно отследить чёткое соответствие угроз и слабых сторон. Такие слабые стороны, как низкие функциональные возможности и неактуальная версия программного обеспечения будет способствовать к погрешностям результатов исследований из-за принятия серьёзных допущений при моделировании.

SWOT-анализ программного комплекса EUROSTAG показал весомые риски в случае его использования для научных исследований. Функциональные возможности бесплатной версии программного обеспечения небольшие, следовательно для проведения достоверных экспериментов необходимо приобрести полную версию, что в свою очередь увеличит финансовые затраты на проведение исследований.

5.4 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

Воспользуемся морфологическим подходом, который основан на систематическом исследовании всех теоретически возможных вариантов, вытекающих из закономерностей строения (морфологии) объекта исследования. Синтез охватывает как известные, так и новые, необычные варианты, которые при простом переборе могли быть упущены. Путем комбинирования вариантов получают большое количество различных решений, ряд которых представляет практический интерес.

Реализация метода предусматривает следующие этапы.

1. Точная формулировка проблемы исследования.

В нашем случае проблемой исследования является различные функциональные возможности программных комплексов. Так, например, на разных этапах моделирования целесообразнее использовать разные программные комплексы.

2. Раскрытие всех важных морфологических характеристик объекта исследования.

В качестве морфологических характеристик рассмотрим:

- Расчёт установившегося режима с учётом влияния статических характеристик нагрузки
- Расчёт сопротивлений шунта короткого замыкания
- Расчёт электромеханических переходных процессов двигательной нагрузки

3. Раскрытие возможных вариантов по каждой характеристике.

На этом этапе составляем морфологическую матрицу.

Таблица 27 – Морфологическая матрица для схем тупиковых подстанций

	1	2	3
	RastrWin	MUSTANG	EUROSTAG
А: Расчёт установившегося режима	+	+	+
Б: Расчёт сопротивления шунта короткого замыкания	+	–	–
В: Расчёт электромеханических переходных процессов	+	+	+

4. Выбор наиболее желательных функционально конкретных решений.

На этом этапе описываются возможные варианты решения поставленной проблемы с позиции ее функционального содержания и ресурсосбережения.

Для данной матрицы это могут быть следующие варианты:

1)A1B1C1

2)A3B1B3

3)A2B1B1

5.5 Структура работы в рамках научного исследования

В данном разделе составляем перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, проводим распределение исполнителей по видам работ. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 28.

Таблица 28 – Перечень этапов работ при проектировании

№ п/п	Содержание работ	Должность исполнителя
1	Составление технического задания	Руководитель
2	Изучение схемы электроснабжения промышленного предприятия	Инженер
3	Составление схемы замещения и систематизация исходных данных	Инженер
4	Моделирование установившегося режима без учёта СХН	Инженер
5	Изучение расчётных методов получения статических характеристик нагрузки	Инженер
6	Расчёт статических характеристик нагрузки по напряжению для асинхронного и синхронного двигателя	Инженер
7	Моделирование установившегося режима с учётом СХН	Инженер
8	Моделирование электромеханических переходных процессов	Инженер
9	Обработка результатов и написание выводов исследований	Инженер
10	Оформление пояснительной записки	Инженер
11	Проверка работы	Руководитель
12	Сдача выпускной квалификационной работы	Инженер

Таким образом, проект, итогом которого является анализ устойчивости двигательной нагрузки промышленного предприятия с учётом влияния статических характеристик, состоит из 12 этапов, 10 из которых будет выполнять непосредственно студент–бакалавр. Весь процесс научно-технического исследования условно можно разделить на четыре больших этапа: изучение литературы и схемы электроснабжения, получение статических характеристик двигательной нагрузки, моделирование

электромеханических переходных процессов и интерпретация результатов, оформление пояснительной записки выпускной квалификационной работы.

5.6 Определение трудоёмкости выполнения проектировочных работ и разработка графика проведения научного исследования

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ож_i}$ используется следующая формула:

$$t_{ож_i} = \frac{3 \cdot t_{min_i} + 2 \cdot t_{max_i}}{5};$$

где:

$t_{ож_i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

t_{min} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

t_{max_i} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Пример для работы №1:

$$t_{ож_1} = \frac{3 \cdot t_{min_1} + 2 \cdot t_{max_1}}{5} = \frac{3 \cdot 3 + 2 \cdot 5}{5} = 3,8 \text{ чел. – дн.};$$

Исходя из ожидаемой трудоёмкости определяется, продолжительность каждой работы в рабочих днях, учитывая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями, по следующей формуле:

$$T_{pi} = \frac{t_{ож_i}}{q_i},$$

где:

T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ож_i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

Ч_i – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

В нашем случае работа выполняется в индивидуальном порядке, соответственно продолжительность каждой работы будет равна: $T_{pi} = t_{oji} \dots$

Наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}};$$

где:

T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где:

$T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Определим коэффициент календарности на 2016 год:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{366}{366 - 119} = 1,482.$$

Тогда длительность первой работы в календарных днях:

$$T_{k1} = T_{p1} \cdot k_{\text{кал}} = 3,8 \cdot 1,482 = 6,7 \text{ дн.}$$

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе округляем до целого числа.

Все рассчитанные значения сводим в таблицу 29.

Таблица 29 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ			Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{ож}$, чел-дни		
Составление технического задания	3	5	3	4,52	7
Изучение схемы электроснабжения промышленного предприятия	2	3	2	2,76	4
Составление схемы замещения и систематизация исходных данных	10	12	5	5,76	9
Моделирование установившегося режима без учёта СХН	11	13	6	6,76	10
Изучение расчётных методов получения статических характеристик нагрузки	9	11	4	4,76	7
Расчёт статических характеристик нагрузки по напряжению для асинхронного и синхронного двигателя	6	7	4	4,76	7
Моделирование установившегося режима с учётом СХН	5	6	5	5,76	9
Моделирование электромеханических переходных процессов	5	6	5	5,76	9
Обработка результатов и написание выводов исследований	12	14	6	6,76	10

Таблица 29 – Продолжение

Оформление пояснительной записки	2	3	2	2,76	4
Проверка работы	1	2	1	1.76	3
Итого				52.12	77

На основании таблицы 29 строится календарный план–график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научного исследования с разбивкой на месяцы, декады.

Таблица 30 – Календарный план-график

№	Вид работ	Ткi, кал. дней	Продолжительность выполнения работ								
			февраль		март			апрель			май
			2	3	1	2	3	1	2	3	1
1	Составление технического задания	2									
2	Изучение схемы электроснабжения промышленного предприятия	15									
3	Составление схемы замещения и систематизация исходных данных	6									
4	Моделирование установившегося режима без учёта СХН	2									
5	Изучение расчётных методов получения статических характеристик нагрузки	2									
6	Расчёт статических характеристик нагрузки по напряжению для асинхронного и синхронного двигателя	3									
7	Моделирование установившегося режима с учётом СХН	15									
8	Моделирование электромеханических переходных процессов	7									
9	Обработка результатов и написание выводов исследований	3									
10	Оформление пояснительной записки	2									
11	Проверка работы	3									
12	Сдача выпускной квалификационной работы	5									

5.7 Расчет материальных затрат возможных вариантов реализации конкурентных технических решений

Расчёт материальных затрат осуществляется по формуле:

$$З_{\text{м}} = (1 + k_{\text{НДС}}) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_i;$$

где:

$k_{\text{НДС}}$ – коэффициент, учитывающий налог добавочной стоимости НДС, принимаются в пределах 16-18% от стоимости программного обеспечения;

m – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования;

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов;

N_i – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования.

Для проведения НТИ при использовании программного комплекса RastrWin достаточно функциональных возможностей студенческой лицензии, поэтому затраты на лицензионный пакет данного программного обеспечения принимаются равными 0 руб. Однако, демо–версии программного комплекса программного комплекса EUROSTAG не достаточно для проведения исследований.

Программный комплекс MUSTANG распространяется бесплатно, поэтому затраты на лицензионный пакет данного программного обеспечения принимаются равными 0 руб.

Таблица 31 – Материальные затраты вариантов конкурентных технических решений

Наименование программного комплекса	Ед. измерения	Количество	Затраты на ед. измер. (руб.)
RastrWin	Лицензионный пакет, шт.	1	0
MUSTANG	Лицензионный пакет, шт.	1	0
EUROSTAG	Лицензионный пакет, шт.	1	1830500

Величина коэффициента $k_{\text{НДС}}$ принимаются в пределах 16-18% от стоимости оборудования.

Величина основных материальных затрат, возможных конкурентных технических решений определяется как:

$$Z_{\text{M(RastrWin3)}} = (1 + k_{\text{НДС}}) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_i = (1 + 0,18) \cdot 0 \cdot 1 = 0 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{M(MUSTANG)}} = (1 + k_{\text{НДС}}) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_i = (1 + 0,18) \cdot 0 \cdot 1 = 0 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{M(EUROSTAG)}} = (1 + k_{\text{НДС}}) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_i = (1 + 0,18) \cdot 1830500 \cdot 1 = 2159990 \text{ руб.}$$

5.8 Основная заработная плата исполнителей

Заработная плата инженера-проектировщика определяется как:

$$Z_{\text{П}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}};$$

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, составляет $0,15 \cdot Z_{\text{осн}}$;

$Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата.

Размер основной заработной платы определяется по формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}};$$

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата;

$T_{\text{р}}$ – суммарная продолжительность работ, выполняемая научно-техническим работником.

Размер среднедневной заработной платы рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}};$$

$Z_{\text{м}}$ – месячный оклад научно-технического работника;

M – количество месяцев работы без отпуска ($M = 11,2$ для пятидневной рабочей недели и отпуска в 24 рабочих дней);

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд научно технического персонала (определяется за вычетом выходных, праздничных и больничных дней).

Месячный оклад научно-технического работника определяется по формуле:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{ТС}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}};$$

$Z_{\text{ТС}}$ – заработная плата по тарифной ставке;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 30%;

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок, составляет примерно 20%;

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, для Томска равен 1,3.

Размер заработной платы по тарифной ставке определяется по формуле:

$$Z_{\text{ТС}} = T_{\text{ci}} \cdot k_{\text{Т}};$$

T_{ci} – тарифная ставка работника (принимается равной тарифной ставке работника первого разряда т.е. $T_{\text{ci}} = 4330 \text{ руб.}$);

$k_{\text{Т}}$ – тарифный коэффициент в зависимости от разряда (для шестого разряда $k_{\text{Т}} = 1,407$).

С помощью представленных выше формул находим основную заработную плату:

$$Z_{TC} = T_{ci} \cdot k_T = 4330 \cdot 1,407 = 6092 \text{ руб};$$

$$Z_M = Z_{TC} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p = 6092 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 11879 \text{ руб};$$

$$Z_{дн} = \frac{Z_M \cdot M}{F_d} = \frac{11879 \cdot 11,2}{366 - 119 - 24} = 596,6 \text{ руб};$$

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p = 596,6 \cdot 45,44 = 27110 \text{ руб};$$

$$Z_{П} = Z_{осн} + Z_{доп} = Z_{осн} + 0,15 \cdot Z_{осн} = 29688 + 0,15 \cdot 29688 = 31177 \text{ руб};$$

Расчёт основной заработной платы руководителя происходит на основании отраслевой системы оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор.

2) стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) иные выплаты; районный коэффициент.

Доцент, ктн, работающий в ТПУ имеет оклад равный 22052 рубля. С учётом этого, рассчитаем размер основной заработной платы руководителя НТИ.

$$Z_{осн} = (1 + k_d + k_{прем}) \cdot Z_M \cdot k_p \cdot \frac{T_p}{30} = (1 + 0,3 + 0,25) \cdot 22052 \cdot 1,3 \cdot \frac{6,28}{30} = 9301,68 \text{ руб};$$

5.9 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ)

и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп});$$

$k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2014 г. в соответствии с Федеральным закона от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1 %.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 32.

Таблица 32 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата
Инженер-проектировщик	27110	4066,5
Руководитель	9302	1395,3
Коэффициент отчислений	0,271	
Итого	$З_{внеб} = 0,271 \cdot (27110 + 4066,5 + 9302 + 1395,3) =$ $= 11347,8 \text{руб.}$	

5.10 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и

телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1-3) \cdot k_{\text{нр}};$$

Сумма статей - сумма затрат из пунктов 8 – 9.

$k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

Тогда накладные расходы возможных вариантов конкурентных технических решений НТИ можно рассчитать как:

$$З_{\text{накл(RastrWin)}} = (41873,8 + 11347,8 + 0) \cdot 0,16 = 8515,5 \text{ руб.};$$

$$З_{\text{накл(MUSTANG)}} = (41873,8 + 11347,8 + 0) \cdot 0,16 = 8515,5 \text{ руб.};$$

$$З_{\text{накл(EUROSTAG)}} = (41873,8 + 11347,8 + 2159990) \cdot 0,16 = 354113,9 \text{ руб.}$$

5.11 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на проведение НТИ конкурентных вариантов технических решений приведены в таблицах 33–34.

Таблица 33 – Расчёт бюджета затрат НТИ при использовании программных комплексов RastrWin и MUSTANG

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
Расчёт затрат на заработную плату инженера-проектировщика	31177	Пункт 7
Расчет материальных затрат возможных вариантов реализации конкурентных технических решений	0	Пункт 8

Таблица 33 – Продолжение

Расчёт затрат на заработную плату руководителя	10697,3	Пункт 9
Расчёт затрат на отчисления во внебюджетные фонды	11347,8	Пункт 10
Расчёт накладных расходов	8515,5	Пункт 11
Бюджет затрат НТИ	30560,6	Сумма пунктов 7-11

Таблица 34 – Расчёт бюджета затрат НТИ при использовании программного комплекса EUROSTAG

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
Расчёт затрат на заработную плату инженера-проектировщика	31177	Пункт 7
Расчет материальных затрат возможных вариантов реализации конкурентных технических решений	2159990	Пункт 8
Расчёт затрат на заработную плату руководителя	10697,3	Пункт 9
Расчёт затрат на отчисления во внебюджетные фонды	11347,8	Пункт 10
Расчёт накладных расходов	354113,9	Пункт 11
Бюджет затрат НТИ	2567326	Сумма пунктов 7-11

5.12 Определение ресурсоэффективности проекта

Финансовую эффективность проекта можно оценить при помощи интегрального финансового показателя:

$$I_{\text{фин}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где:

$I_{\text{фин}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Расчёт интегрального финансового показателя проводим в виде табличной формы.

Таблица 35 – Расчёт интегрального финансового показателя конкурентных технических решений

Программный комплекс	Φ_{max} , руб.	Φ_{pi} , руб.	$I_{\text{фин}}^{\text{исп.}i}$, о.е.
RastrWin	2567326	30560,6	0,012
MUSTANG		30560,6	0,012
EUROSTAG		2567326	1

Величина интегрального финансового показателя проведения НТИ при использовании программных комплексов RastrWin и MUSTANG отражает соответствующее численное удешевление стоимости проводимых исследований. Научно–технические исследования, проводимые при использовании программного комплекса RastrWin, наравне с программным комплексом MUSTANG, имеют наименьший интегральный финансовый показатель.

Определение ресурсоэффективности проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где: I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

b_i – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

По результатам анализа оценочной карты, QUAD и SWOT анализов и интегрального финансового показателя можно сделать вывод о том, что наиболее перспективным вариантом является проведение научно–технических исследований при помощи программного комплекса RastrWin.

Расчёт интегрального показателя ресурсоэффективности этого варианта проведения исследований целесообразно провести в табличной форме.

Таблица 36 – Определение интегрального показателя ресурсоэффективности наиболее перспективного варианта исследований

Критерии	Весовой коэффициент	RastrWin	MUSTANG	EUROSTAG
1. Достоверность результатов	0,25	4	2	4
2. Наличие широкой элементной базы	0,25	5	2	5
3. Функциональный потенциал	0,15	5	2	5
4. Удобство интерфейса	0,10	5	3	3
5. Актуальность версии программного комплекса	0,10	5	1	4
6. Материальные затраты	0,15	4	5	3
Итого:	1,00	28	15	24
Показатель ресурсоэффективности	–	4,6	2,45	4,15

Пример расчёта показателя ресурсоэффективности для программного комплекса RastrWin:

$$I_p = 0,25 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 = 4,6.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального финансового показателя и интегрального показателя ресурсоэффективности по формуле:

$$I_{\text{исп}(i)} = \frac{I_{\text{рес}}^{\text{исп.}i}}{I_{\text{фин}}^{\text{исп.}i}};$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{\text{ср}}$):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп}(i)}}{I_{\text{исп}^*}};$$

Таблица 37 – Сравнительная эффективность вариантов разработки

№	Показатели	RastrWin	MUSTANG	EUROSTAG
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,012	0,012	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,6	2,45	4,15
3	Интегральный показатель эффективности	383,3	20,4	4,15
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,05	0,11

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в бакалаврской работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности. Наиболее финансово и ресурсоэффективным вариантом по итогам сравнения является программный комплекс RastrWin.

В ходе рассмотрения оценочной карты и проведенных Quad и SWOT – анализов видно, что рассмотренные варианты таких программных комплексов, как RastrWin и EUROSTAG имеют незначительные отличия. Однако, программный комплекс MUSTANG значительно хуже предыдущих вариантов. Это, прежде всего, связано с неактуальной версией программного обеспечения, узкой элементной базой и низкими функциональными возможностями данного программного комплекса.

SWOT – анализ показал, что для научных исследований с использованием программного комплекса RastrWin существует достаточно сильное соответствие между возможностями и сильными сторонами, что говорит о перспективности ведения разработок в данном направлении. Высокие функциональные возможности и обширная элементная база RastrWin позволят разрабатывать комплексные методы исследований и унифицировать производимые расчёты. Данные преимущества очень хорошо сочетаются с низкими требованиями для ПК и наличием студенческой версии программы.

SWOT–анализ программного комплекса EUROSTAG показал весомые риски в случае его использования для научных исследований. Функциональные возможности бесплатной версии программного обеспечения небольшие, следовательно для проведения достоверных экспериментов необходимо приобрести полную версию, что в свою очередь увеличит финансовые затраты на проведение исследований.

В ходе анализа конкурентных технических решений на основе оценочной карты, QUAD и SWOT анализов к рассмотрению был выбран программный комплекс RastrWin.

Для анализа финансовой эффективности трёх вариантов конкурентно-технических решений были рассчитаны затраты на проведение НТИ. В расчёт величин затрат научно-исследовательской работы вошли следующие статьи: заработная плата инженера-проектировщика и руководителя, расчет материальных затрат возможных вариантов реализации конкурентных технических решений, затраты на отчисления во внебюджетные фонды, а также накладные расходы. Суммарный бюджет наиболее финансово эффективного научного технического исследования составил 30560,6руб.

Низкие функциональные возможности и узкая элементная база программного комплекса MUSTANG ограничивают область его использования и, следовательно, применение программного комплекса RastrWin является наиболее финансово и ресурсоэффективным, что является определяющим критерием проведения НТИ.

РАЗДЕЛ 6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ НОРМАТИВНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА В РЕМОНТНО-МЕХАНИЧЕСКОМ ЦЕХЕ

Целью разработки настоящего раздела является принятие проектных решений при проектировании системы электроснабжения ремонтно-механического цеха, исключающих несчастные случаи и профессиональные заболевания, обеспечение снижения вредных воздействий на окружающую среду, безопасность в чрезвычайных ситуациях и экономное расходование ресурсов.

Рассмотрение данных вопросов отвечает требованиям международного стандарта ICCSR-26000:2011 к деятельности организаций в области социальной ответственности по тем разделам его модулей, по которым должны быть приняты указанные проектные решения.

Согласно указанному стандарту организация, с учетом специфики области деятельности, в которой она работает, должна:

- обеспечить безопасные условия труда и предпринимать соответствующие меры путем сокращения, в возможных пределах, факторов опасности, характерных для этой деятельности, и предотвращения несчастных случаев и ущерба здоровью, которые могут быть следствием выполняемой работы или произойти в процессе ее выполнения;
- предоставлять персоналу, включая новый персонал, регулярное и документируемое обучение по технике безопасности и охране труда;
- организовывать системы, позволяющие обнаруживать и предотвращать потенциальные угрозы здоровью и безопасности всего персонала;

- предоставлять всему персоналу для использования чистые туалетные комнаты, доступ к питьевой воде, а также создавать необходимые санитарные условия для хранения продовольствия

- обеспечивать чистоту и безопасность предоставляемых персоналу мест отдыха, а также их соответствие основным потребностям персонала.

Для предотвращения вредных воздействий на окружающую среду организация должна:

- разрабатывать, производить или поставлять продукцию или услуги, обеспечивающие отсутствие вредных воздействий на окружающую среду;

- использовать процессы, инфраструктуру и расходуемые ресурсы, направленные на предотвращение недопустимых вредных воздействий на окружающую среду, в том числе, на сельское хозяйство;

- использовать и поддерживать в рабочем состоянии методы и средства для обнаружения возможности возникновения вследствие собственной деятельности техногенных катастроф и аварийных ситуаций и для реагирования на них.

6.1 Обеспечение защиты от вредных производственных факторов

В процессе работы необходимо учитывать наличие и возможность воздействия следующих вредных производственных факторов:

1. Потенциальные отклонения параметров микроклимата от санитарно-гигиенических требований к воздуху рабочей зоны;
2. Возможное ненормативное освещение;
3. Ненормативные вибрации и шум;

4. Потенциальное превышение нормативных параметров воздействия электромагнитного поля.

6.1.1 Требования к микроклимату

Показателями, характеризующими микроклимат, являются:

- температура воздуха;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- интенсивность теплового излучения.

По ГОСТ 12.1.005 – 88 необходимо поддерживать оптимальные параметры микроклимата, обеспечивающие наибольшую вероятность сохранения здоровья и наибольшую производительность труда.

Таблица 38 – Нормы температуры, относительной влажности, скорости движения воздуха в рабочей зоне

Сезон года	Категория работ	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Средней тяжести	18-20	40 – 60	0,3
Тёплый	Средней тяжести	21-23	40 – 60	0,2 – 0,6

Для обеспечения нормального микроклимата предусматривается, в соответствии с СанПиН 2.2.4.548 – 96(1), следующее:

- вентиляция приточно-вытяжная по СНиП 2.04.05 – 91* (28.11.91) установка центробежных вентиляторов. Кратность воздухообмена 1;
- установка систем воздушного отопления, совмещённых с вентиляцией;
- герметизация технологического оборудования.

Предусмотренные мероприятия обеспечивают параметры микроклимата в соответствии с нормами, представленными в таблице 38.

6.1.2 Требования к освещению

Рациональное освещение обеспечивает высокую производительность трудового процесса и качество работ, исключает возникновение дефектов зрения (спазм аккомодации, ложная близорукость и дальновзоркость), травматизм, составляющий (из-за ненормативной освещенности) 30 – 50% всех несчастных случаев на производстве.

В производственном процессе используются три вида освещения:

- естественное;
- искусственное;
- совмещённое;

При недостатке естественного освещения нарушается обмен веществ и резистентность организма, поэтому используются газоразрядные источники, близкие по спектру к естественному освещению.

Источники искусственного освещения: лампы накаливания, газоразрядные лампы низкого (люминесцентные) и высокого (ДРЛ) давления.

Существуют системы общего освещения (светильники, распределяющиеся равномерно по площади освещения), локализованные (для освещения оборудования и рабочих мест), местные (освещение рабочей поверхности) и комбинированные.

Светильники – источники света, заключенные в арматуру – для перераспределения светового потока в нужном направлении, защиты глаз от чрезмерной яркости, для защиты источника света от механических воздействий, дыма и копоти.

Нормы освещенности определяются основными критериями к зрительной работе: размер различаемого объекта (буквы, ширина рисунка, отражение фона, контраст между объектом и фоном).

На основании этих критериев разработаны требования к искусственному, естественному, и совмещенному освещению производственных помещений [4], нормы освещенности и коэффициентов естественного освещения (КЕО) представлены в таблицах 39–41.

Таблица 39 – Нормы освещённости искусственного освещения

Цех	Лампы накаливания		Коэфф. запаса	Люминисцентные лампы		Коэфф. запаса
	Освещенность,лк			Освещенность,лк		
	Комбинированное освещение			Комбинированное освещение		
	Общее и местное	Общее		Общее и местное	Общее	
Механический цех	1500	150	1,3	2000	200	1,5

Таблица 40 – Нормы КЕО для естественного освещения

Цех	Характеристика зрительной работы	Разряд зрительной работы	Коэффициент естественного освещения (КЕО, %)	
			При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении
Ремонтно-механический	Работы средней точности	4	4	1,5

Таблица 41 – Нормы КЕО для совмещенного освещения

Цех	Характеристика зрительной работы	Разряд зрительной работы	Коэффициент естественного освещения (КЕО, %)	
			При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении
Ремонтно-механический	Работы средней точности	4	2,4	0,9

Аварийное освещение с наименьшей освещённостью рабочих мест при аварийном режиме 2 лк, эвакуационное освещение освещённостью при эвакуации людей из помещений не менее 0,5 лк на уровне пола основных проходов и лестниц, а на открытых территориях – не менее 0,2 лк.

6.1.3 Шум и вибрация

Шум — один из наиболее распространенных неблагоприятных факторов производственной среды. Основные производственные процессы, сопровождающиеся шумом, — это работа насосов, вентиляторов и т.д. Говоря о действии шума на организм, следует иметь в виду, что он оказывает как местное, так и общее воздействие. При этом учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, изменяются двигательная и секреторная функции желудка и других органов. Неблагоприятно отражается шум на нервной системе, вызывая головные боли, бессонницу, ослабление внимания, замедление психических реакций, что, в конечном счете, приводит к понижению работоспособности.

Шум определяется следующими основными параметрами:

- уровень звукового давления A , дБ;
- интенсивность звука I , Вт/м²;
- уровень звука L , дБА.

Таблица 42 – Допустимые уровни звукового давления, уровни звука на рабочих местах

Рабочие места	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровн и звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Постоянные рабочие места в производственных помещениях и на территории предприятия	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

Для защиты от шума по СанПиН 2.2.4/2.1.8.562 – 96 предусматривается обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты.

по ГОСТ 12.4.011 – 89 предусматривается:

- установка звукоизолирующих кабин;
- звукоизолирующие кожухи и экраны;
- виброизолирующие материалы под оборудование (пружины, резины и другие прокладочные материалы).

Гигиеническое нормирование вибраций регламентирует параметры производственной вибрации и правила работы с виброопасными механизмами и оборудованием, ГОСТ 12.1.012 – 90 «ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования», Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.556 – 96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий».

Вибрация определяется следующими основными параметрами:

- частота f , Гц;
- амплитуда колебаний d , мм.

Вибрацию можно наблюдать при работе любого оборудования, во время прохождения транспорта, при КЗ большие токи вызывают динамическую нагрузку.

Таблица 43 – Гигиенические нормы вибрации

Вид вибрации	Допустимый уровень вибростойкости, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц					
	2	4	8	16	31,5	63
Технологическая	108	99	93	92	92	92

Защита от вибраций должна начинаться, прежде всего, с их ликвидации.

Коллективные методы защиты:

- улучшение работы механизмов
- применение амортизаторов (резиновых, пружинных, пневматических)
- использование виброгасящего основания под соответствующее оборудование

Средства индивидуальной защиты: специальные рукавицы, перчатки, виброзащитные прокладки и обувь.

6.1.4 Воздействие ЭМП

Нормирование ЭМП промышленной частоты осуществляют по предельно допустимым уровням напряженности электрического и магнитного полей частотой 50 Гц в зависимости от времени пребывания в нем и регламентируются ГОСТ 12.1.002 – 84 «Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах» и СанПиН 2.2.4.723 –98.

Источниками электромагнитных полей являются ВЛЭП, включающие коммутационные аппараты, устройства защиты и автоматики. В настоящее время в качестве предельно допустимого значения электромагнитного поля промышленной частоты напряженностью рекомендовано:

Основные параметры ЭМП:

- частота f , Гц;
- напряженность электрического поля E , В/м;
- напряженность магнитного поля H , А/м;
- плотность потока энергии I , Вт/м².

Предельно допустимые напряженности электрического и магнитного полей на рабочих местах в ремонтно-механическом цехе соответственно равны 500 В/м и 50 А/м. Предельно допустимое значение плотности потока энергии не должно превышать 10 Вт/м². На территории открытых распределительных устройств (ОРУ), рабочих местах в цеховых трансформаторных подстанциях и при обслуживании высоковольтной двигательной нагрузки предельно допустимая напряжённость электрического поля составляет 5 кВ/м.

В электроустановках всех напряжений должна быть установлена защита рабочих от воздействия электромагнитного поля, напряженность которого превышает допустимое значение 5 кВ/м, т.е. необходимо ограничить время пребывания следующим образом:

- 5 ÷ 10 кВ/м – не более 2х часов;
- 10 ÷ 15 кВ/м – 90 мин;
- 15 ÷ 20 кВ/м – 10 мин;
- 20 ÷ 25 кВ/м – 5 мин;
- 25 кВ/м и более – без защиты не допускается.

При напряженности электрического поля на рабочих местах выше 5 кВ/м необходимо применять следующие средства защиты:

- экранирование или удаление рабочего места от источника ЭМП
- применение средств индивидуальной защиты (специальная одежда, выполненная из металлизированной ткани, защитные очки, специальные каски и шлемы)
- рациональное размещение оборудования, излучающего электромагнитную энергию.

6.2 Защита от опасных производственных факторов

6.2.1 Загорание (Пожар)

Пожары – неконтролируемый процесс горения, которые чреваты большими материальными издержками, а часто и человеческими жертвами.

Обеспечение пожаробезопасности начинается с определения класса взрывоопасной зоны или класса пожароопасной зоны данного производственного помещения. Согласно классификации производств по пожарной опасности (ППБ-03) рассматриваемый цех относится к классу В (производства, связанные с обработкой или применением твердых сгораемых веществ и материалов). Цех имеет пожароопасную зону класса П-Па. Минимальная допустимая степень защиты оболочек электрических машин для данной пожароопасной зоны обозначается IP44. Использование данной степени защиты – одно из направлений профилактики, оно должно быть установлено на объектах, где воздействие опасных факторов пожара может привести к травматизму или гибели людей, этого требует «технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

Цех оснащен такой системой с дымовыми извещателями. Сигналы извещателей включают систему протоколирования информации, формируют управляющую систему тревоги и систему оповещения о пожаре, для своевременной эвакуации людей. Это другое направление профилактики загораний.

Выбор типа и расчет необходимого числа огнетушителей производится в зависимости от их огнетушащей способности. Из пяти таких классов цеху подходит класс А (пожар твердых веществ) и класс Е (горение электроустановок). Согласно [17] на 800 м² защищаемой площади

рекомендуется использовать восемь двухкилограммовых порошковых огнетушителей.

6.2.2. Электропоражение

Электропоражение персонала, работающего с электроустановками, является опасным для жизни человека и наступает при соприкосновении его с сетью не менее чем в двух точках.

Виды воздействий электрического тока на организм человека:

- термическое воздействие тока проявляется в ожогах, нагреве кровеносных сосудов, сердца, мозга и других органов, находящихся на пути протекания тока, до критической температуры;
- электролитическое действие тока выражается в разложении крови, что нарушает ее состав и функции;
- механическое действие тока проявляется в значительном давлении в кровеносных сосудах и мышечных тканях;
- биологическое действие тока проявляется в раздражении живых тканей, что вызывает реакцию организма – возбуждение, что и обуславливает непроизвольное сокращение мышц.

При наиболее неблагоприятном исходе воздействие электрического тока может привести к смерти человека.

опасного для жизни человека потенциала.

В нашем случае, ремонтно-механический цех можно приравнять к помещению с повышенной опасностью, так как выполняется следующее условие, создающее повышенную опасность, – возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и

т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой.

Для защиты от прямого прикосновения к токоведущим частям, согласно [17] п.412. служат изоляция токоведущих частей, применение ограждений и оболочек, установка барьеров, размещение вне зоны досягаемости, устройства защитного отключения (УЗО).

Для защиты от косвенного прикосновения применяются: УЗО и защитное заземление и зануление [17] п.413.

Для предотвращения от поражения электрическим током при прикосновении к корпусам электроустановок, находящихся под напряжением при пробое изоляции или в других случаях, необходимо рассчитать и установить защитное заземление.

Также необходимо применение основных коллективных способов и средств электрозащиты: изоляция проводов и её непрерывный контроль; предупредительная сигнализация и блокировка; использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов.

Должны быть предусмотрены индивидуальные электрозащитные средства. В установках до 1000 В используются диэлектрические перчатки, указатели напряжения, диэлектрические коврики и боты, изолирующие подставки, а также инструмент с изолированными рукоятками.

6.3 Защита окружающей среды

Производственная деятельность в ремонтно-механическом цехе сопряжена с образованием твердых отходов.

При обращении с твердыми отходами: металлическая стружка, полимерные материалы, дефектные детали, бытовой мусор отработанные люминесцентные лампы; комплектующие и запчасти, утратившие в

результате износа потребительские свойства – надлежит руководствоваться Постановлением Администрации г. Томска от 11.11.2009 г. №1110 (с изменениями от 24.12.2014) [17]: бытовой мусор после предварительной сортировки складировать в специальные контейнеры для бытового мусора (затем специализированные службы вывозят мусор на городскую свалку). Отработанные люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 №681 [17]. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Ртуть люминесцентных ламп способна к активной воздушной и водной миграции. Интоксикация возможна только в случае разгерметизации колбы, поэтому основным требованием экологической безопасности является сохранность целостности отработанных ртутьсодержащих ламп. Отработанные газоразрядные лампы помещают в защитную упаковку, предотвращающую повреждение стеклянной колбы, и передают специализированной организации для обезвреживания и переработки. В случае боя ртутьсодержащих ламп осколки собирают щеткой или скребком в герметичный металлический контейнер с плотно закрывающейся крышкой, заполненный раствором марганцевокислого калия. Поверхности, загрязненные боем лампы, необходимо обработать раствором марганцевокислого калия и смыть водой. Контейнер и его внутренняя поверхность должны быть изготовлены из неадсорбирующего ртуть материала (винипласта).

К сфере защиты ОС и рационального использования природных ресурсов относится и экономия ресурсов, в частности, энергетических. Реальным вкладом здесь может стать экономия электрической и тепловой

энергии. Во-первых, это улучшает экономические показатели деятельности предприятия (уменьшение расходов на электротепловую энергию). Во-вторых, экономия энергии означает уменьшение газа, мазута, угля, сжигаемого в топках котлов ТЭС и электроустановок (котельных) промпредприятий города Томска и области и одновременное уменьшение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

6.4 Предотвращение ЧС и устранение их последствий

Наиболее вероятные чрезвычайные ситуации в ремонтно-механическом цехе: возникновение пожара и электропоражение.

Основными причинами пожара могут быть: перегрузка проводов, короткое замыкание, большие переходные сопротивления в электрических цепях, электрическая дуга, искрение и неисправности оборудования.

Согласно [17], пожарная профилактика обеспечивается: системой предотвращения пожара; системой противопожарной защиты; организационно - техническими мероприятиями. К мерам предотвращения пожара относятся: применение средств защитного отключения возможных источников загорания (защитного зануления); применение искробезопасного оборудования; применение устройства молниезащиты здания; выполнение правил (инструкций) по пожарной безопасности.

К мерам противопожарной защиты относятся: применение пожарных извещателей; средств коллективной и индивидуальной защиты от факторов пожара; системы автоматической пожарной сигнализации; порошковых или углекислотных огнетушителей, два ящика с песком 0,5 м³.

Организационно-технические мероприятия: наглядная агитация и инструктаж работающих по пожарной безопасности; разработка схемы

действий администрации и работающих в случае пожара и организация эвакуации людей; организация внештатной пожарной дружины.

При обнаружении загорания рабочий немедленно сообщает по телефону 01 в пожарную охрану, сообщает руководителю, приступают к эвакуации людей и материальных ценностей. Тушение пожара организуется первичными средствами с момента обнаружения пожара. Пострадавшим при пожаре обеспечивается скорая медицинская помощь.

Современная система электробезопасности обеспечивает защиту от поражения в двух наиболее вероятных и опасных случаях:

- при прямом прикосновении к токоведущим частям электрооборудования;
- при косвенном прикосновении.

Под косвенным прикосновением понимается прикосновение человека к открытым проводящим частям оборудования, на которых в нормальном режиме (исправном состоянии) электроустановки отсутствует электрический потенциал, но при каких-либо неисправностях, вызвавших нарушение изоляции или ее пробой на корпус, на этих частях возможно появление опасного для жизни человека потенциала.

Для защиты от прямого прикосновения к токоведущим частям, согласно [17] п.412. служат изоляция токоведущих частей, применение ограждений и оболочек, установка барьеров, размещение вне зоны досягаемости, устройства защитного отключения (УЗО).

Для защиты от косвенного прикосновения применяются: защитное заземление и защитное зануление [17].

Даже если при электропоражении работающий внешне сохранил формат нормального самочувствия, он должен быть осмотрен врачом с заключением о состоянии здоровья, т.е. пострадавшему должна быть обеспечена скорая

медицинская помощь. Предварительно пострадавший должен быть освобожден от действия электрического тока. Если при этом отключить напряжение быстро невозможно, освобождение от электричества пострадавшего необходимо производить, изолировав себя диэлектрическими перчатками или галошами. При необходимости перерезать провода (каждый в отдельности) инструментом с изолированными ручками. Если есть необходимость (при потере сознания, остановке сердца и т.п.) оказания первой помощи, то до прибытия медработника необходимо начать делать: наружный массаж сердца, искусственное дыхание.

Для предотвращения от поражения электрическим током при прикосновении к корпусам электроустановок, находящихся под напряжением при пробое изоляции или в других случаях, необходимо установить защитное заземление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе проведено комплексное исследование статической и динамической устойчивости двигательной нагрузки, получающей питание от второй секции шин 6 кВ подстанции 35/6 кВ Сибкабель.

В разделе 1 представлены общие сведения и характеристика объекта исследования, включающая описание промышленного предприятия и исходные данные по электрооборудованию для схемы электроснабжения.

В разделе 2 описаны математические основы получения статических характеристик нагрузки по напряжению, получены статические характеристики нагрузки по напряжению для синхронного и асинхронного двигателей аналитическим методом.

В разделе 3 дано описание программного комплекса - инструмента для проведения экспериментов по исследованию статической и динамической устойчивости двигательной нагрузки.

В разделе 4 представлены теоретическое обоснование и порядок проведения экспериментов по исследованию статической и динамической устойчивости синхронных и асинхронных двигателей. В завершении раздела представлен комплексный анализ полученных в ходе экспериментов результатов, отражающих влияние статических характеристик нагрузки на результаты расчётов статической и динамической устойчивости, взаимного влияния двигателей, влияние режима выбега асинхронного двигателя на динамическую устойчивость синхронного двигателя.

В разделе 5 представлены оценка ресурсоэффективности и финансовой эффективности проводимого научно-технического исследования, а также

организация и планирование исследования, расчет затрат на проведение научно- технического исследования.

В разделе 6 рассмотрен анализ имеющих место на объекте опасных и вредных факторов, а также мер по ограничению их воздействия на персонал и окружающую среду.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. анализ способов представления двигательной нагрузки при расчётах переходных процессов показывает, что статические характеристики наиболее полно отражают поведение двигательной нагрузки при возникновении возмущений. На основании результатов аналитического эксперимента установлено, что в программном комплексе RastrWin статические характеристики нагрузки по напряжению для синхронного и асинхронного двигателей, получающих питание от шин 6 кВ ПС 35/6 кВ Сибкабель, могут быть учтены коэффициентами полиномов, взятыми из нижеприведенных выражений:

$$P_{\text{сд}} = S_{\text{баз}} \cdot (a_0 + a_1 \cdot U_* + a_2 \cdot U_*^2) = 378,4 \cdot (0,832 + 0 \cdot U_* + 0 \cdot U_*^2),$$

$$Q_{\text{сд}} = S_{\text{баз}} \cdot (b_0 + b_1 \cdot U_* + b_2 \cdot U_*^2) = 378,4 \cdot (-1,264 + 2,933 \cdot U_* - 1,177 \cdot U_*^2),$$

$$P_{\text{ад}} = S_{\text{баз}} \cdot (a_0 + a_1 \cdot U_* + a_2 \cdot U_*^2) = 378,5 \cdot (0,843 + 0 \cdot U_* + 0 \cdot U_*^2),$$

$$Q_{\text{ад}} = S_{\text{баз}} \cdot (b_0 + b_1 \cdot U_* + b_2 \cdot U_*^2) = 378,5 \cdot (2,204 - 4,049 \cdot U_* + 2,271 \cdot U_*^2).$$

2. эксперименты по исследованию динамической устойчивости, проведённые с учётом статических характеристик нагрузки по напряжению, показали, что учёт влияния статических характеристик играет значимую роль, а именно переходные режимы, возникающие вследствие больших возмущений, являются менее тяжёлыми, что является важным фактором при анализе электромеханических переходных процессов;

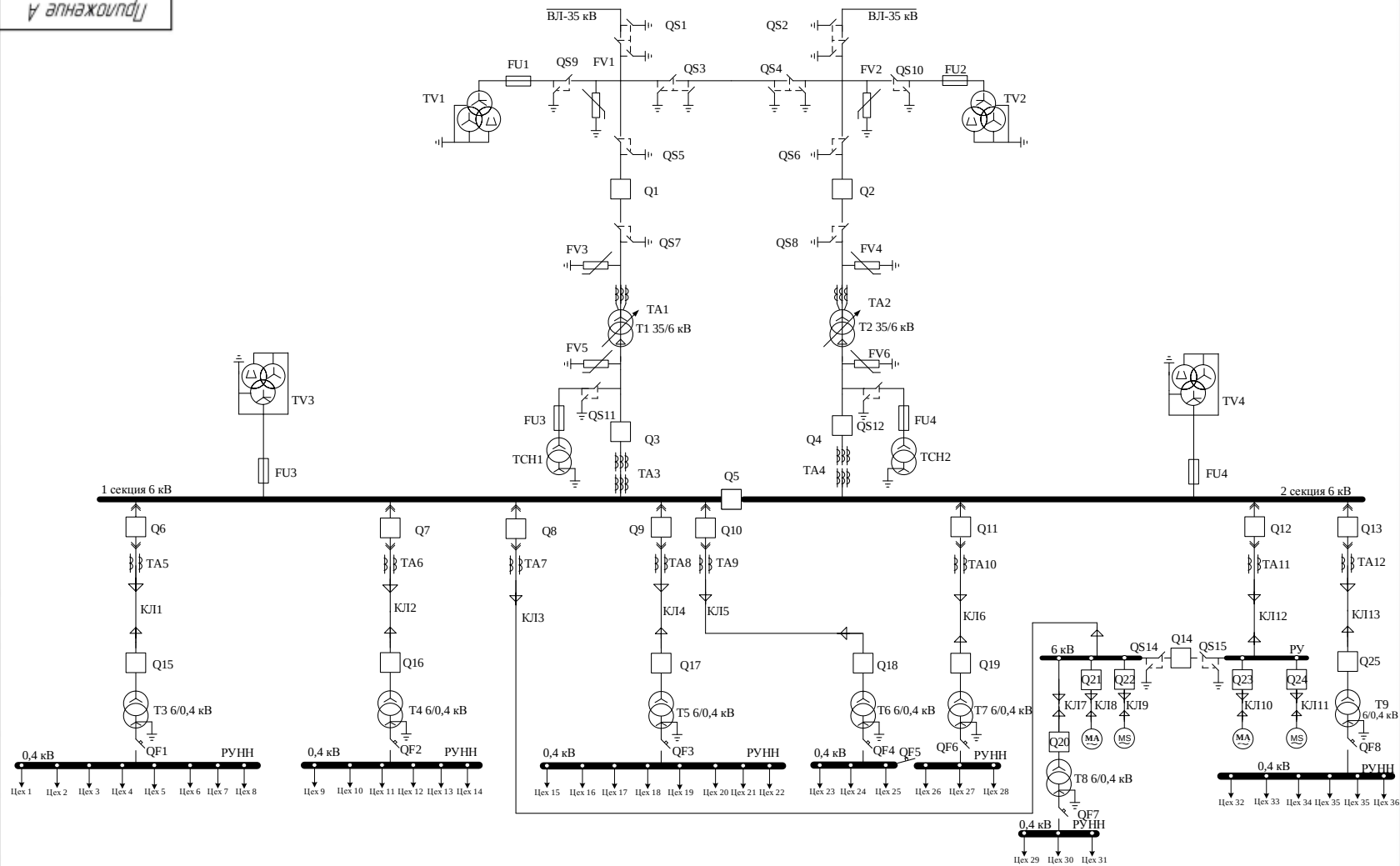
3. при расчётах, произведенных без учёта двигателей статическими характеристиками, значения коэффициентов запаса статической устойчивости по напряжению получаются завышенными, что может привести к ошибочным выводам при анализе режимов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Калентионюк Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем: учебное пособие / Е.В. Калентионюк. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 375 с.
2. Гуревич Ю.Е. Устойчивость нагрузки электрических систем / Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 208 с.: ил.
3. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчётах устойчивости энергосистем и надёжности электроснабжения промышленных потребителей – М.: ЭЛЕКС–КМ, 2008. – 248 с.: ил.
4. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / под редакцией Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.: ил.
5. Идельчик В.И. Электроэнергетические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.: ил.
6. Лыкин А.В. Электрические системы и сети: Учеб. пособие. – М.: Университетская книга; Логос, 2008. – 254 с.
7. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2008. – 350 с.: ил.
8. Игнатович В.М., Ройз Ш.С. Электрические машины и трансформаторы: учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 183 с.

9. Хрущёв Ю.В., Заповодников К.И., Юшков А.Ю. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: учебное пособие / Ю.В. Хрущёв, К.И. Заповодников, А.Ю. Юшков; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 160 с.
10. Щедрин В.А. Процессы в узлах нагрузки при медленных изменениях напряжения и частоты: текст лекций. Чебоксары: Изд-во Чувашского государственного университета, 1985. 60 с.
11. Капитонов О.К. Потребление реактивной мощности асинхронным двигателем при выбеге // Проблемы энергетики. – 2013. – Т.53. – № 7. – с. 8-13.
12. Капитонов О.К. Исследование динамических режимов и обеспечение устойчивости узлов нагрузки с мощными высоковольтными электродвигателями: автореферат. Чебоксары: Изд-во Чувашского государственного университета, 1985. 20 с.
13. Калентионюк Е.В. Исследование устойчивости электроэнергетических систем на ЭВМ: методическое пособие к курсовой работе по дисциплине «Устойчивость электроэнергетических систем» для студентов энергетических специальностей / Калентионюк Е.В., Филипчик Ю.Д.; под редакцией Калентионюка Е.В. – Минск: БНТУ, 2010. 60 с.
14. Лебедев, С.А., Жданов, П.С. О статической устойчивости сложных электрических систем. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1940 г.
15. P. Kundur. “Power system stability and control,” McGraw-Hill, Inc., 1993.

16. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина З.В. Криницына; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.
17. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – 6е изд., переработанное и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 824 с.



					Приложение А				
Изм. лист	М. докум.	Лист	Листов		Принципиальная однолинейная электрическая схема электрооборудования 340 "Гибкая"	Лист	Масса	Масштаб	
Рис. 1	Удобрение А.А. Бачева Н.А.					4			1:1
Исполн.						Лист	Листов		
Исполн.							175 3444		
							группа СА.28		
							Формат А2		
					Копировать				