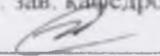


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет энергетический
Кафедра энергетики
Направление подготовки 13.04.02 - Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профиль) образовательной программы Электроэнергетические системы и сети

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

И.о. зав. кафедрой

 Н.В. Савина

« 22 » 06 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

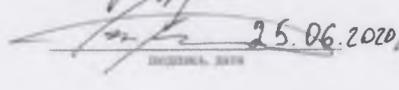
на тему: Выбор оптимальных вариантов управления режимами воздушной линии 220 кВ Нерюнгринская ГРЭС – подстанция Сковородино

Исполнитель
студент группы 842-ом1  09.06.2020 А.А. Фролов

Руководитель
канд. техн. наук, доцент  10.06.2020 А.Н. Козлов

Руководитель магистерской
программы
доктор техн. наук, профессор  15.06.2020 Н.В. Савина

Нормоконтроль
ст. преподаватель  18.06.2020 Н.С. Болруг

Рецензент  25.06.2020 Н.В. Карагуз

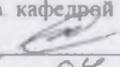
Благовещенск 2020

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет энергетический
Кафедра энергетики

УТВЕРЖДАЮ

И.о. зав. кафедрой

 Н.В. Савина
« 06 . 04 2020 г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Фролова Александра Алексеевича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Выбор оптимальных вариантов управления режимами воздушной линии 220 кВ Нерюнгринская ГРЭС - подстанция Сковородино

(утверждена приказом от 01.06.2020 № 275-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) 14.06.2020

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: материал, собранный во время прохождения преддипломной практики

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов):

структурный анализ электрической сети района проектирования, описание проблемы магистерского исследования, анализ статической и динамической устойчивости, оценка генерации реактивной мощности

5. Перечень материалов приложения: (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.) графическая часть однолинейной схемы электрической сети, расчет переходного процесса в программе MathCad 15

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе (с указанием относящихся к ним разделов) нет

7. Дата выдачи задания 25.03.2020

Руководитель выпускной квалификационной работы: Козлов Александр Николаевич, канд. техн. наук, доцент

(фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, ученое звание)

Задание принял к исполнению (дата):  25.03.2020

(подпись студента)

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 128 страниц, 17 таблиц, 14 рисунков, 105 формул, 52 источника.

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СЕТИ, УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ, РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО, АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ, СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ, ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ.

Цель работы – оценка статической и динамической устойчивости транзита 220 кВ НГРЭС – ПС Тында – ПС Сковородино, при синхронном и асинхронном режиме.

Задачи: выполнение структурного анализа электрической сети, разработка технических вариантов, направленных на повышение эффективности функционирования сети, оценка статической и динамической устойчивости системы.

Актуальность темы: Анализ актуальных проблем функционирования ЕЭС России и транспорта электроэнергии позволили выявить ряд «узких мест», которыми, в частности, являются: ограниченные возможности параллельной работы ОЭС Сибири и ОЭС Востока, а также получения и выдачи мощности из НГРЭС; недостаточная пропускная способность ряда сечений ОЭС Востока;

Основу методологии составляют теория расчета параметров схем замещения элементов электрической сети, теория расчёта установившихся режимов электрических сетей, оценка статической и динамической устойчивости системы, оценка генерации реактивной мощности.

На основании вышеописанных методов произведен расчет и анализ установившихся режимов с помощью программы RastrWin3.

СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения, сокращения	5
Введение	6
1 Климатическая характеристика и территориальные особенности района проектирования	7
2 Структурный анализ электрической сети района проектирования	8
2.1 Анализ источников питания	8
2.2 Анализ ЛЭП	11
2.3 Анализ подстанций	12
2.4 Характеристика потребителей	17
3 Анализ режимной ситуации электрической сети	18
3.1 Расчет и анализ нормального режима	18
3.2 Расчет и анализ послеаварийного режима	30
3.3 Описание проблемы района проектирования	35
4 Анализ статической и динамической устойчивости транзита 220 кВ НГРЭС – ПС Тынды – ПС Сковородино	37
4.1 Определение параметров схемы и расчет исходного режима	38
4.2 Расчет статической устойчивости	42
4.3 Расчет динамической устойчивости	46
4.4 Расчет устойчивости нагрузки	61
5 Оценка генерации реактивной мощности	71
Заключение	73
Библиографический список	74
ПРИЛОЖЕНИЕ А Расчет переходного процесса	79

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

ВЛ – воздушная линия;

ВН – высокое напряжение;

КЗ – короткое замыкание;

УШР – управляемый шунтирующий реактор;

БСК – батарея статических конденсаторов;

ИРМ – источник реактивной мощности;

ОПН – ограничитель перенапряжения нелинейный;

ПС – подстанция;

ОРУ – открытое распределительное устройство;

ЭС – электрическая сеть;

ЭЭС – электроэнергетическая система;

АРВ – автоматическое регулирование возбуждения;

СД – сильного действия;

ПД – пропорционального действия.

ВВЕДЕНИЕ

Главными стратегическими направлениями государственной энергетической политики России до 2030 года являются: 1) энергетическая безопасность; 2) энергетическая эффективность; 3) бюджетная эффективность энергетики; 4) экологическая безопасность энергетики.

К числу основных проблем в сфере электроэнергетики в технологической части относятся:

1) Недостаточная пропускная способность межсистемных и системообразующих линий электропередачи, ограничиваются возможности удовлетворения требований рынка;

2) Ограничения по выдаче мощности ряда электростанций;

3) Слабая управляемость сети, недостаточный объем устройств регулирования напряжения, как следствие повышенные до опасных значений напряжения в периоды суточного и сезонного снижения нагрузки;

4) Недостаточная степень устойчивости;

5) Неоптимальное распределение потоков мощности по параллельным линиям различного класса напряжений, как следствие недоиспользование сетей, рост потерь в сетях.

Из вышеизложенного вытекает ряд задач, которые необходимо решить:

1) Повышение пропускной способности линий электропередачи, вплоть до теплового предела по нагреву;

2) Обеспечение устойчивой работы энергосистемы при различных возмущениях;

3) Обеспечение заданного (принудительного распределения) мощности в электрических сетях в соответствии с требованиями диспетчера;

4) Регулирование напряжения в сетях.

Для решения данных задач необходимо выбрать интенсивный путь развития, при строительстве новых объектов электроэнергетики и модернизации старых необходимо использовать новые технологии.

1 КЛИМАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЙОНА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Климат Амурской области резко-континентальный с чертами муссонности. Формирование такого климата обусловлено взаимодействием солнечной радиации, циркуляции воздушных масс и географических факторов. Под географическими факторами понимают многое: широтное положение; удаленность территории от моря; влияние подстилающей поверхности в виде рельефа, растительности, водных объектов.

Все факторы климатообразования - солнечная радиация, циркуляция атмосферы, географические факторы - взаимодействуют, определяя особенности климата любой территории. Климат, прежде всего, характеризуют показатели температуры самого холодного и самого теплого месяцев. Одинаковые показатели разных мест объединяются изотермами. В январе изотермы с самыми низкими показателями приурочены к горным районам. На севере области средняя январская температура понижается до -40°C . В межгорных впадинах до -50°C .

К югу температуры повышаются. На юге проходят изотермы от -28° до 24°C . Зима в области суровая. Бывают морозы до -44°C . Лето на юге области теплое. Здесь проходят изотермы от 18° до 21°C . Теплым бывает лето и в межгорных долинах севера, где летние температуры поднимаются до $16-17^{\circ}\text{C}$. В горных районах температура с высотой достигает 12°C .

В холодный период года неблагоприятными погодами являются погоды с низкими температурами. Абсолютные минимумы на севере области по средним показателям могут быть ниже -55°C , а на юге -45°C .

По ветровому давлению – II район, 500 Па.

По толщине стенки гололеда – III район, 20мм.

Число грозных часов в год – от 40 до 60 ч/г.

2 СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ РАЙОНА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

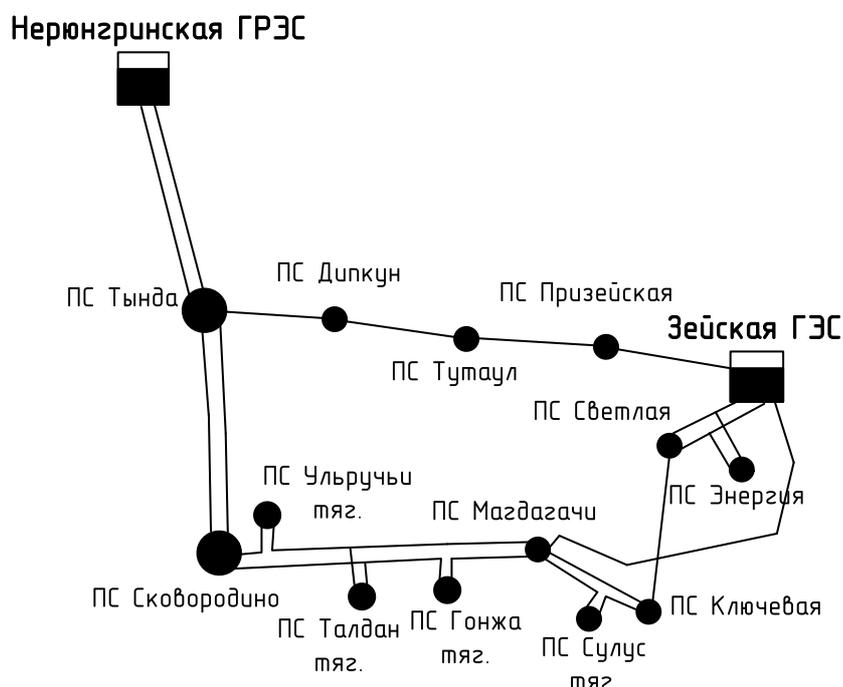


Рисунок 1 – Схема электрической сети

2.1 Анализ источников питания

Для магистерского исследования в качестве источников питания выбраны НГРЭС и Зейская ГЭС.

Нерюнгринская ГРЭС представляет собой тепловую паротурбинную электростанцию с комбинированной выработкой электроэнергии и тепла. Установленная мощность электростанции — 570 МВт, установленная тепловая мощность — 820 Гкал/час. Тепловая схема станции — блочная. В качестве топлива используется каменный уголь Нерюнгринского месторождения[14].

Основное оборудование станции включает в себя:

- энергоблок № 1 мощностью 190 МВт, включающий в себя паровую турбину К-210-130-3, генератор ТГВ-200-2МУЗ и котлоагрегат ТПЕ-214;
- энергоблок № 2 мощностью 190 МВт, включающий в себя паровую турбину Т-180/210-130-1, генератор ТГВ-200-2МУЗ и котлоагрегат ТПЕ-214;

- энергоблок № 3 мощностью 190 МВт, включающий в себя паровую турбину Т-180/210-130-1, генератор ТГВ-200-2МУЗ и котлоагрегат ТПЕ-214;
- пиковую водогрейную котельную в составе трёх водогрейных котлов КВТК-100-150.

Оборудование турбоагрегатов работает на паре температурой 540°С и давлением 130 кг/см². Техническое водоснабжение осуществляется от водохранилища-охладителя на р. Олонгро, образованного путем строительства насыпной глухой плотины. Площадь водохранилища 4,2 км², объём 45 млн м³.

Схема водоснабжения включает в себя глубинный водозабор, открытый подводящий канал, блочную насосную станцию, напорные и сбросные циркуляционные каналы, закрытый сбросный и открытый подводящий каналы, консольный водосброс и водосливную плотину. Выдача электроэнергии в энергосистему производится через открытые распределительные устройства (ОРУ) напряжением 110 и 220 кВ по следующим линиям электропередачи:

- ВЛ 220 кВ Нерюнгринская ГРЭС — ПС Тында с отпайкой на ПС НПС-19, 2 цепи;
- ВЛ 220 кВ Нерюнгринская ГРЭС — ПС НПС-18, 2 цепи;
- ВЛ 110 кВ Нерюнгринская ГРЭС — ПС В.Котельная;
- ВЛ 110 кВ Нерюнгринская ГРЭС — ПС СХК, 2 цепи
- ВЛ 110 кВ Нерюнгринская ГРЭС — Чульманская ТЭЦ, 2 цепи
- ВЛ 110 кВ Нерюнгринская ГРЭС — ПС ОФ, 2 цепи.

Зейская ГЭС – гидроэлектростанция, основными функциями которой выработка электроэнергии, регулирование напряжения и обеспечение резерва мощности в энергосистеме, защита от наводнений, обеспечение судоходства ниже створа ГЭС [11].

Зейская ГЭС расположена на реке Зeya, в 653,8 км от устья, в 5 км выше г. Зеи. Плотина массивно-контрфорсного типа, здание ГЭС–приплотинного

типа. Водохранилище Зейской ГЭС многолетнего регулирования. Нормальный подпорный уровень (НПУ) равен 315,0 м БС, уровень мертвого объема (УМО) – 299,0 м БС. Объем водохранилища при НПУ – 68,42 км³, объем при УМО – 36,30 км³.

На Зейской ГЭС установлены 6 гидроагрегатов: 4 гидроагрегата установленной мощностью 225 МВт каждый и 2 гидроагрегата установленной мощностью 215 МВт каждый. Установленная мощность станции – 1330 МВт, среднегодовая выработка электроэнергии — 4910 млн кВт·ч [4].

Для преобразования энергии потока воды в энергию вращения ротора генератора используются поворотно-лопастные диагональные турбины типа Д45-2556-В600. Конструктивной особенностью поворотно-лопастных турбин (турбина Каплана) является то, что в турбинах данного типа лопасти могут поворачиваться вокруг своей оси одновременно, за счёт чего регулируется её мощность. Также мощность может регулироваться с помощью лопаток направляющего устройства. Лопасти гидротурбины могут быть расположены как перпендикулярно её оси, так и под углом.

Последняя разновидность называется диагональной турбиной. Диагональные турбины применяются на напорах от 30 до 200 метров, конкурируя на низких напорах с классическими поворотно-лопастными турбинами, а на высоких — с радиально-осевыми турбинами. По сравнению с последними, диагональные турбины имеют несколько более высокий КПД, но конструктивно более сложны и более подвержены износу.

Гидроагрегаты выдают электроэнергию на напряжении 15,75 кВ, каждый генератор подключён к своему трёхфазному трансформатору. Два генератора подключены к трансформаторам ТНЕРЕ 265000/242/15,75-РН и ТЦ-250000/220, четыре генератора — к трансформаторам ТЦ-250000/500 (3 шт.) и ТНЕРЕ 265000/525/15.75-РН (1 шт.), а через них — к открытому распределительному устройству (ОРУ) напряжением 220/500 кВ.

Электроэнергия Зейской ГЭС выдаётся в энергосистему по следующим линиям электропередачи:

- ВЛ 500 кВ Зейская ГЭС — ПС Амурская (2 цепи);
- ВЛ 220 кВ Зейская ГЭС — ПС Светлая с отпайкой на ПС Энергия (2 цепи);
- ВЛ 220 кВ Зейская ГЭС — ПС Призейская;
- ВЛ 220 кВ Зейская ГЭС — ПС Магдагачи.

2.2. Анализ ЛЭП

Для выбранного участка произведен анализ линий. Основное внимание уделено линиям напряжением 220 кВ поскольку эти данные необходимы при последующем расчете и анализе режимной ситуации [1].

Таблица 1 – Анализ линий электропередачи

№	Наименование линии	Класс номинального напряжения, кВ	Протяженность линии, км	Марка провода и сечение провода	Число цепей
1	2	3	4	5	6
1.	НГРЭС – ПС Тында	220	184,17	АС 300/39	двухцепная
2.	ПС Тында – ПС Сквородино	220	158,6-155,3	АС 300/39	двухцепная
3.	ПС Сквородино – ПС Ульручьи тяг.	220	24,5-5,1	АС 240/39- АС 300/39	одноцепная
4.	ПС Ульручьи тяг. – ПС Магдагачи с отпайкой на ПС Талдан тяг.	220	4,4- 121,8/0,43	АС 300/39- АС 240/39	одноцепная
5.	ПС Сквородино – ПС Гонжа тяг. с отпайкой на ПС Талдан тяг.	220	115,2/0,34	АСО 300/39	одноцепная
6.	ПС Гонжа тяг. – ПС Магдагачи	220	35,9	АСО 300/39	одноцепная
7.	ПС Магдагачи – ПС Сулус тяг.	220	33,6	АС 240/39- АСО 300/39	одноцепная
8.	ПС Сулус тяг. – ПС Ключевая	220	22,6	АС 300/39- АС 240/39	одноцепная

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
9.	ПС Магдагачи – ПС Ключевая	220	54,6	АС 300/39	одноцепная
10.	ПС Магдагачи – Зейская ГЭС	220	132,5	АС 400/64	одноцепная
11.	ПС Ключевая – ПС Светлая	220	112,3	АСО 300/39	одноцепная
12.	ПС Светлая – Зейская ГЭС с отпайкой на ПС Энергия	220	10,09-2,17/ 10,36-2,14	АС 300/39- АС 240/39	двухцепная
13.	Зейская ГЭС – ПС Призейская	220	183,8	АС 300/39	одноцепная
14.	ПС Призейская – ПС Тутаул	220	98,7	АС 300/39	одноцепная
15.	ПС Тутаул – ПС Дипкун	220	54,3	АС 300/39	одноцепная
16.	ПС Дипкун – ПС Тында	220	147,7	АС 300/39	одноцепная

Линии номинальным напряжением 220 кВ выполнены в основном маркой провода АС - 240/39, АС - 300/39 в воздушном исполнении. На транзите 220 кВ НГРЭС – ПС Сковородино установлены кабельно-воздушные линии в двухцепном исполнении. Также встречается провод с облегченным стальным сердечником АСО - 300/39 [6].

2.3. Анализ подстанций

В данном пункте выделим ПС по способу присоединения к сети, по схемам РУ, выделим количество и мощность, установленных на них трансформаторов [8].

Таблица 2 – Анализ подстанций

№	Наименование ПС	Тип ПС	Схема РУ ВН	Количество и мощность трансформаторов
1	2	3	4	5
1.	НГРЭС 220/110/35	Узловая	12-Одна рабочая секционированная выключателем и обходная системы шин	АТ-1 125 МВА АТ-2 125 МВА Т 3 250 МВА Т 4 250 МВА Т 5 225 МВА

1	2	3	4	5
2.	Тында 220/110/35/10	Узловая	13-Две рабочие системы шин	АТ-1 63 МВА АТ-2 63 МВА Т 3 40 МВА Т 4 40 МВА
3.	Сковородино 220/110/35/10	Узловая	12-Одна рабочая секционированная выключателем и обходная системы шин	АТ-1 63 МВА АТ-2 63 МВА Т 3 25 МВА Т 4 25 МВА
4.	Ульручы тяг. 220/27,5/11	Проходная	5АН-Мостик с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов	Т-1 40 МВА Т-2 40 МВА
5.	Талдан тяг. 220/27,5/11	Ответвительная	4Н -Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий	Т-1 40 МВА Т-2 40 МВА
6.	Гонжа тяг. 220/27,5/11	Проходная	5АН-Мостик с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов	Т-1 40 МВА Т-2 40 МВА
7.	Сулус тяг. 220/27,5/11	Проходная	5АН-Мостик с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов	Т-1 40 МВА Т-2 40 МВА
8.	Магдагачи 220/35/10	Узловая	12-Одна рабочая секционированная выключателем и обходная системы шин	Т-1 25 МВА Т-2 40 МВА Т-3 40 МВА

Продолжение таблицы 2

9.	Ключевая 220/35/10	Узловая	12-Одна рабочая секционированная выключателем и обходная системы шин	T-1 25 МВА T-2 4 МВА
10.	Светлая 220/110/35/10	Узловая	13Н-Две рабочие и обходная системы шин	АТ-1 63 МВА АТ-2 63 МВА Т 3 20 МВА Т 4 20 МВА
11.	Энергия 220/35/10	Ответвительная	4Н -Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий	T-1 40 МВА T-2 40 МВА T-3 10 МВА T-4 10 МВА
12.	ЗГЭС 500/220	Узловая	12-Одна рабочая секционированная выключателем и обходная системы шин	АТх3 167 МВА Т 1 265 МВА Т 2 250 МВА Т 3 225 МВА Т 4 250 МВА Т 5 250 МВА Т 6 265 МВА
13.	Призейская	Узловая	12-Одна рабочая секционированная выключателем и обходная системы шин	T-1 25 МВА T-2 25 МВА
14.	Тутаул	Проходная	5АН-Мостик с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов	T-1 25 МВА T-2 25 МВА

15.	Дипкун	Проходная	5АН-Мостик с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов	T-1 25 МВА T-2 25 МВА
-----	--------	-----------	--	--------------------------

В данном районе рассмотрено 15 подстанций, большинство из них являются двухтрансформаторными, по виду присоединения большинство подстанций является узловыми из-за большого количество присоединений [9].

На примере ПС Тында рассмотрим подробное описание подстанции:

ПС 220 кВ расположена в Амурской области, в 4 км на юго-восточной окраине г. Тында, на юго-запад – 3 км от железной дороги «БАМ».

Подстанция «Тында», суммарной установленной мощностью 228 МВА, осуществляет прием, распределение и передачу электроэнергии на напряжениях 220, 110, 35, 10 кВ.

РУ 220 кВ выполнено по схеме 13 – «Две рабочие системы шин». РУ 110 кВ выполнено по схеме 13 – «Две рабочие системы шин». РУ 35 кВ выполнено по схеме 9 – «Одна рабочая секционированная выключателем система шин». РУ 10 кВ выполнено по схеме 1 – «Одна секционированная выключателем система шин [19]».

В данном проекте мы будем подробно рассматривать только РУ ВН.

На РУ ВН подходят следующие линии:

- КВЛ 220 кВ Тында-НПС-20 №1
- КВЛ 220 кВ Тында-НПС-20 №2
- КВЛ 220 кВ Нерюнгринская ГРЭС – Тында I цепь с отпайкой на на ПС НПС-19

- КВЛ 220 кВ Нерюнгринская ГРЭС – Тында II цепь с отпайкой на на ПС НПС-19

- КВЛ 220 кВ Тында-Дипкун
- КВЛ 220 кВ Сквородино-Тында
- КВЛ 220 кВ Тында-Хорогочи

На ПС 220 кВ Тында установлено два автотрансформатора АДЦТН-63000/220/110/35 (расшифровывается как автотрансформатор трехфазный с принудительной циркуляцией воздуха и масла с ненаправленным потоком масла, трехобмоточный, с устройством РПН) и два силовых трансформатора с диспетчерским наименованием Т-3 и Т-4 типа ТДТН-40000/110/35/10 (расшифровывается как трансформатор трехфазный трехобмоточный с принудительной циркуляцией воздуха и естественной циркуляцией масла, с устройством РПН)[16].

АТ был изготовлен ООО «Тольятинский трансформатор» в 2009 году, введен в эксплуатацию в 2012 году. На АТ установлены устройство РПН типа РС-4 на АТ-1 и МІ 802-170/С на АТ-2, место установки СН.

ТДТН-40000/110/35/10 был изготовлен ООО «Тольятинский трансформатор» в 2009 году, введен в эксплуатацию в 2012 году. На трансформаторе Т-3 установлено устройство РПН тип – VRCIII400Y-72,5/B-10191W, изготовленное в 2009 г., введено в эксплуатацию в 2012 году и устройство ПБВ, установленное на СН 35 кВ, изготовленное в 2009 году и введенное в эксплуатацию в 2012 году.

РУ ВН представляет собой КРУЭ напряжением 220 кВ, внутренней установки. Было введено в эксплуатацию в 2014 году. Данное КРУЭ произведено Shandong Taikai High-voltage Switchgear Co.(КНР) в 2009. Тип – ZF16-252 (L). Привод – гидро-пружинный. Трансформатор тока – LR-220. Трансформатор напряжения – JDQXF3-220. Трансформаторы тока LR-110, LR-220 представляют собой однофазные, закрытые трансформаторы тока

проходной конструкции. Марка и сечение кабеля – ПвПу2г 1х500(гж)/95/127/220[18].

Для КРМ установлены:

- Шунтирующие реакторы Р-1 и Р-2 тип – РТД -20000/35. Шунтирующий реактор Р-1 введен в эксплуатацию в 1978 г., Р-2 в 1981 году.

-Управляемый шунтирующий реактор тип - РТДУ-100000/220-УХЛ1. Данный УШР изготовлен в 2009 г. и введен в эксплуатацию в 2015 году.

2.4 Характеристика потребителей

Основным потребителем западного энергорайона(ЗЭР) ЭС Амурской области является нагрузка тяговых подстанций ОАО «РЖД», которая представлена Забайкальской железной дорогой и составляет около 50 % от потребления всего энергорайона [26]. Дорога с электрической тягой является потребителем первой категории.

Также к крупным потребителям электроэнергии, расположенным в ЗЭР ЭС Амурской области относятся предприятия добывающей промышленности: Березитовый рудник – 3 категория надежности и объекты трубопроводного транспорта (НПС-20, НПС-21) – 1 категория надежности. Характер нагрузок приведенных потребителей – промышленный.

Через ЗЭР ЭС Амурской области проходит связь между ОЭС Востока и ОЭС Сибири, передача мощности по которой существенно влияет на режим сетей 220 кВ этого энергорайона.

3 АНАЛИЗ РЕЖИМНОЙ СИТУАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ РАЙОНА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

3.1 Расчет и анализ нормального режима

Режимом электроэнергетической системы называется её состояние, определяемое параметрами в заданный момент времени. Расчет режимов работы является важной частью проектирования электрических сетей. По результатам расчета можно получить параметры режима, такие как, перетоки активной и реактивной мощности, потери в элементах сети, уровни напряжения и т.д [10].

Проанализировав результаты расчета различных режимов (нормальных, ремонтных, послеаварийных), можно заранее определить слабые места в сети при различных ситуациях и обеспечить надежное и бесперебойное питание потребителей.

В данной магистерской диссертации для расчета режимов использован ПВК RastrWin 3. Чтобы рассчитать режим в ПВК, необходимо рассчитать параметры линии, трансформаторов, нагрузки и т.д.

Активные сопротивления линий для режима зимнего максимума определяются с учетом температуры[17]:

$$r_{0,t} = r_0 \cdot [1 + \alpha_T \cdot (t - 20)]; \quad (1)$$

$$R_{ВЛ} = r_{0,t} \cdot l_{ВЛ}. \quad (2)$$

где r_0 – удельное активное сопротивление 1 км линии, Ом/км;

$r_{0,t}$ – удельное активное сопротивление при температуре, равной t ;

α_T – температурный коэффициент, равный 0,004 для проводов АС, и 0,0043 для медных проводов;

$l_{ВЛ}$ – длина линии, км.

Для режима летнего минимума:

$$R_{ВЛ} = r_0 \cdot l_{ВЛ}. \quad (3)$$

Индуктивное сопротивление линии:

$$X_{ВЛ} = x_0 \cdot l_{ВЛ}. \quad (4)$$

где x_0 – погонное индуктивное сопротивление, Ом/км.

Реактивная мощность, генерируемая ЛЭП (зарядная мощность), моделируется реактивной проводимостью ВЛ:

$$B = b_0 \cdot l_{ВЛ}. \quad (5)$$

где b_0 – погонная емкостная проводимость, мкСм/км.

Трансформаторы вводятся в схему замещения сопротивлением каждой ступени напряжения, активной и реактивной проводимостями.

Коэффициенты трансформации для трехобмоточного трансформатора рассчитываются по формулам:

$$K_{ТН} = \frac{U_{НН}}{U_{ВН}}; \quad (6)$$

$$K_{ТС} = \frac{U_{СН}}{U_{ВН}}. \quad (7)$$

где $K_{ТН}, K_{ТС}, K_{ТВ}$ – соответственно коэффициенты трансформации для низкой, средней и высокой сторон соответственно;

U_{HH}, U_{CH}, U_{BH} – соответственно напряжения на низкой, средней и высокой сторонах трехобмоточного трансформатора.

Схема замещения трехобмоточного трансформатора для ПК RastrWin 3 изображена на рисунке 2:

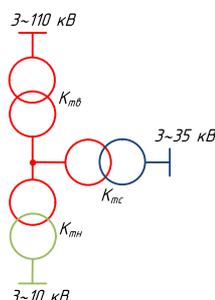


Рисунок 2 – Схема замещения трехобмоточного трансформатора
110/35/10

В таблицах 4, 5 показаны подготовленные исходные данные для расчета режимов.

Произведем расчет нормального режима электрической сети.

Таблица 4 – Узлы

Тип	Номер	Название	Номинальное напряжение $U_{ном}$, кВ	Мощность нагрузки		Мощность генерации		Заданный модуль напряжения $V_{зд}$, кВ	Расчетный модуль напряжения V , кВ	Расчетный угол напряжения Delta, град
				$P_{н}$, МВт	$Q_{н}$, МВар	$P_{г}$, МВт	$Q_{г}$, МВар			
Ген	1	НГРЭС Блок 1	15,75	12,9	14,6	150	51,93	15,9	15,9	13,70
Ген	2	НГРЭС Блок 2	15,75	13,7	12,4	150	64,94	15,99	15,99	13,53
Ген	3	НГРЭС Блок 3	15,75	14,8	16,8	150	69,93	15,7	15,7	8,91
Нагр	4	НГРЭС СШ 1 110 кВ	110	43,1	11				120,22	10,34
Нагр	5	НГРЭС СШ 2 110 кВ	110	54,4	12,2				120,23	10,34
Нагр	6	НГРЭС СШ 1 220 кВ	220	78,6	28,1				235,13	5,11
Нагр	7	НГРЭС СШ 2 220 кВ	220	76,8	28,1				235,12	5,10
Нагр	8	НГРЭС о.т. АТ-1	220						240,27	10,35
Нагр	9	НГРЭС о.т. АТ-2	220						240,28	10,35
Нагр	12	НГРЭС НН АТ-1	35						38,20	10,35
Нагр	13	НГРЭС НН АТ-2	35						38,20	10,35
Ген	14	Тында АТ 1	220	13,6	2,6		45,95	228	228,00	-1,09

Продолжение таблицы 4

Нагр	15	Тында АТ 2	220						228,04	-1,09
Нагр	16	Тында о.т. АТ 1	220						227,54	-1,94
Нагр	17	Тында о.т АТ 2	220						227,54	-1,94
Нагр	18	Тында СН АТ 1	110	7,35	0,9				113,75	-1,94
Нагр	19	Тында СН АТ 2	110	7,4	0,9				113,75	-1,94
Нагр	20	Тында НН АТ 1	35						36,18	-1,94
Нагр	21	Тында НН АТ 2	35						36,18	-1,94
Ген+	22	Сковородино АТ 1	220	48,7	1,7		-5	225	221,62	-5,77
Нагр	23	Сковородино АТ 2	220	73,8	47,1				221,60	-5,77
Нагр	24	Сковородино о.т. АТ 1	220						220,94	-8,18
Нагр	25	Сковородино о.т. АТ 2	220						220,94	-8,18
Нагр	26	Сковородино СН АТ 1	110	19,8	0,75				110,41	-8,18
Нагр	27	Сковородино СН АТ 2	110	19,8	0,75				110,41	-8,18
Нагр	28	Сковородино НН АТ 1	35						35,13	-8,18
Нагр	29	Сковородино НН АТ 2	35						35,13	-8,18
Нагр	30	ПС Талдан тяг.1	220	15,92	9,99				225,00	-5,04
Нагр	31	ПС Талдан тяг.2	220	8,25	9,99				225,01	-5,04
Нагр	32	Отпайка 1	220						225,02	-5,04
Нагр	33	Отпайка 2	220						225,00	-5,04
Нагр	34	ПС Ульручы тяг.	220	21,7	18				222,10	-5,65
Нагр	35	ПС Гонжа тяг.	220	18,6	13,9				229,30	-4,20
Нагр	36	ПС Магдагачи 1	220	6,31	6,47				230,05	-4,02
Нагр	37	ПС Магдагачи 2	220	6,52	7,59				233,80	-3,28
Нагр	38	ПС Сулус тяг.	220	13,4	14,4				232,55	-3,53
Нагр	39	ПС Ключевая ВН	220						234,62	-3,14
Нагр	40	о.т Ключевая	220						233,40	-4,50
Нагр	41	ПС Ключевая СН	35	4,74	0,88				37,09	-4,50
Нагр	42	ПС Ключевая НН	10						10,50	-4,50
Нагр	43	ПС Светлая	220	39,46	2,17				245,30	-0,31

Продолжение таблицы 4

Нагр	44	ПС Энергия 1	220	2,82	0,60				245,74	-0,13
Нагр	45	ПС Энергия 2	220	4,53	1,45				245,73	-0,13
Нагр	46	Отпайка 1	220						245,74	-0,13
Нагр	47	Отпайка 2	220						245,74	-0,13
База	48	Зейская ГЭС	220			194,78	51,73	246	246	0
Нагр	49	ПС Призейская ВН	220						246,30	-0,92
Нагр	50	о.т. Призейская	220						246,22	-1,16
Нагр	51	ПС Призейская СН	35	1,83	0,10				39,15	-1,16
Нагр	52	ПС Призейская НН	10						11,08	-1,16
Нагр	53	ПС Тутаул ВН	220						242,82	-1,14
Нагр	54	о.т. Тутаул	220						242,77	-1,15
Нагр	55	ПС Тутаул СН	35	0,10	0,09				38,60	-1,15
Нагр	56	ПС Тутаул НН	10						10,92	-1,15
Нагр	57	ПС Дипкун ВН	220						239,85	-1,19
Нагр	58	о.т. Дипкун	220						239,61	-1,24
Нагр	59	ПС Дипкун СН	35	0,35	0,41				37,14	-1,24
Нагр	60	ПС Дипкун НН	10						10,78	-1,24

Таблица 5 – Ветви

Тип	Название	Активное сопротивление R, Ом	Реактивное сопротивление X, Ом	Реактивная проводимость B, мкСм	Активная проводимость G, мкСм	Коэффициент трансформации КТ/г
Тр-р	НГРЭС СШ 1 110 кВ - НГРЭС Блок 1	0,15	6,32	22,2	6,1	0,130
Тр-р	НГРЭС СШ 2 110 кВ - НГРЭС Блок 2	0,15	6,09	71,72	13,46	0,130
Тр-р	НГРЭС СШ 1 220 кВ - НГРЭС Блок 3	0,65	28,06	24,76	4,35	0,065
Тр-р	НГРЭС СШ 1 220 кВ - НГРЭС о.т. АТ-1	0,55	59,2	12,9	6,3	1

Тр-р	НГРЭС о.т. АТ-1 - НГРЭС СШ 1 110 кВ	0,48				0,5
Тр-р	НГРЭС о.т. АТ-1 - НГРЭС НН АТ-1	3,2	131			0,159
Тр-р	НГРЭС СШ 2 220 кВ - НГРЭС о.т. АТ-2	0,55	59,2	12,9	6,3	1
Тр-р	НГРЭС о.т. АТ-2 - НГРЭС СШ 2 110 кВ	0,48				0,5
Тр-р	НГРЭС о.т. АТ-2 - НГРЭС НН АТ-2	3,2	131			0,159
Выкл	НГРЭС СШ 1 110 кВ - НГРЭС СШ 2 110 кВ					
Выкл	НГРЭС НН АТ-1 - НГРЭС НН АТ-2					
ЛЭП	НГРЭС СШ 1 220 кВ - Тында АТ 1	18,03	77,28	-4,8		
ЛЭП	НГРЭС СШ 2 220 кВ - Тында АТ 2	18,03	77,28	-4,8		
Тр-р	Тында АТ 1 - Тында о.т. АТ 1	1,4	104	6,5	4,44	1
Тр-р	Тында о.т. АТ 1 - Тында СН АТ 1	1,4				0,5
Тр-р	Тында о.т. АТ 1 - Тында НН АТ 1	2,8	195,6			0,159
Тр-р	Тында АТ 2 - Тында о.т. АТ 2	1,4	104	6,5	4,44	1
Тр-р	Тында о.т. АТ 2 - Тында СН АТ 2	1,4				0,5
Тр-р	Тында о.т. АТ 2 - Тында НН АТ 2	2,8	195,6			0,159
Выкл	Тында АТ 1 - Тында АТ 2					

Продолжение таблицы 5

Выкл	Тында СН АТ 1 - Тында СН АТ 2					
Выкл	Тында НН АТ 1 - Тында НН АТ 2					
ЛЭП	Тында АТ 1 - Сковородино АТ 1	14,9	66,59	-410,55		
ЛЭП	Тында АТ 2 - Сковородино АТ 2	14,9	66,59	-410,55		
Тр-р	Сковородино АТ 1 - Сковородино о.т. АТ 1	1,4	104	6,50	4,44	1
Тр-р	Сковородино о.т. АТ 1 - Сковородино СН АТ 1	1,4				0,5
Тр-р	Сковородино о.т. АТ 1 - Сковородино НН АТ 1	2,8	195,6			0,159
Тр-р	Сковородино АТ 2 - Сковородино о.т. АТ 2	1,4	104	6,5	4,44	1
Тр-р	Сковородино о.т. АТ 2 - Сковородино СН АТ 2	1,4				0,5
Тр-р	Сковородино о.т. АТ 2 - Сковородино НН АТ 2	2,8	195,6			0,159
Выкл	Сковородино АТ 1 - Сковородино АТ 2					
Выкл	Сковородино СН АТ 1 - Сковородино СН АТ 2					
Выкл	Сковородино НН АТ 1 - Сковородино НН АТ 2					

Продолжение таблицы 5

ЛЭП	Сковородино АТ 2 - ПС Ульручы тяг.	3,49	12,3	-77,2		
ЛЭП	Отпайка 2 - ПС Ульручы тяг.	5,76	20,64	-1,25		
ЛЭП	Отпайка 2 - ПС Талдан тяг.1	0,03	0,126	0,01	0,00	
ЛЭП	Отпайка 2 - ПС Магдагачи 1	9,32	33,41	-2,02		
ЛЭП	Сковородино АТ 1 - Отпайка 1	6,82	29,2	-1,80	0,00	
ЛЭП	Отпайка 1 - ПС Гонжа тяг.	4,46	19,15	-1,18	0,00	
ЛЭП	Отпайка 1 - ПС Талдан тяг.2	0,03	0,13	0,01		
ЛЭП	ПС Гонжа тяг. - ПС Магдагачи 2	3,45	15,42	-95,09		
ЛЭП	ПС Магдагачи 1 - ПС Сулус тяг.	4,01	13,91	-87,46		
ЛЭП	ПС Сулус тяг. - ПС Ключевая ВН	2,43	8,528	-55,07		
ЛЭП	ПС Магдагачи 2 - ПС Ключевая ВН	5,24	23,43	-144,47		
Тр-р	ПС Ключевая ВН - о.т Ключевая	5,7	275	6,2	2,8	1
Тр-р	о.т Ключевая - ПС Ключевая СН	5,7				0,159
Тр-р	о.т Ключевая - ПС Ключевая НН	5,7	148			0,045
ЛЭП	ПС Ключевая ВН - ПС Светлая	10,78	48,17	-297,02		
ЛЭП	ПС Светлая - Отпайка 1	0,82	3,86	-0,13		
ЛЭП	Отпайка 1 - Зейская ГЭС	0,34	2,47	-0,10		
ЛЭП	Отпайка 1 - ПС Энергия 1	0,21	1,08	-0,1		
ЛЭП	ПС Светлая - Отпайка 2	0,79	3,77	-0,132		

Продолжение таблицы 5

ЛЭП	Отпайка 2 - Зейская ГЭС	0,34	2,38	-0,1		
ЛЭП	Отпайка 2 - ПС Энергия 2	0,21	0,91	-0,10		
ЛЭП	Зейская ГЭС - ПС Призейская ВН	17,64	78,85	-486,17		
Тр-р	ПС Призейская ВН - о.т. Призейская	2,85	137,5	12,4	5,6	1
Тр-р	о.т. Призейская - ПС Призейская СН	2,85				0,159
Тр-р	о.т. Призейская - ПС Призейская НН	2,85	74			0,045
ЛЭП	ПС Призейская ВН - ПС Тутаул ВН	9,41	42,32	-261,28		
Тр-р	ПС Тутаул ВН - о.т. Тутаул	2,85	137,5	12,4	5,6	1
Тр-р	о.т. Тутаул - ПС Тутаул СН	2,85				0,159
Тр-р	о.т. Тутаул - ПС Тутаул НН	2,85	74			0,045
ЛЭП	ПС Тутаул ВН - ПС Дипкун ВН	5,21	23,29	-143,58		
Тр-р	ПС Дипкун ВН - о.т. Дипкун	2,85	137,5	12,4	5,6	1
Тр-р	о.т. Дипкун - ПС Дипкун СН	2,85				0,155
Тр-р	о.т. Дипкун - ПС Дипкун НН	2,85	74			0,045
ЛЭП	ПС Дипкун ВН - Тында АТ 2	14,18	63,35	-390,62		
ЛЭП	ПС Магдагачи 2 - Зейская ГЭС	9,88	54,75	-360,12		
Выкл	ПС Талдан тяг.1 - ПС Талдан тяг.2					

Таблица 6 – Отклонения напряжения

Название	Номинальное напряжение, $U_{\text{ном}}$, кВ	Фактическое напряжение, V , кВ	Отклонение напряжения, dV , кВ
1	2	3	4
НГРЭС СШ 1 110 кВ	110	120,22	9,29
НГРЭС СШ 2 110 кВ	110	120,23	9,30
НГРЭС СШ 1 220 кВ	220	235,13	6,88
НГРЭС СШ 2 220 кВ	220	235,12	6,87
НГРЭС о.т. АТ-1	220	240,27	9,22
НГРЭС о.т. АТ-2	220	240,28	9,22
НГРЭС НН АТ-1	35	38,20	9,15
НГРЭС НН АТ-2	35	38,20	9,15
ПС Магдагачи 2	220	233,80	6,27
ПС Сулус тяг.	220	232,55	5,71
ПС Ключевая ВН	220	234,62	6,64
о.т. Ключевая	220	233,40	6,09
ПС Ключевая СН	35	37,09	5,98
ПС Ключевая НН	10	10,50	5,03
ПС Светлая	220	242,10	10,1
ПС Энергия 1	220	242,74	10,12
ПС Энергия 2	220	242,73	10,11
Отпайка 1	220	242,74	10,12
Отпайка 2	220	242,74	10,12
Зейская ГЭС	220	246	11,42
ПС Призейская ВН	220	246	11,42
о.т. Призейская	220	246	11,42
ПС Призейская СН	35	38,5	10,1
ПС Призейская НН	10	11,08	10,80
ПС Тутаул ВН	220	242,82	10,37
о.т. Тутаул	220	242,77	10,35
ПС Тутаул СН	35	38,60	10,29
ПС Тутаул НН	10	10,92	9,25
ПС Дипкун ВН	220	239,85	9,02
о.т. Дипкун	220	239,61	8,92

На основе рассчитанного режима произведем анализ режимной ситуации.

Напряжение на шинах не выходит за пределы допустимых значений.

На шинах 220 кВ ПС Энергия, ЗГЭС, ПС Призейская, ПС Тутаул наблюдается небольшое повышение напряжения, но находится в допустимых для них пределах.

Оценку загрузки линий можно осуществить по длительно допустимым токам.

Таблица 7 – Токовая нагрузка линий

Название	Ток в начале линии, I _{нач} , А	Ток в конце линии, I _{кон} , А	Длительно допустимый ток для температуры 25 °С I _{доп} 25 ДДТН	Токовая нагрузка, I _{доп} / I
1	2	3	4	5
НГРЭС СШ 1 220 кВ - Тында АТ 1	189,49	189,52	710	26,7
НГРЭС СШ 2 220 кВ - Тында АТ 2	188,94	188,97	710	26,6
Тында АТ 1 - Сковородино АТ 1	162,33	168,27	710	23,70
Тында АТ 2 - Сковородино АТ 2	162,66	168,73	710	23,77
Сковородино АТ 2 - ПС Ульручы тяг.	33,86	28,85	710	4,77
Отпайка 2 - ПС Ульручы тяг.	101,07	101,17	605	16,72
Отпайка 2 - ПС Талдан тяг.1	7,02	7,02	605	1,16
Отпайка 2 - ПС Магдагачи 1	108,06	107,91	605	17,86
Сковородино АТ 1 - Отпайка 1	85,54	85,40	710	12,05
Отпайка 1 - ПС Гонжа тяг.	158,85	158,75	605	26,26
Отпайка 1 - ПС Талдан тяг.2	73,52	73,52	605	12,15
ПС Гонжа тяг. - ПС Магдагачи 2	217,16	209,35	710	30,59
ПС Магдагачи 1 - ПС Сулус тяг.	130,31	123,49	605	21,54
ПС Сулус тяг. - ПС Ключевая ВН	171,38	166,94	605	28,33
ПС Магдагачи 2 - ПС Ключевая ВН	31,38	18,83	605	5,19
ПС Ключевая ВН - ПС Светлая	196,95	176,88	710	27,74
ПС Светлая - Отпайка 1	131,65	131,64	605	21,76
Отпайка 1 - Зейская ГЭС	138,38	138,38	710	19,49
Отпайка 1 - ПС Энергия 1	6,77	6,78	605	1,12
ПС Светлая - Отпайка 2	133,85	133,85	710	18,85
Отпайка 2 - Зейская ГЭС	145,01	145,00	710	20,42
Отпайка 2 - ПС Энергия 2	11,16	11,17	605	1,85

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4	5
Зейская ГЭС - ПС Призейская ВН	50,50	37,54	710	7,11
ПС Призейская ВН - ПС Тугаул ВН	32,55	64,75	710	9,12
ПС Тугаул ВН - ПС Дипкун ВН	62,57	81,68	710	11,50
ПС Дипкун ВН - Тында АТ 2	78,66	130,44	710	18,37

По результатам расчета нормальных режимов, можно сделать вывод, что линии загружены в допустимых пределах [27].

Если сравнивать токи, протекающие по ЛЭП, с экономическими токовыми интервалами можно заметить, что по большинству ЛЭП протекают токи, значение которых входит в пределы экономически обоснованных токовых интервалов.

Таблица 8 – Потери

Район	Суммарные потери D_p , МВт	Нагрузочные потери $dP_{нагр}$, МВт	Постоянные потери $dP_{пост}$, МВт	Потери в ЛЭП $dP_{ЛЭП}$, МВт	Потери в трансфор- маторах dP_{Tr} , МВт
1	15,17	11,97	3,2	10,88	1

Нагрузочные потери больше постоянных потерь, что говорит о нормальной загруженности элементов электрической сети. Суммарные потери составляют 2,2 %, что не выходит за допустимые пределы в 10 %.

Схема потокораспределения представлена на рисунке 3:

1	2	3	4
НГРЭС СШ 2 110 кВ	110	120,26	9,33
НГРЭС СШ 1 220 кВ	220	235,38	6,99
НГРЭС СШ 2 220 кВ	220	235,36	6,98
НГРЭС о.т. АТ-1	220	240,35	9,25
НГРЭС о.т. АТ-2	220	240,35	9,25
НГРЭС НН АТ-1	35	38,22	9,19
НГРЭС НН АТ-2	35	38,22	9,19
ПС Магдагачи 2	220	232,85	5,84
ПС Сулус тяг.	220	231,55	5,25
ПС Ключевая ВН	220	233,73	6,24
о.т Ключевая	220	232,51	5,69
ПС Ключевая СН	35	36,95	5,57
ПС Светлая	220	245,25	11,48
ПС Энергия 1	220	245,72	11,69
ПС Энергия 2	220	245,71	11,69
Отпайка 1	220	245,72	11,69
Отпайка 2	220	245,72	11,69
Зейская ГЭС	220	246,00	11,82
ПС Призейская ВН	220	237,22	7,83

Напряжения в узлах сети находятся в допустимых пределах. На шинах 220 кВ ПС Энергия, ЗГЭС, ПС Призейская, ПС Светлая наблюдается небольшое повышение напряжения, но находится в допустимых для них пределах. Для этих ПС наибольшее допустимое рабочее напряжение равно 246 кВ.

Таблица 10 – Токовая загрузка линий

Название	Ток в начале линии, $I_{нач}$, А	Ток в конце линии, $I_{кон}$, А	Длительно допустимый ток для температуры 25°С, $I_{доп_25}$, А	Токовая загрузка, $I_{доп}$ / I
1	2	3	4	5
НГРЭС СШ 1 220 кВ - Тында АТ 1	-	-	710	-
НГРЭС СШ 2 220 кВ - Тында АТ 2	377,3	377,29	710	53,14
Тында АТ 1 - Сковородино АТ 1	160,6	164,63	710	23,19
Тында АТ 2 - Сковородино АТ 2	161,32	165,40	710	23,30

Продолжение таблицы 10

1	2	3	4	5
Сковородино АТ 2 - ПС Ульручьи тяг.	41,31	35,47	710	5,82
Отпайка 2 - ПС Ульручьи тяг.	109,00	109,09	605	18,03
Отпайка 2 - ПС Талдан тяг.1	6,20	6,20	605	1,03
Отпайка 2 - ПС Магдагачи 1	115,04	114,88	605	19,01
Сковородино АТ 1 - Отпайка 1	94,27	94,13	710	13,28
Отпайка 1 - ПС Гонжа тяг.	169,21	169,11	605	27,97
Отпайка 1 - ПС Талдан тяг.2	75,09	75,09	605	12,41
ПС Гонжа тяг. - ПС Магдагачи 2	227,77	219,78	710	32,08
ПС Магдагачи 1 - ПС Сулус тяг.	137,48	130,46	605	22,72
ПС Сулус тяг. - ПС Ключевая ВН	178,77	174,23	605	29,55
ПС Магдагачи 2 - ПС Ключевая ВН	33,09	20,14	605	5,47
ПС Ключевая ВН - ПС Светлая	205,65	184,57	710	28,97
ПС Светлая - Отпайка 1	135,00	134,99	605	22,31
Отпайка 1 - Зейская ГЭС	141,71	141,71	710	19,96
Отпайка 1 - ПС Энергия 1	6,77	6,78	605	1,12
ПС Светлая - Отпайка 2	137,29	137,29	710	19,34
Отпайка 2 - Зейская ГЭС	148,45	148,44	710	20,91
Отпайка 2 - ПС Энергия 2	11,16	11,17	605	1,85
Зейская ГЭС - ПС Призейская ВН	37,22	95,59	710	13,46
ПС Призейская ВН - ПС Тутаул ВН	51,90	84,82	710	11,95
ПС Тутаул ВН - ПС Дипкун ВН	43,92	61,00	710	8,59
ПС Дипкун ВН - Тында АТ 2	25,81	68,69	710	9,67

По результатам расчета послеаварийного режима, можно сделать вывод, что линии загружены в допустимых пределах. 2 цепь НГРЭС – Тында в аварийном режиме справляется с нагрузкой на одну цепь и загружена на 54 %. А также остается резерв по передаваемой мощности для дополнительной нагрузки [2].

Чтобы проверить весь транзит НГРЭС - Тында – Сковородино, отключим линию Тында АТ 1 - Сковородино АТ 1.

Произведем расчет послеаварийного режима электрической сети.

Таблица 11 – Отклонения напряжения

Название	Номинальное напряжение, U _{ном} , кВ	Фактическое напряжение, V, кВ	Отклонение напряжения, dV, кВ
1	2	3	4
НГРЭС СШ 1 110 кВ	110	120,22	9,29
НГРЭС СШ 2 110 кВ	110	120,23	9,30
НГРЭС СШ 1 220 кВ	220	235,13	6,88
НГРЭС СШ 2 220 кВ	220	235,11	6,87
НГРЭС о.т. АТ-1	220	240,27	9,21
НГРЭС о.т. АТ-2	220	240,28	9,22
НГРЭС НН АТ-1	35	38,20	9,15
НГРЭС НН АТ-2	35	38,20	9,15
ПС Магдагачи 2	220	231,04	5,02
ПС Ключевая ВН	220	232,06	5,48
ПС Светлая	220	245,14	11,43
ПС Энергия 1	220	245,68	11,67
ПС Энергия 2	220	245,67	11,67
Отпайка 1	220	245,69	11,68
Отпайка 2	220	245,68	11,67
Зейская ГЭС	220	246	11,82
ПС Призейская ВН	220	238,28	8,31

Напряжения в узлах сети находятся в допустимых пределах.

На шинах 220 кВ ПС Энергия, ЗГЭС, ПС Светлая, наблюдается небольшое повышение напряжения, но находится в допустимых для них пределах. Для этих ПС наибольшее допустимое рабочее напряжение равно 246 кВ.

Таблица 12 – Токовая загрузка линий

Название	Ток в начале линии, I _{нач} , А	Ток в конце линии, I _{кон} , А	Длительно допустимый ток для температуры 25°С, I _{доп_25} , А	Токовая загрузка, I _{доп} /I
1	2	3	4	5
НГРЭС СШ 1 220 кВ - Тында АТ 1	189,28	189,31	710	26,66
НГРЭС СШ 2 220 кВ - Тында АТ 2	189,17	189,20	710	26,65
Тында АТ 1 - Сковородино АТ 1	-	-	710	-
Тында АТ 2 - Сковородино АТ 2	293,91	301,20	710	42,42
Сковородино АТ 2 - ПС Ульручы тяг.	59,24	53,65	710	8,34
Отпайка 2 - ПС Ульручы тяг.	128,41	128,50	605	21,24
Отпайка 2 - ПС Талдан тяг.1	4,31	4,31	605	0,71
Отпайка 2 - ПС Магдагачи 1	132,35	132,20	605	21,88
Отпайка 1 - ПС Гонжа тяг.	194,79	194,69	605	32,20
Отпайка 1 - ПС Талдан тяг.2	78,35	78,35	605	12,95
ПС Гонжа тяг. - ПС Магдагачи 2	253,99	246,05	710	35,77
ПС Магдагачи 1 - ПС Сулус тяг.	155,01	148,05	605	25,62
ПС Сулус тяг. - ПС Ключевая ВН	196,78	192,26	605	32,52
ПС Магдагачи 2 - ПС Ключевая ВН	36,90	23,99	605	6,10
ПС Ключевая ВН - ПС Светлая	227,72	205,97	710	32,07
ПС Светлая - Отпайка 1	145,01	145,00	605	23,97
Отпайка 1 - Зейская ГЭС	151,69	151,68	710	21,36
Отпайка 1 - ПС Энергия 1	6,77	6,78	605	1,12
ПС Светлая - Отпайка 2	147,58	147,58	710	20,79
Отпайка 2 - Зейская ГЭС	158,72	158,72	710	22,36
Отпайка 2 - ПС Энергия 2	11,17	11,17	605	1,85

1	2	3	4	5
Зейская ГЭС - ПС Призейская ВН	23,40	91,07	710	12,83
ПС Призейская ВН - ПС Тутаул ВН	46,82	81,94	710	11,54
ПС Тутаул ВН - ПС Дипкун ВН	38,70	57,40	710	8,08
ПС Дипкун ВН - Тында АТ 2	19,00	66,60	710	9,38

По результатам расчета послеаварийного режима, можно сделать вывод, что линии загружены в допустимых пределах. 2 цепь Тында – Сковородино в аварийном режиме справляется с нагрузкой на одну цепь и загружена на 43 %. А также остается резерв по передаваемой мощности для дополнительной нагрузки.

3.3 Описание проблемы района проектирования

При магистерском исследовании, на транзите 220 кв НГРЭС – ПС Тында – ПС Сковородино из расчета режима в программе RastrWin3 не было выявлено проблем. Напряжения находятся в допустимых пределах, длительно допустимый ток на ЛЭП не превышает номинальных значений проводов, даже остается резерв для дополнительной нагрузки. Но проблема была выявлена на Нерюнгринской ГРЭС и заключается она в том, что два автотрансформатора не справляются с большой генерацией трёх энергоблоков для передачи электроэнергии в энергетическую систему. Эта проблема связана с тем, что:

- С каждым годом вырастает нагрузка из-за появления новых потребителей
- В ОЭС Сибири присутствует проблема с генерацией электроэнергии, и при введении в эксплуатацию второй ВЛ объединяющей ОЭС Сибири и ОЭС Востока, можно будет передавать больше электроэнергии.

В связи с выше перечисленными примечаниями было принято решения установки дополнительного автотрансформатора на НГРЭС, для снятия запрета на выдачу мощности.

Схема подключения автотрансформатора на НГРЭС изображена на рисунке 4:

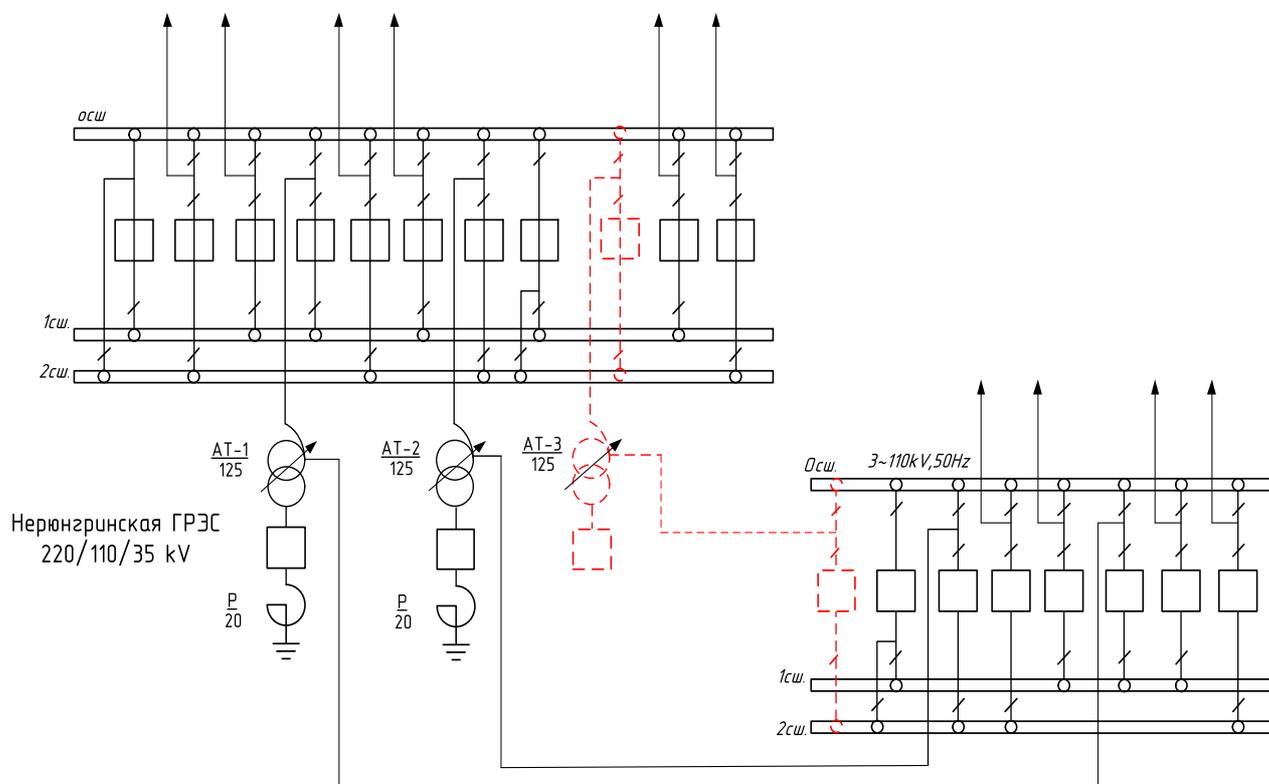


Рисунок 4 – Схема подключения автотрансформатора на НГРЭС

После установки дополнительного автотрансформатора на Нерюнгринской ГРЭС увеличится нагрузка в систему. Поэтому требуется провести расчет статической и динамической устойчивости транзита 220 кВ НГРЭС – ПС Тында – ПС Сковородино, чтобы проверить выдержит ли оборудование повышенную нагрузку при малых и больших возмущениях [36]. А также провести оценку генерации реактивной мощности.

4 АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТРАНЗИТА 220 КВ НГРЭС – ПС ТЫНДА – ПС СКОВОРОДИНО

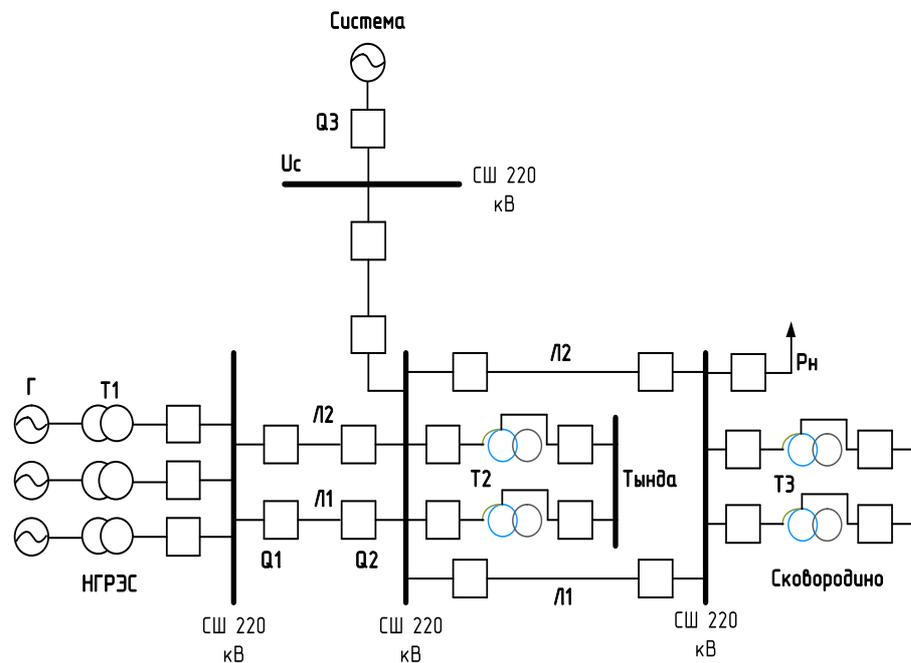


Рисунок 5 – Схема электропередачи

Под электрической системой понимают совокупность элементов вырабатывающих, преобразующих, передающих, распределяющих и потребляющих электрическую энергию, а также элементов управления. К силовым элементам системы относятся генераторы, трансформаторы, линии электропередач, двигатели и различные типы нагрузок в сети [37].

Деление режимов электрической системы на установившиеся и переходные условно. В установившемся режиме реальной системы его параметры постоянно меняются, но так как малые отклонения от заданных параметров не должны сказываться на работе системы в целом, можно дать определение статической устойчивости системы. Под статической устойчивостью системы понимают ее способность восстанавливать исходный (или близкий к нему) режим после малого его возмущения.

При возникновении КЗ, аварийных отключениях нагруженных агрегатов, линий и т.п., то есть при появлении больших возмущений, возникают резкие

изменения режима. Несмотря на такие изменения, система должна продолжать функционировать и в таких случаях говорят о динамической устойчивости системы [38]. То есть это способность системы возвращаться в исходный (или близкий к нему) режим после большого возмущения.

Таким образом, конечной целью анализа переходных процессов является поиск оптимальных условий эксплуатации электроэнергетической системы. Причем под оптимальными понимаются такие условия, при которых данная система будет иметь наилучшее качество переходных процессов и наибольшую устойчивость экономически оправданных вложений средств на мероприятия, улучшающие качество переходных процессов и устойчивость [21].

4.1 Определение параметров схемы и расчет исходного режима

Таблица 13 – Характеристики элементов электропередачи

Генератор									
Тип	$S_{ном}$, МВ·А	n_z	X_d	X_q	X'_d	$X_{Г2}$	T_j , с	T_{d0} , с	T_e , с
ТГВ	180	3	1,71	-	0,21	0,25	5	5,42	0,1
Трансформаторы									
Т1					Т2, Т3				
$S_{ном}$, МВ·А	u_k , %	Группа соедин.			$S_{ном}$, МВ·А	u_k , %	Группа соедин.		
3×250	11	Δ/Y			2×63	11	Y/Y		
Нагрузка					Линия №1		Линия №2		
$P_{ном}$, МВт	$\cos \phi$	Скольжение, s_0			T_j , с	L, км	$U_{ном}$, кВ	L, км	$U_{ном}$, кВ
300	0,85	0,03			6	184	220	156,1	220

$$S_{\sigma} = S_H = 100 \text{ МВА}; \quad (8)$$

$$U_{\sigma} = U_H = 110 \text{ кВ}; \quad (9)$$

$$U_{*H} = U_{*c} = 1 \text{ о.е.} \quad (10)$$

Переводу в *о.е.* подлежат значения всех мощностей, напряжений и ЭДС.

При этом учитываем, что к базисным условиям приводятся как полные мощности, так и их составляющие.

$$P_{*H} = \frac{P_H}{S_{\sigma}}; \quad (11)$$

$$P_{*H} = \frac{300}{180} = 1,67 \text{ о.е.};$$

$$Q_{*H} = \frac{Q_H}{S_{\sigma}} = P_H \cdot \frac{\sqrt{(1-\cos\varphi)^2}}{\cos\varphi}; \quad (12)$$

$$Q_{*H} = 1,667 \cdot \frac{\sqrt{(1-0,85)^2}}{0,85} = 1,033 \text{ о.е.};$$

$$X_{*T1} = \frac{U_{K\%}}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{HT1}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{180}{250} = 0,079 \text{ о.е.}; \quad (13)$$

$$X_{*T2} = \frac{U_{K\%}}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{HT2}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{180}{63} = 0,314 \text{ о.е.}; \quad (14)$$

$$X_{*Л} = X_o \cdot l \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{срном}^2}; \quad (15)$$

$$X_{*Л} = 0,294 \text{ о.е.}$$

В дальнейшем индекс «*» и «о.е.» опускаем.

Расчет исходного установившегося режима

1) Генератор без АРВ

Генератор вводится в схему замещения сопротивлением[23]:

$$X_{Г} = \frac{X_{q}}{3}; \quad (16)$$

$$X_{Г} = \frac{0,3}{3} = 0,1.$$

В результате получаем синхронную ЭДС генератора:

$$E_{Q} = \sqrt{\left(U_{C} + \frac{Q_{H} \cdot (X_{Г} + X_{внеш})}{U_{C}} \right)^2 + \left(P_{H} \cdot \frac{X_{Г} + X_{внеш}}{U_{C}} \right)^2}; \quad (17)$$

$$X_{внеш} = \frac{X_{Т1}}{2} + \frac{X_{Л}}{2} + \frac{X_{Т2}}{2}; \quad (18)$$

$$X_{внеш} = \frac{0,079}{3} + \frac{0,314}{2} + \frac{0,294}{2} = 0,331;$$

$$E_{Q} = \sqrt{\left(1 + \frac{1,033 \cdot (0,1 + 0,331)}{1} \right)^2 + \left(\frac{1,66 \cdot (0,1 + 0,331)}{1} \right)^2} = 1,613.$$

Угол между векторами напряжения системы и ЭДС генератора:

$$\delta_{oQ} = \arctg \left(\frac{P_H \cdot (X_\Gamma + X_{внеш})}{U_C^2 + Q_H \cdot (X_\Gamma + X_{внеш})} \right) \cdot \frac{180}{\pi}; \quad (19)$$

$$\delta_{oQ} = \arctg \left(\frac{1,66 \cdot (0,1 + 0,331)}{1^2 + 1,033 \cdot (0,1 + 0,331)} \right) \cdot \frac{180}{3,14} = 26,418^\circ.$$

2) Генератор с АРВ ПД

Генератор вводится в схему замещения сопротивлением:

$$X_\Gamma = \frac{X_q}{3}. \quad (20)$$

В результате получаем синхронную ЭДС генератора:

$$E' = \sqrt{\left(U_C + \frac{Q_H \cdot (X_\Gamma + X_{внеш})}{U_C} \right)^2 + \left(P_H \cdot \frac{X_\Gamma + X_{внеш}}{U_C} \right)^2}; \quad (21)$$

$$E_Q = \sqrt{\left(1 + \frac{1,033 \cdot (0,07 + 0,331)}{1} \right)^2 + \left(\frac{1,66 \cdot (0,07 + 0,331)}{1} \right)^2} = 1,56.$$

Угол между векторами напряжения системы и ЭДС генератора:

$$\delta'_o = \arctg \left(\frac{P_H \cdot (X_\Gamma + X_{внеш})}{U_C^2 + Q_H \cdot (X_\Gamma + X_{внеш})} \right) \cdot \frac{180}{\pi}; \quad (22)$$

$$\delta_{oQ} = \arctg\left(\frac{1,66 \cdot (0,07 + 0,331)}{1^2 + 1,033 \cdot (0,07 + 0,331)}\right) \cdot \frac{180}{3,14} = 25,282^\circ.$$

3) Генератор с АРВ СД

Генератор вводится в схему замещения сопротивлением:

$$X_G = 0.$$

В результате получаем синхронную ЭДС генератора:

$$U_G = \sqrt{\left(U_C + \frac{Q_H \cdot X_{внеш}}{U_C}\right)^2 + \left(\frac{P_H \cdot X_{внеш}}{U_C}\right)^2}; \quad (23)$$

$$U_G = \sqrt{\left(1 + \frac{1,033 \cdot 0,331}{1}\right)^2 + \left(\frac{1,66 \cdot 0,331}{1}\right)^2} = 1,45.$$

Угол между векторами напряжения системы и ЭДС генератора:

$$\delta_{oU} = \arctg\left(\frac{P_H \cdot X_{внеш}}{U_C^2 + Q_H \cdot X_{внеш}}\right) \cdot \frac{180}{\pi}; \quad (24)$$

$$\delta_{oU} = \arctg\left(\frac{1,66 \cdot 0,331}{1^2 + 1,033 \cdot 0,331}\right) \cdot \frac{180}{3,14} = 22,333^\circ.$$

4.2 Расчет статической устойчивости

Расчет при отсутствии АРВ

Дополнительно для расчетов угловой характеристики рассчитаем $E_q^{(я)}$:

$$E_q^{(я)} = E_Q \frac{X_d - X'_d}{X_q - X'_d} - E'_{q2} \frac{X_d - X_q}{X_q - X'_d}; \quad (25)$$

$$E_q^{(я)} = 2,397.$$

Угловая характеристика мощности:

$$P_{mEq}^{(я)}(\delta) = \frac{E_q^{(я)} \cdot U_C}{\frac{X_d}{3} + X_{внеш}} \cdot \sin(\delta) + \frac{U_C^2}{2} \cdot \frac{\frac{X_d}{3} - \frac{X_q}{3}}{(\frac{X_d}{3} + X_{внеш}) \cdot (\frac{X_q}{3} + X_{внеш})} \cdot \sin(2\delta) \quad (26)$$

Предел передаваемой мощности:

$$P_{maxEq}^{(я)} = \frac{E_q^{(я)} \cdot U_C}{\frac{X_d}{3} + X_{внеш}}; \quad (27)$$

$$P_{maxEq}^{(я)} = 2,661.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости:

$$K_{занPmEqя} = \frac{P_{maxEq}^{(я)} - P_H}{P_{maxEq}^{(я)}} \cdot 100; \quad (28)$$

$$K_{занPmEqя} = 37,4 \%$$

Расчет при АРВ ПД

Угловая характеристика мощности:

$$P_{mE'q}(\delta) = \frac{E'_{q2} \cdot U_C}{\frac{X'_d}{3} + X_{внеш}} \cdot \sin(\delta) - \frac{U_C^2}{2} \cdot \frac{\left(\frac{X_q}{3} - \frac{X'_d}{3}\right)}{\left(\frac{X_q}{3} + X_{внеш}\right) \cdot \left(\frac{X'_d}{3} + X_{внеш}\right)} \cdot \sin(2\delta) \quad (29)$$

Предел передаваемой мощности [30]:

$$P_{maxE'q} = \frac{E'_{q2} \cdot U_C}{\frac{X'_d}{3} + X_{внеш}}; \quad (30)$$

$$P_{maxE'q} = 3,9.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости:

$$K_{занPmE'q} = \frac{P_{maxE'q} - P_H}{P_{maxE'q}} \cdot 100; \quad (31)$$

$$K_{занPmE'q} = 57,3 \%$$

Расчет при АРВ СД

Угловая характеристика мощности:

$$P_{mU_{\Sigma q}}(\delta) = \frac{U_{\Gamma q2} \cdot U_C}{X_{внеш}} \cdot \sin(\delta) - \frac{U_C^2}{2} \cdot \frac{\left(\frac{X_q}{4}\right) \cdot \sin(2\delta)}{\left(\frac{X_q}{4} + X_{внеш}\right) \cdot X_{внеш}}; \quad (32)$$

Предел передаваемой мощности:

$$P_{maxUzq} = \frac{U_{\Gamma q2} \cdot U_C}{X_{внеш}}; \quad (33)$$

$$P_{maxUzq} = 4,37.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости:

$$K_{занPmUzq} = \frac{P_{maxUzq} - P_H}{P_{maxUzq}} \cdot 100; \quad (34)$$

$$K_{занPmUzq} = 61,9 \%$$

Так как все коэффициенты запаса статической устойчивости больше 20%, то они удовлетворяют условию статической устойчивости системы в нормальном режиме [32]. Полученные угловые характеристики мощности приведены на рисунке 4:

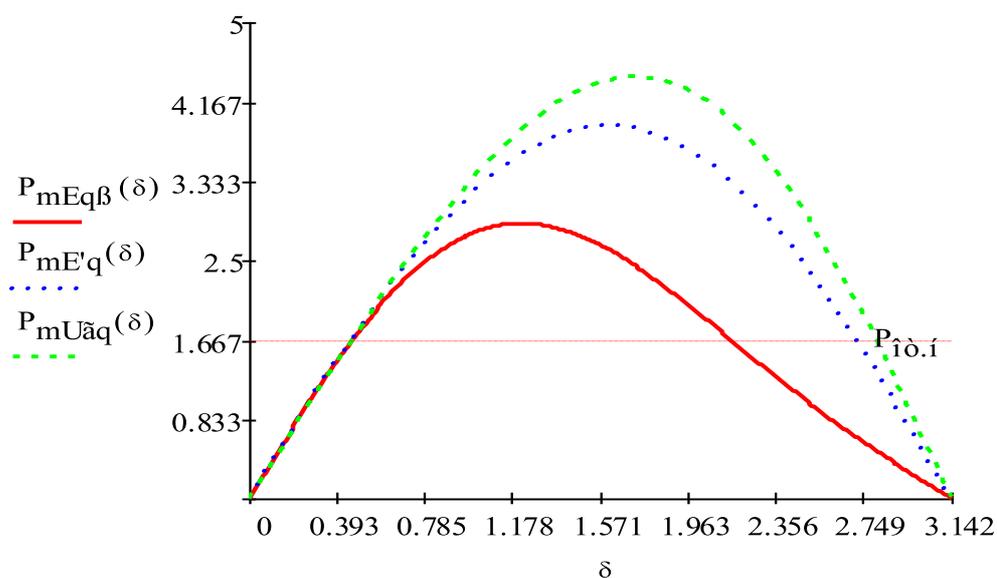


Рисунок 6 – Угловые характеристики мощности генератора

4.3 Расчет динамической устойчивости

Исследования динамической устойчивости основываются на методах численного решения дифференциального уравнения относительного движения ротора генератора.

При выполнении расчётов принимаются следующие основные допущения:

1) мощность турбины считается неизменной в течении всего переходного режима;

2) мощность, вырабатываемая генератором, считается изменяющейся мгновенно при изменении в схеме электропередачи в следствии КЗ или коммутации;

3) аperiodические моменты, обусловленные потерями мощности, не учитываются;

4) выполнение расчетов несимметричных режимов производится с учетом только прямой последовательности параметров режима с использованием правила эквивалентности прямой последовательности.

С учётом указанных допущений, для схемы электропередачи, дифференциальное уравнение относительного движения ротора может быть записано в виде [39]:

$$\frac{T_j \cdot d^2 \delta}{314 \cdot f_0 \cdot dt^2} = P_0 - P; ; \quad (35)$$

где T_j – постоянная инерции ротора генератора, с;

t – время, с;

f_0 – частота, ($f_0 = 50$ Гц) ;

δ – угол, град;

$P_0 = P_H$ – мощность турбины.

В магистерском исследовании выполняются два расчёта динамической устойчивости электропередачи: без учёта (приближённый расчёт по правилу площадей и методом последовательных интервалов) и с учётом реакции якоря генератора и действия АРВ (уточнённый расчёт методом последовательных интервалов) [42].

При выполнении приближённого расчёта по формуле строятся угловые характеристики мощности при $E'_q = const$ [2]. Генератор вводится в схему замещения своим переходным сопротивлением X'_d . Взаимное сопротивление $X_{12}^{(n)}$ определяется с учётом сопротивления аварийного шунта $\Delta X^{(n)}$, зависящего от вида КЗ.

1) Нормальный режим:

$$X_{н.р.} = \frac{X'_d}{4} + X_{внеш}; \quad (36)$$

$$X_{н.р.} = \frac{0,21}{3} + 0,331 = 0,401;$$

$$P_{н.р.} = \frac{E'_q \cdot U_C}{X_{н.р.}}; \quad (37)$$

$$P_{н.р.} = 3,902.$$

2) Для схемы замещения первого аварийного режима:

$$X_1 = \frac{X_{Г2}}{n_2} + \frac{X_{Г1}}{n_{Г1}} + \frac{X_{Л}}{n_{Л}}; \quad (38)$$

$$X_1 = 0,257;$$

$$X_2 = \frac{X_{T2}}{n_{T2}}; \quad (39)$$

$$X_2 = 0,157.$$

Найдем сопротивление шунта при КЗ:

$$X_3 = \frac{X_{d'}}{n_2} + \frac{X_{T1}}{n_{T1}} + \frac{X_{Л}}{n_{Л}}; \quad (40)$$

$$X_3 = 0,244;$$

$$X_{1\text{экв.О.П}} = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2}; \quad (41)$$

$$X_{1\text{экв.О.П}} = 0,097;$$

$$X_{ш1} = X_{1\text{экв.О.П}} = 0,097; \quad (42)$$

$$X_{ав.р.1} = X_1 + X_2 + \frac{X_2 \cdot X_3}{X_{ш1}}; \quad (43)$$

$$X_{ав.р.1} = 0,793;$$

$$P_{ав1} = \frac{E'_{q2} \cdot U_C}{X_{ав.p.1}}; \quad (44)$$

$$P_{ав1} = 1,971.$$

3) Второй аварийный режим (отключился выключатель Q2):

$$X_4 = \frac{X_2}{n_2} + \frac{X_{T1}}{n_{T1}}; \quad (45)$$

$$X_4 = 0,11;$$

$$X_5 = X_{Л} + \frac{X_{T2}}{n_{T2}}; \quad (46)$$

$$X_5 = 0,451;$$

$$X_{2экв.О.П} = \frac{(X_4 + X_5)}{X_4 + X_5} + X_{Л}; \quad (47)$$

$$X_{2экв.О.П} = 0,383;$$

$$X_{ш2} = X_{2экв.О.П}; \quad (48)$$

$$X_6 = \frac{X'_d}{n_2} + \frac{X_{T1}}{n_{T1}}; \quad (49)$$

$$X_6 = 0,096;$$

$$X_7 = \frac{X_{T2}}{n_{T2}} + X_{Л}; \quad (50)$$

$$X_7 = \frac{0,314}{2} + 0,294 = 0,451;$$

$$X_{ав.р.2} = X_6 + X_7 + \frac{(X_7 + X_6)}{X_{Л} + X_{ш2}}; \quad (51)$$

$$X_{ав.р.2} = 0,096 + 0,451 + \frac{(0,451 + 0,096)}{0,294 + 0,383} = 0,612;$$

$$P_{ав2} = \frac{E'_{q2} \cdot U_C}{X_{ав.р.2}}; \quad (52)$$

$$P_{ав2} = \frac{1,56 \cdot 1}{0,612} = 2,554.$$

4) Послеаварийный режим (отключился выключатель Q1):

$$X_{n/a} = \frac{X'_d}{4} + \frac{X_{T1}}{4} + X_{Л} + \frac{X_{T2}}{2}; \quad (53)$$

$$X_{n/a} = \frac{0,21}{3} + \frac{0,079}{3} + 0,294 + \frac{0,314}{2} = 0,548;$$

$$P_{n/a} = \frac{E'_{q2} \cdot U_C}{X_{n/a}}; \quad (54)$$

$$P_{n/a} = \frac{1,563 \cdot 1}{0,548} = 2,854;$$

Критическое значение угла δ :

$$\delta_{кр} = \pi - \arcsin\left(\frac{P_H}{P_{n/a}}\right); \quad (55)$$

$$\delta_{кр} = 3,14 - \arcsin\left(\frac{1,667}{2,854}\right) = 2,518 \text{ рад};$$

Значение δ_0 :

$$\delta_0 = \arcsin\left(\frac{P_H}{P_{н.р.}}\right); \quad (56)$$

$$\delta_0 = \arcsin\left(\frac{1,667}{3,902}\right) = 25,287^\circ.$$

Расчет площадок торможения и ускорения не производится из-за того, что существующие формулы рассчитаны для случая аварии, когда линия отключается сразу [44].

По полученным значениям мощностей нормального, первого аварийного, второго аварийного, и послеаварийного режимов строим угловые характеристики мощности который представлены на рисунке 7:

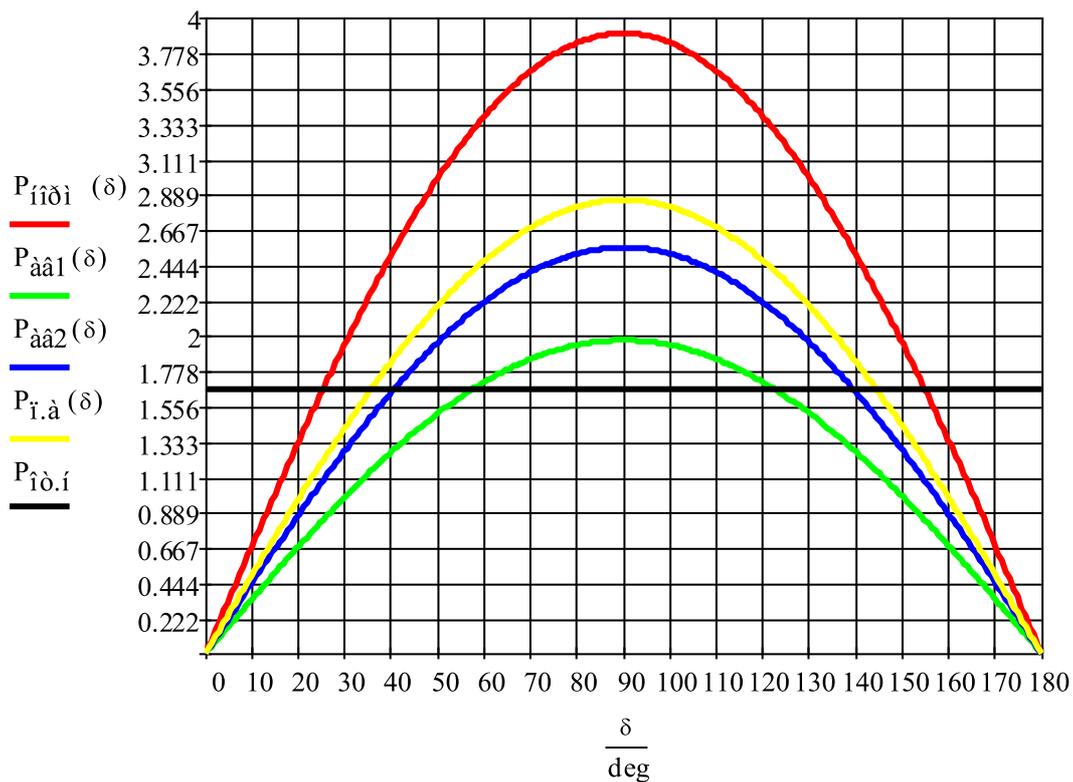


Рисунок 7 – Угловые характеристики мощности режимов

Так как максимально возможная площадка ускорения (для всех режимов) намного меньше площадки торможения, то проблем с устойчивостью нет [45].

Приближенный расчет динамической устойчивости методом последовательных интервалов

При приближённом расчёте метод последовательных интервалов используется для численного интегрирования дифференциального уравнения. В результате определяются зависимости $\delta = f(t)$ и $a = f(t)$. При этом переходный процесс разбивается на малые отрезки времени ($\Delta t = 0,05$ с), на протяжении которых ускорение a считается неизменным.

Порядок расчёта следующий:

1) Определяется разность между мощностью турбины и мощностью генератора (на примере первого интервала):

$$a_{(1)} = \frac{(P_H - P_{a\delta 1} \cdot \sin(\delta_0)) \cdot 314}{T_{J\Sigma}}; \tag{57}$$

$$a_{(1)} = \frac{(3,9 - 1,971 \cdot \sin(25,287)) \cdot 314}{15} = 17,274;$$

$$\text{где } T_{J,\Sigma} = T_J \cdot \frac{n_z \cdot S_{z,\text{ном}}}{S_\sigma}; \quad (58)$$

$$T_{J,\Sigma} = 5 \cdot \frac{3 \cdot 180}{180};$$

$$\Delta\delta_{(1)} = \frac{a_{(1)}}{2} \cdot \Delta t^2; \quad (59)$$

$$\Delta\delta_{(1)} = \frac{17,274}{2} \cdot 0,05^2 = 0,022 \text{ рад/с}^2;$$

$$\delta_{(1)} = \delta_0 + \Delta\delta_{(1)}; \quad (60)$$

$$\delta_{(1)} = 0,441 + 0,022 = 0,463 \text{ рад.}$$

При отключении КЗ либо при успешном АПВ, когда разность мощностей внезапно изменяется от $\Delta P'_{(n)}$ до $\Delta P''_{(n)}$, приращение угла в $n + 1$ интервале определяется по выражению [48]:

$$\Delta\delta_{(n+1)} = \Delta\delta_{(n)} + \frac{1}{2} \cdot (a'_{(n)} + a''_{(n)}) \cdot \Delta t^2. \quad (61)$$

По рассмотренному алгоритму расчёт продолжается либо до начала уменьшения угла δ , что свидетельствует о сохранении устойчивости, либо до предельного по условиям устойчивости угла δ_{KP} .

Результаты расчёта записываем в таблицу 14.

Таблица 14 – Приближенный расчёт динамической устойчивости

Интервал	δ , рад	a , рад/с ²
1	0,463	17,274
2-1	0,519	16,464
2-2	0,519	11,,013
3	0,611	14,429
4-1	0,708	3,765
4-2	0,708	0,622
5	0,796	-3,978
6	0,864	-7,796
7-1	0,912	-10,54
7-2	0,912	-5,768
8	0,941	5,467
9	0,947	4,087

Подробный расчёт приведен в приложении А. По этим данным строим зависимости $\delta = f(t)$ и $a = f(t)$

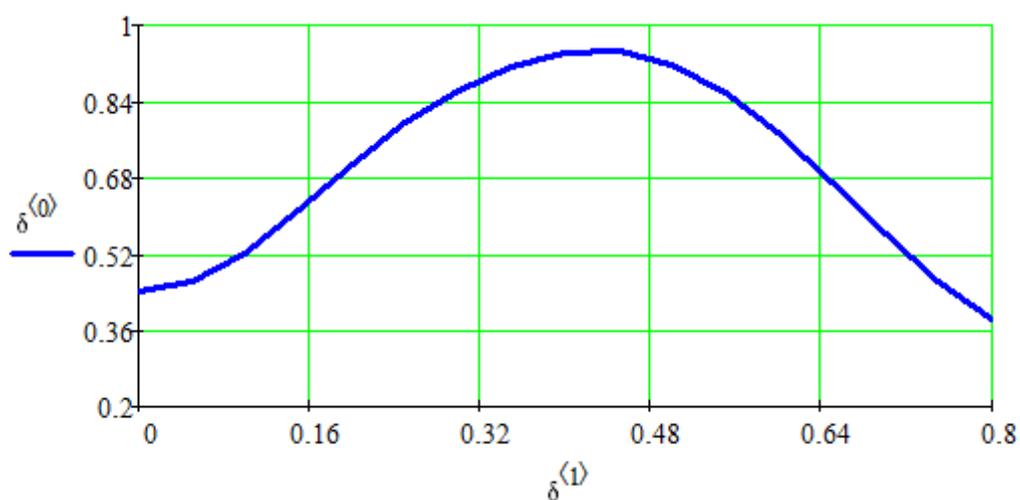


Рисунок 8 – Зависимость угла от времени

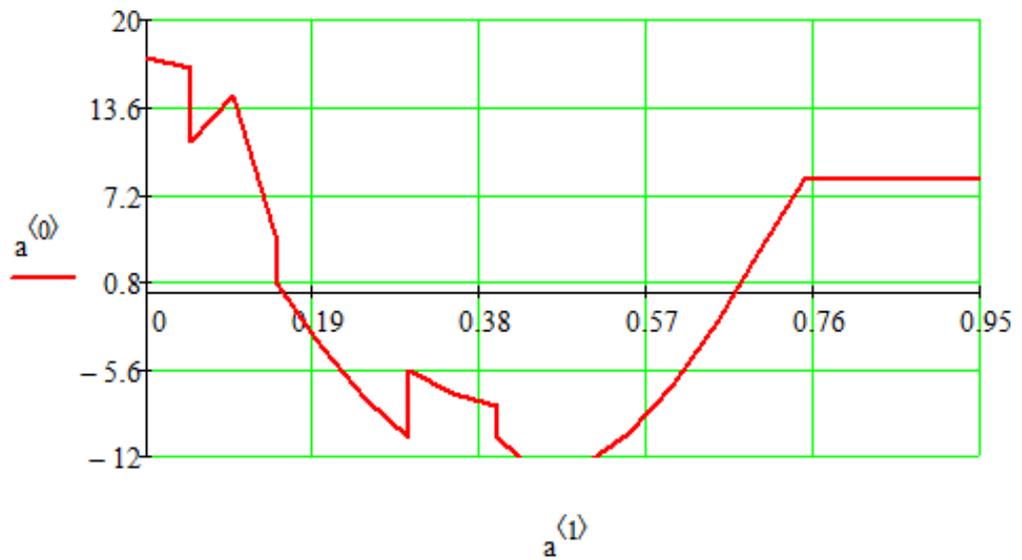


Рисунок 9 – Зависимость ускорения от времени

Уточненный расчет динамической устойчивости

При выполнении уточнённого расчёта для конкретности принимается, что изменение синхронной ЭДС E_{qe} происходит до установившегося значения по экспоненциальному закону с постоянной времени T_e . Максимальная кратность тока возбуждения и соответствующая ЭДС принимается равной $k_{форс} = 5$. При этом к дифференциальному уравнению движения ротора добавляется дифференциальное уравнение переходной ЭДС и уравнение изменения синхронной ЭДС:

$$T_{d0} \cdot \frac{dE'_q}{dt} = E_{qe} - E_q; \quad (62)$$

$$E_{qe(i)} = E_{qe(0)} \cdot (k_{форс} - (k_{форс} - 1) \cdot e^{-\frac{(t(i))}{T_e}}) \quad (63)$$

где T_{d0} - постоянная времени обмотки возбуждения;

T_e - постоянная времени возбудителя.

ЭДС E_q является величиной переменной. Для генератора при электропередаче ее изменение во времени описывается выражением:

$$E_Q(t) = \frac{E'_q(t) - \frac{U_H}{X_{12}^{(n)}} \cdot \left(\frac{X_q}{3} - \frac{X'_d}{3} \right) \cdot \cos(\delta_0)}{1 - \frac{\frac{X_q}{3} - \frac{X'_d}{3}}{X_{11}^{(n)}}}. \quad (64)$$

При выполнении уточнённого расчёта с учётом реакции якоря и действия АРВ совместно с уравнением движения ротора решается дифференциальное уравнение. Расчёт выполняется в следующем порядке:

1) Для исходного режима определяются величины начального угла δ_0 , E'_{q0} , $E_{q0} = E_{qe0} = E_q$ и среднее значение $E_{qe(1)cp}$ за расчетный интервал времени.

2) Вычисляются взаимные индуктивные сопротивления $X_{12}^{(n)}$ для всех расчетных ситуаций. При этом гидрогенератор вводится в схему замещения сопротивлением X_q .

3) Вычисляется ЭДС для первого момента нарушения режима $E_{q(0)}$.

4) Определяется изменение переходной ЭДС в течение первого расчетного интервала:

$$\Delta E'_{q(1)} = \frac{E_{qe(1)cp} - E_{q(0)}}{T_{d0}} \cdot \Delta t. \quad (65)$$

Определяется величина переходной ЭДС в конце первого интервала:

$$E'_{q(1)} = E'_{q(0)} + \Delta E'_{q(1)}. \quad (66)$$

5) Находится активная мощность генератора в начале первого интервала:

$$P_{(0)} = \frac{E_{q(0)} \cdot U_H}{X_{12}^{(n)}} \cdot \sin \delta. \quad (67)$$

Находится небаланс мощности:

$$\Delta P_0 = P_H - P_{(0)}. \quad (68)$$

6) По методу последовательных интервалов определяются приращения угла $\Delta \delta_{(1)}$ и угол $\delta_{(1)}$ в начале следующего интервала.

7) В результате расчета определяют значения $E'_{q(1)}$ и $\delta_{(1)}$ в начале второго интервала, по которым определяется величина ЭДС E_q и повторяется расчет для следующего интервала.

$$E_{qe1} = 2,633 \cdot (5 - (5 - 1) \cdot e^{-(0,05/0,25)}) = 2,869; \quad (69)$$

$$E_{qe1cp} = \frac{E_{qe0} + E_{qe1}}{2}; \quad (70)$$

$$E_{qe1cp} = \frac{2,397 + 2,869}{2} = 2,633.$$

Необходимо пересчитать индуктивные сопротивления всех характерных режимов системы. Для этого в формулах п. 3.2 следует заменить сопротивление

генератора X'_d на сопротивление X_q . Результаты пересчета сводим в таблицу 15.

Таблица 15 – Взаимные сопротивления для уточненного расчета ДУ

Сопротивление	Значение, Ом
$X_{11н.р.}$	0,257
$X_{12н.р.}$	0,274
$X_{11ав.1}$	0,334
$X_{12ав.1}$	0,872
$X_{11ав.2}$	0,397
$X_{12ав.2}$	0,662

Находим синхронную ЭДС для первого момента нарушения режима:

$$E_{q0} = 2,703. \quad (71)$$

Находим изменение переходной ЭДС в течение первого расчетного интервала:

$$\Delta E'_{q1} = \frac{2,633 - 2,603}{5,42} \cdot 0,05 = 0,006. \quad (72)$$

Находим величину переходной ЭДС в конце первого интервала:

$$E'_{q1} = 1,563. \quad (73)$$

Находим небаланс на валу системы:

$$\Delta P_1 = 0,287. \quad (74)$$

Находим ускорение:

$$a_1 = 5,999 \text{ рад/с}^2. \quad (75)$$

Находим изменение угла:

$$\Delta \delta_1 = 0,007 \text{ рад}. \quad (76)$$

Находим значение угла к концу интервала:

$$\delta_1 = \delta_0 + \Delta \delta_1; \quad (77)$$

$$\delta_1 = 0,461 + 0,007 = 0,469 \text{ рад}.$$

В случае скачкообразного изменения режима учитываем тот факт, что переходная ЭДС E'_q скачком не изменяется, вследствие этого находятся два значения E'_q и определяется средняя за интервал. Подробный расчет приведен в приложении А. Расчетные данные сведены в таблицу 16.

Таблица 16 – Уточненный расчет ДУ методом последовательных интервалов

Интервал	E_Q	E_{qe}	E'_q	a , рад/с ² .	δ , рад.
1	2,703	2,869	1,563	17,274	0,463
2-1	1,619	3,255	1,577	16,464	0,519
2-2	1,606	3,255	1,577	11,013	0,519
3	2,77	3,571	1,89	14,429	0,611
4-1	1,6	3,83	1,59	3,765	0,708
4-2	1,6	5,019	1,919	0,622	0,708

5	1,656	4,042	1,586	-3,978	0,796
6	1,652	4,216	1,571	-7,796	0,864
7-1	1,557	2,358	1,596	-10,54	0,912
7-2	1,601	2,452	1,602	-5,768	0,912
8	2,566	4,474	1,624	-6,456	0,941
9-1	1,625	4,57	2,144	-12,165	0,947
9-2	1,686	4,57	1,648	0,654	0,951
10	1,714	4,648	1,674	14,432	0,956

По этим данным строим графики зависимостей для электрической системы.

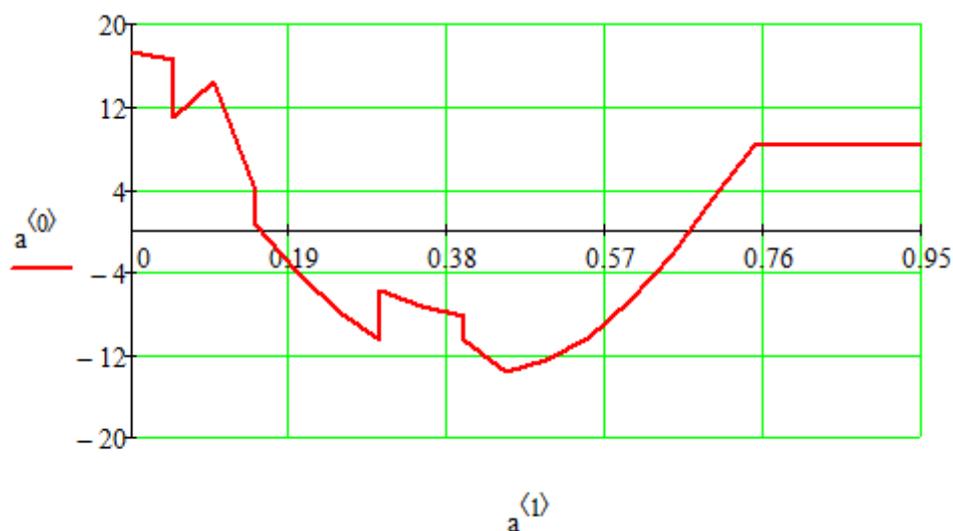


Рисунок 10– Зависимость a от времени

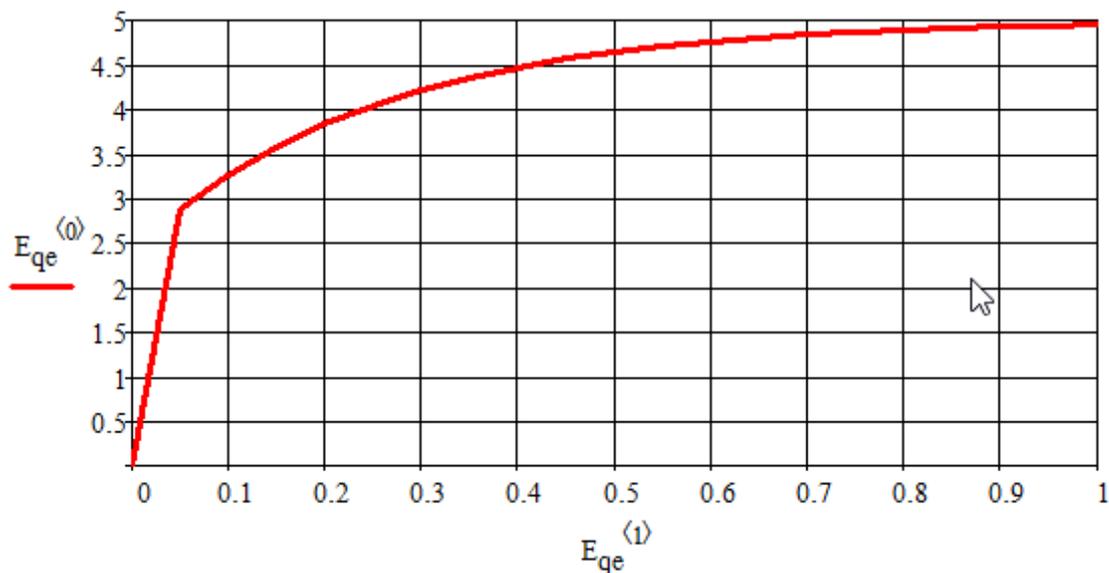


Рисунок 11 – Зависимость E_{qe} от времени

4.4 Расчет устойчивости нагрузки

В нагрузках при подключении их к сети, при изменениях условий их работы или нарушениях режима системы происходят переходные процессы. Изучая эти процессы как разновидности переходных процессов в системах, обычно рассматривают не отдельные нагрузки, а узлы нагрузок или так называемую объединенную нагрузку [47]. Расчет производим для трех случаев, в зависимости от типа используемой системы возбуждения турбогенератора.

Комплексное сопротивление нагрузки:

$$Z_H = \frac{S_{\bar{\sigma}}}{P_H} \cdot (\cos \varphi + j \cdot \sin \varphi); \quad (78)$$

$$Z_H = 0,494 + j0,319.$$

1) Выключатель Q3 выключен. Напряжение на шинах нагрузки неизменно:

Активное сопротивление эквивалентного двигателя зависит от его скольжения (проявляется поверхностный эффект в стержнях обмотки ротора):

$$R_2 = R_H \cdot s_0; \quad (79)$$

$$R_2 = 0,434 \cdot 0,03 = 0,013.$$

где s_0 – номинальное скольжение, $s_0 = 0,03$.

$$S_{кр.U} = \frac{R_2}{X_H}; \quad (80)$$

$$S_{кр.U} = \frac{0,013}{0,469} = 0,028;$$

$$U_{нагр.кр} = \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot X_H} = 0,968. \quad (81)$$

Максимальная мощность нагрузки, которую двигатель может вращать без нарушения его устойчивой работы:

$$P_{max} = \frac{U_C^2}{2 \cdot X_H}; \quad (82)$$

$$P_{max} = \frac{1^2}{2 \cdot 0,469} = 1,066.$$

Коэффициент запаса устойчивости по мощности:

$$K_{занP} = \frac{P_{max} - P_0}{P_{max}} \cdot 100; \quad (83)$$

$$K_{занP} = \frac{1.067 - 1}{1.067} \cdot 100 = 6,19.$$

Коэффициент запаса устойчивости по скольжению:

$$K_{занP} = \frac{S_{крU} - S_0}{S_0} \cdot 100 = 6,66. \quad (84)$$

2) Генератор без АРВ:

$$X_{\Sigma 1} = X_{ГЭК\delta 1} + X_c + \text{Im}(z_H); \quad (85)$$

$$X_{\Sigma 1} = 0,469;$$

$$S_{кр1} = R_2 / X_{\Sigma 1}; \quad (86)$$

$$S_{кр1} = 0.013 / 0.469 = 0.028.$$

Определим величину критической ЭДС:

$$E_{зкр1} = \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot X_{\Sigma 1}}; \quad (87)$$

$$E_{зкр1} = \sqrt{2 \cdot 1,63 \cdot 0,469} = 0,968.$$

Зная величину критической ЭДС, можем определить соответствующее ей критическое напряжение на шинах нагрузки:

$$U_{нкр} = \sqrt{\left[E_{экр1} - \frac{Q_0 \cdot (X_{э.о} + X_c)}{E_{экр1}} \right]^2 + \left[\frac{P_0 \cdot (X_{э.о} + X_c)}{E_{экр1}} \right]^2}; \quad (88)$$

$$U_{нкр} = 0,83$$

Определим запас статической устойчивости по напряжению:

$$K_{зан.U1} = \frac{U_0 - U_{НАГР.КР.1}}{U_0} \cdot 100; \quad (89)$$

$$K_{зан.U1} = 17,04.$$

Так как коэффициент запаса по напряжению положителен и критическое скольжение больше номинального скольжения, то можно сделать вывод о статической устойчивости узла нагрузки.

3) Генератор с АРВ ПД:

$$X_{\Sigma 2} = X_{ГЭК62} + X_C + X_H; \quad (90)$$

$$X_{\Sigma 2} = 0,439;$$

$$S_{KP2} = R_2 / X_{\Sigma 2}; \quad (91)$$

$$S_{KP2} = 0.013 / 0.439 = 0,03.$$

Определим величину критической ЭДС:

$$E_{ГKP2} = \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot X_{\Sigma 2}}; \quad (92)$$

$$E_{зкр1} = \sqrt{2 \cdot 1,63 \cdot 0,439} = 0,937.$$

Зная величину критической ЭДС, можем определить соответствующее ей критическое напряжение на шинах нагрузки:

$$U_{нкр} = \sqrt{\left[E_{зкр1} - \frac{Q_0 \cdot (X_{z.o} + X_c)}{E_{зкр1}} \right]^2 + \left[\frac{P_0 \cdot (X_{z.o} + X_c)}{E_{зкр1}} \right]^2}; \quad (93)$$

$$U_{нкр} = 0,808.$$

Определим запас статической устойчивости по напряжению:

$$K_{зан.U2} = \frac{U_0 - U_{НАГР.КР.2}}{U_0} \cdot 100; \quad (94)$$

$$K_{зан.U1} = 19,2.$$

Так как коэффициент запаса по напряжению положителен, то можно сделать вывод о статической устойчивости узла нагрузки.

4) Генератор с АРВ СД:

$$X_{\Sigma 3} = X_{ГЭК\delta 3} + X_C + X_H; \quad (95)$$

$$X_{\Sigma 3} = 0,369;$$

$$S_{КР3} = R_2 / X_{\Sigma 3}; \quad (96)$$

$$S_{КР3} = 0.013 / 0.369 = 0,035.$$

Определим величину критической ЭДС:

$$E_{ГКР3} = \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot X_{\Sigma 3}}; \quad (97)$$

$$E_{\text{кр}3} = \sqrt{2 \cdot 1,63 \cdot 0,369} = 0,859.$$

Зная величину критической ЭДС, можем определить соответствующее ей критическое напряжение на шинах нагрузки:

$$U_{\text{нкр}} = \sqrt{\left[E_{\text{кр}1} - \frac{Q_0 \cdot (X_{\text{г.о}} + X_c)}{E_{\text{кр}1}} \right]^2 + \left[\frac{P_0 \cdot (X_{\text{г.о}} + X_c)}{E_{\text{кр}1}} \right]^2}; \quad (98)$$

$$U_{\text{нкр}} = 0,763.$$

Определим запас статической устойчивости по напряжению:

$$K_{зан.U3} = \frac{U_0 - U_{НАГР.КР.3}}{U_0} \cdot 100; \quad (99)$$

$$K_{зан.U1} = 23,6.$$

Так как коэффициент запаса по напряжению положителен, то можно сделать вывод о статической устойчивости узла нагрузки [49].

Статическая устойчивость типовой нагрузки

Критерием устойчивости асинхронных электродвигателей, входящих в состав типовой комплексной нагрузки, является неравенство:

$$\frac{dE}{dU} > 0. \quad (100)$$

Для применения данного критерия следует определить зависимость $E_r = f(U)$, задаваясь различными значениями напряжения U_H и определяя соответствующие значения мощностей по статическим характеристикам типовой нагрузки (таблица 17).

$$E_r = \sqrt{\left(U_H + \frac{Q_H \cdot X_\Sigma}{U_H} \right)^2 + \left(P_H \cdot \frac{X_\Sigma}{U_H} \right)^2}, \quad (101)$$

Здесь суммарное сопротивление зависит от вида регулирования.

Таблица 17 – Характеристика типовой нагрузки

U.нагр, о.е.	1	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7
P.нагр, о.е.	1	0,969	0,941	0,916	0,893	0,872	0,855
Q.нагр. о.е.	1	0,93	0,885	0,858	0,844	0,848	0,880

По результатам строим зависимости $E_r = f(U)$ и определяем с их помощью коэффициенты запаса статической устойчивости типовой нагрузки [52].

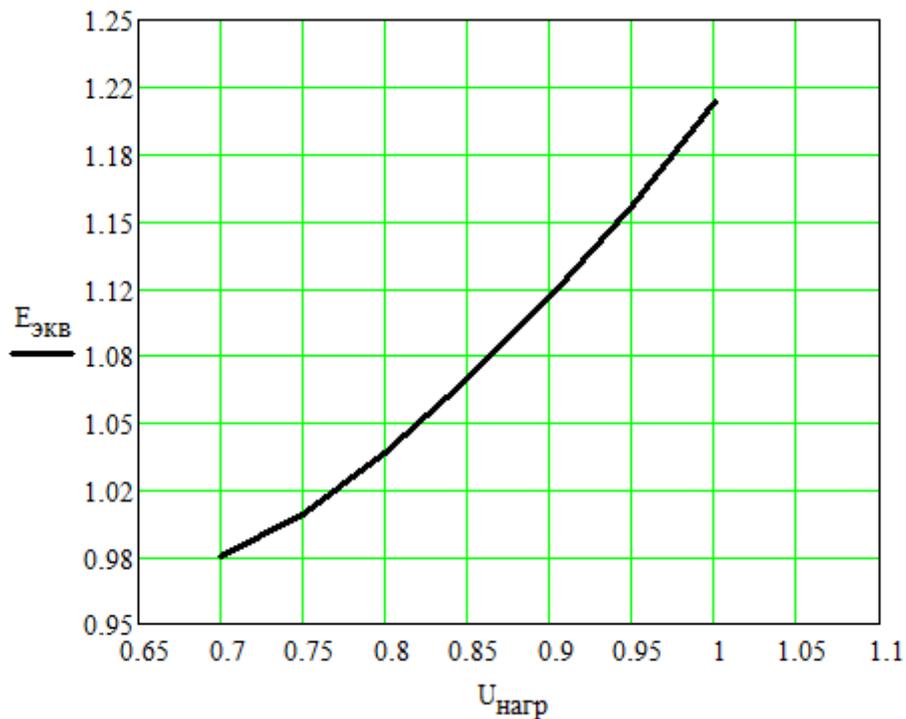


Рисунок 12 – Зависимость $E_{\text{экв}}$ от $U_{\text{нагр}}$

$$K_{\text{зан.}U4} = \frac{U_0 - U_{\text{НАГР.КР.А}}}{U_0} \cdot 100; \quad (102)$$

$$K_{\text{зан.}U1} = 22.$$

Вывод: нагрузка статически устойчива, наличие АРВ может улучшить устойчивость нагрузки [43].

Динамическая устойчивость асинхронной нагрузки

При расчётах динамической устойчивости не учитываются электромагнитные переходные процессы в обмотках двигателей. Изменение скольжения, обусловленное изменением режима, определяется численным интегрированием уравнения движения асинхронного двигателя:

$$T_j \cdot \frac{ds}{dt} = M_H - M(S). \quad (103)$$

где T_j – постоянная инерции, приведённая к номинальной мощности двигателя;

M_H – номинальный механический момент сопротивления;

$M(S)$ – электромагнитный момент двигателя, определяемый по формуле:

$$M_{(s)} = \frac{2K_{max}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} \cdot \left(\frac{U_g}{U_H} \right)^2. \quad (104)$$

Конечное преобразование формулы имеет вид:

$$s_{к.р.1.2} = \frac{0,054 \pm \sqrt{0,0062}}{2}. \quad (105)$$

Подкоренное выражение оказалось положительным. Это означает, что при перерыве электроснабжения самозапуск двигателя обеспечивается.

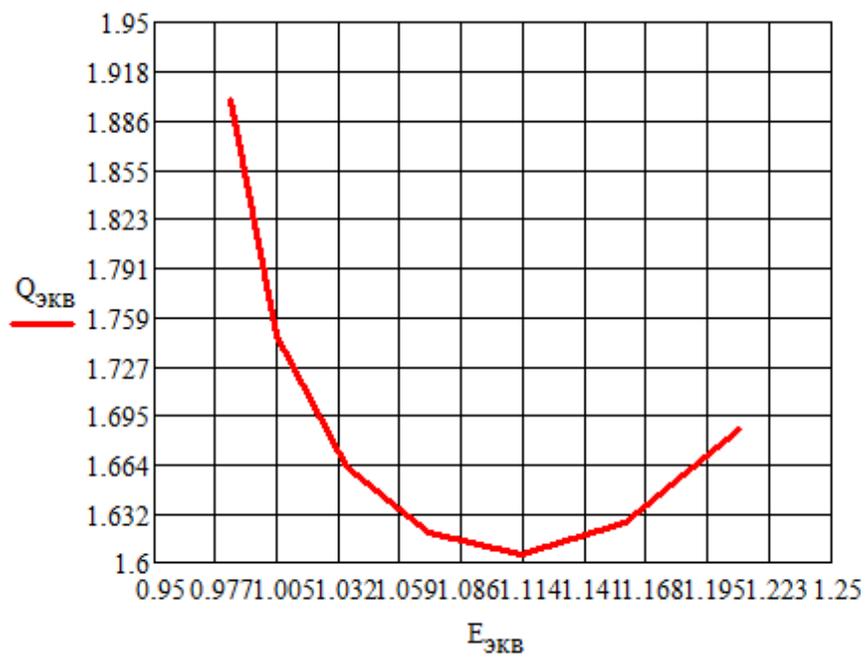


Рисунок 13 – Зависимость $Q_{ЭКВ}$ от $E_{ЭКВ}$

5 ОЦЕНКА ГЕНЕРАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В режиме холостого хода нагрузка в конце линии принимается равной нулю. Это соответствует режиму одностороннего отключения линии или полному сбросу нагрузки.

Основной особенностью режима холостого хода ЛЭП является наличие большой избыточной реактивной мощности, генерируемой линией, и как следствие, повышение напряжения [17].

При ведении режимов ХХ дальних электропередач возникает ряд трудностей. Зарядная мощность линии может значительно превышать номинальную мощность генератора, подключаемого к передаче, что приведет к недопустимой его перегрузке. С наличием большой зарядной мощности связано и повышение напряжения на линии электропередачи.

Мощность реакторов на линиях передач переменного тока обычно определяется из условий работы в режимах холостого хода. Для обеспечения желаемого распределения напряжения вдоль линии их целесообразно размещать равномерно. Однако единичная стоимость компенсирующих устройств резко увеличивается при уменьшении их мощности, кроме того, компенсирующие устройства требуют для своего присоединения дорогостоящего оборудования. Все это исключает возможность равномерно распределенной компенсации и реакторы обычно устанавливаются на подстанциях или переключательных пунктах.

На ПС Тында установлен УШР 220/100. Проверим хватит ли его мощности если одна цепь НГРЭС – ПС Тында перейдет в режим холостого хода, при новых нагрузках. В установившемся режиме генерация реактивной мощности составляет 5%.

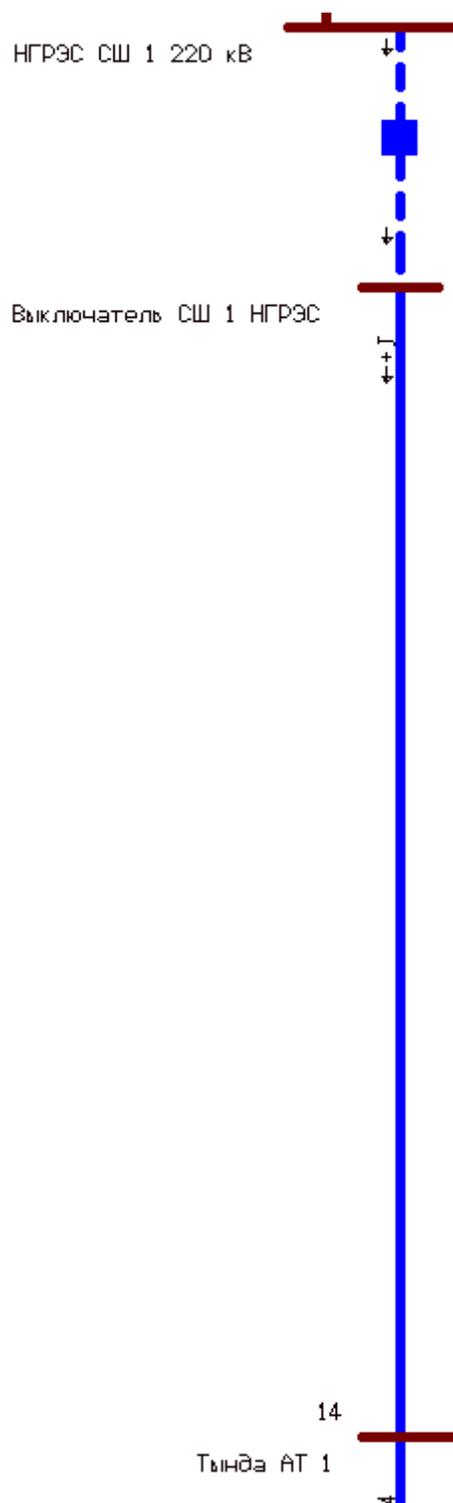


Рисунок 14 – Смоделированный участок для холостого хода ЛЭП

При работе ЛЭП в режиме холостого хода генерация реактивной мощности возросла на 10 % что находится в допустимых пределах. Установленный УШР на ПС Тында справляется со своей задачей и замене на более мощный не подлежит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации был выполнен ряд инженерных задач, показывающий уровень подготовки магистранта.

В магистерской диссертации проведен структурный и режимный анализ существующей сети Амурской области. По результатам анализа выявлены слабые места электрической сети данного энергорайона. Для дальнейших разработок произведен расчет режимов.

Основу методологии составили теория расчета параметров схем замещения элементов электрической сети, теория расчёта установившихся режимов электрических сетей, оценка статической и динамической устойчивости системы, оценка генерации реактивной мощности.

Произведено техническое обоснование проблемы, в связи с которой было предложено оценить энергетическую систему на статическую и динамическую устойчивость как синхронного режима, так и асинхронного режима. А также оценить генерацию реактивной мощности при работе ЛЭП в режиме холостого хода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Ананичева, С.С. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Методическое пособие / А.Л. Мызин, С.Н. Шелюг. - Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. 2005. - 52 с.
- 2 Повышение пропускной способности ВЛ 110-220 КВ. Анализ технических решений [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://energobud.com.ua/en/konferentsii/10-tretja-mezhdunarodnaja-konferentsija-mgs/67-povyshenie-propusknoj-sposobnosti-vl-110-220-kv-analiz-tehnicheskikh-reshenij> (дата обращения: 24.05.20).
- 3 Высоковольтное оборудование [Электронный ресурс]. URL: <http://www.uetm.ru/products/146/> (дата обращения: 22.05.20).
- 4 Герасимов, В.Г. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова и др. М. : издательство МЭИ, 202. – 964 с.
- 5 ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах.
- 6 Идельчик, В.И. Электрические системы и сети : учеб.пособие / В.И. Идельчик. – М. : Энергоатомиздат, 2009. – 592 с.
- 7 Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем. СО 153-34.20.118.-2003 Утверждено приказом Минэнерго России от 30.06.09 №281
- 8 Мясоедов, Ю.В. Электрические станции и подстанции: Учебное пособие / Ю. В. Мясоедов, Н. В. Савина, А. Г. Ротачева. - Благовещенск: Изд-во АмГУ. 2013.
- 9 Неклепаев, Б. И. Электрическая часть станций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для вузов / Б. И. Неклепаев, И. П. Крючков. - 5-е изд., - Изд-во БХВ - Петербург. 2013. - 608 с.

10 Официальный сайт RastrWin [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// www.rastrwin.ru](http://www.rastrwin.ru). (дата обращения: 19.04.20).

11 Официальный сайт РусГидро [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rushydro.ru/> (дата обращения: 21.03.20).

12 Официальный сайт HoST Bio-energy installations [Электронный ресурс]. URL: <https://www.host.nl/ru/> (дата обращения 19.05.20).

13 Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. - М.: Энергоатомиздат, 2010. - 118 с.

14 Приказ Минэнерго России от 28.02.2019 №174 «Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2019-2025 годы»

15 Приказ от 23 июня 2015 г. № 380 «О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии»

16 Рожкова, Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: учебник для техникумов / Л.Д. Рожкова, Л.К. Карнеева, Т.В. Чиркова – 6-е издание, стереотипное – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 448 с.

17 Савина, Н.В. Проектирование развития электроэнергетических систем и электрических сетей: методические указания к курсовому проектированию / Н.В. Савина. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2013. – 46 с.

18 Справочник по проектированию электрических сетей под ред. Д.Л.Файбисовича - 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.

19 СТО ОАО «ФСК ЕЭС» 56947007-29.240.30.010-2008 «Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ. Типовые решения» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.240.30.010-2008.pdf> (дата обращения 15.05.20).

20 Козлов, А.Н. Электромеханические переходные процессы в электрических системах: учебно – методическое пособие к курсовому

проектированию / А. Н. Козлов, В.А. Козлов, А.С. Степанов. – Благовещенск: АмГУ, 2013. – 111 с.

21 Куликов, Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учебное пособие / Ю.А. Куликов. - М.: Омега-Л, 2013. – 384 с.

22 Ульянов, С.А. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: учебно – методическое пособие к курсовому проектированию / С.А. Ульянов. – М.: Энергия, 2012. – 520 с.

23 Шабад, В.К. Переходные электромеханические процессы в электроэнергетических системах / В.К. Шабад. – М.: ВЗПИ, 2010. – 456 с.

24 Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей, 2009 г.

25 Рожкова, Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: учебник для техникумов / Л.Д. Рожкова, Л.К. Карнеева, Т.В. Чиркова – 6-е издание, стереотипное – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 448 с.

26 ФСК [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fsk-ees.ru/> (дата обращения: 14.03.20).

27 Электрокабель [Электронный ресурс]. URL: <http://elektrokable.ru/> (дата обращения: 12.02.20).

28 Колесник, Г. П. Переходные электромагнитные процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие / Г.П. Колесник. – Владимир, Владим. гос. ун-т. Издательство ВлГУ. 2010. – 128 с.

29 Колесник, Г. П. Переходные электромеханические процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие / Г.П. Колесник. – Владимир, Владим. гос. ун-т. Издательство ВлГУ. 2009. – 116 с.

30 Расчет токов при коротких замыканиях и устойчивости систем электроснабжения по практическим критериям. Методические указания к практическим занятиям / Г.П. Колесник. Владимир, Владим. гос. ун-т. Издательство ВлГУ. 20012. 86 с.

31 Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебник для вузов. / С.А. Ульянов. – М.: Энергия, 2011. – 470 с.

32 Расчет предела статической устойчивости [Электронный ресурс]. URL: https://studopedia.ru/18_2230_raschet-predela-staticheskoj-ustoychivosti-slozhnoy-energosislemi.html (дата обращения: 03.06.20).

33 Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов; под ред. И.П. Крючкова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014 – 416 с.: ил.

33 Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. Изд. 2-е. Учебник для энергетич. спец. вузов. / В.А. Веников. – М.: «Высшая школа», 2011. 472 с. :ил.

35 «Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях»; Учебн. пособие для вузов. / Под ред. Веникова В.А. – М.: Энергоиздат, 2008. - 504с.

36 Жданов, П.С. «Вопросы устойчивости электрических систем». / П.С. Жданов. – М: Энергия, 2013. - 520с.

37 Статическая устойчивость [Электронный ресурс]. URL: <https://iknet.com.ua/ru/static-and-dynamic-stability/> (дата обращения: 01.06.20).

38 Динамическая устойчивость [Электронный ресурс]. URL: <https://pandia.ru/text/79/122/52134.php> (дата обращения: 01.06.20).

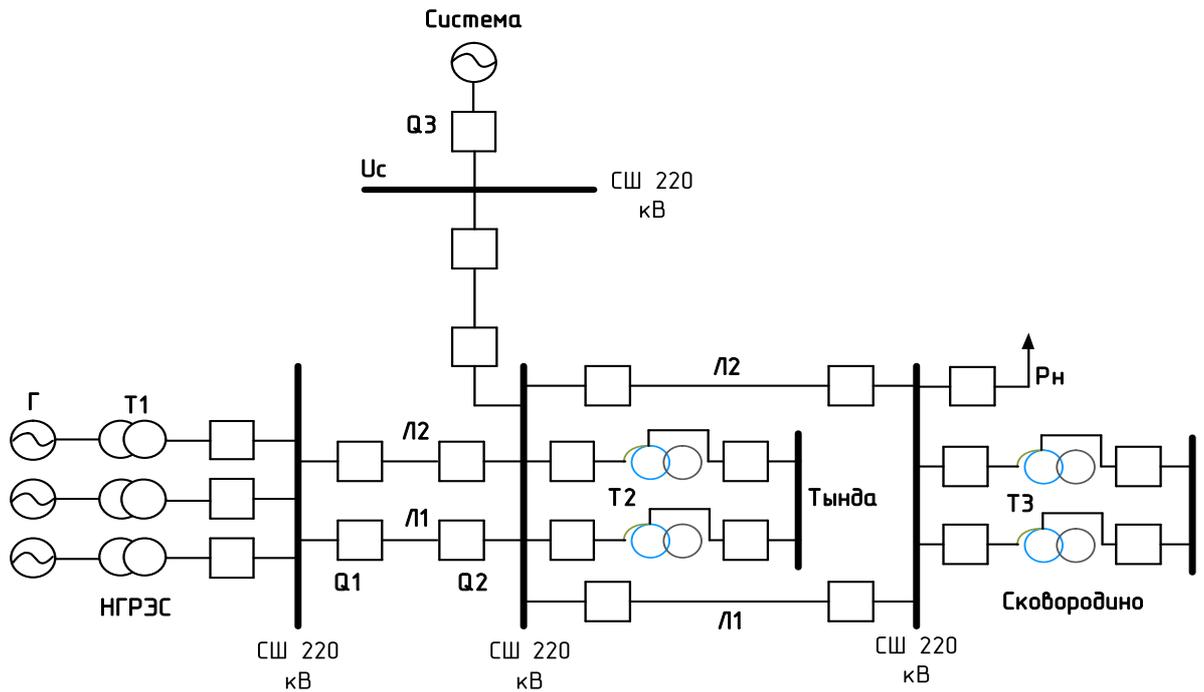
39 Веников В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). Изд. 2-е. доп. и перераб. – М.: Высшая школа, 2010. – 479 с.

40 Электрические системы. Математические задачи энергетики. Изд. 2-е, доп. и перераб./В.А. Веников, Э.Н. Зуев, И.В. Литкенс и др. /Под ред. В.А. Веникова – М.: Высшая школа, 2011. – 288 с.

41 Бермант А.Ф., Арамович И.Г. Краткий курс математического анализа. Изд. 7-е, стереотипное. – М.: Наука, 2007. – 736 с.

- 42 Математические основы теории автоматического регулирования /В.А. Иванов, В.С. Медведев, Б.К. Чемоданов и др. /Под ред. Б.К. Чемоданова. – М.: Высшая школа, 2013. – 808 с.
- 43 Средства улучшения динамической устойчивости [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cpk-energo.ru/metod/u1/mm8.pdf> (дата обращения: 02.06.20).
- 44 Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 2009. – 536 с.
- 45 Руководящие указания по устойчивости энергосистем. Минэнерго СССР. – М.: СПО Союзтехэнерго, 2002. – 11 с.
- 46 Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчёты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 390 с.
- 47 Портной М.Г. Управление энергосистемами для обеспечения устойчивости. – М.: Энергия, 2015. – 352с.
- 48 Расчеты динамической устойчивости [Электронный ресурс]. URL: https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/events/2018/konf_2_190718_prez_01_rez.pdf (дата обращения: 05.06.20).
- 49 Методические указания по устойчивости энергосистем. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2009. – 68 с.
- 50 Хрущев Ю.В. Методы расчета устойчивости энергосистем. Учебное пособие. – Томск: СТУ, 2005. – 176 с.
- 51 Мелешкин Г.А., Меркурьев Г.В. Устойчивость энергосистем. Монография. Книга 1: СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2012. – 369 с.
- 52 Калентиюнок Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем: учебное пособие / Е. В. Калентиюнок. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 375 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15



Генератор	T1	T2	T3	Система
$S_{Г.НОМ} := 180$	$S_{T1.НОМ} := 250$	$S_{T2.НОМ} := 63$	$S_{T3.НОМ} := 63$	$P_H := 300$
$X_d := 1.71$	$u_{КТ1} := 11$	$u_{КТ2} := 11$	$u_{КТ3} := 11$	$\cos\phi := 0.85$
$X_q := 0.3$	$n_{T1} := 3$	$k_{T2} := 1$	$k_{T3} := 1$	$s_o := 0.03$
$X'_d := 0.21$		$n_{T2} := 2$	$n_{T3} := 2$	$T_{j.c} := 6$
$X_{Г2} := 0.25$	Линия	Линия		$U_c := 220$
$T_j := 5.0$	НГРЭС - Тында	Тында - Сковородино		
$T_{do} := 5.42$	$l_1 := 184$	$l_2 := 156.1$		
$T_e := 0.1$	$U_{Л.НОМ1} := 220$	$U_{Л.НОМ2} := 220$		
$n_T := 3$	$x_{O1} := 0.43$	$x_{O2} := 0.43$		

Определение параметров схемы:

$$S_{\sigma} := 180$$

$$U_{\sigma} := 220$$

$$X_{от.Т1} := \frac{u_{КТ1}}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{T1.НОМ}} = 0.079$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$X_{от.т2} := \frac{u_{кт2}}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{т2.ном}} = 0.314$$

$$X_{от.л1} := x_{о1} \cdot l_1 \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{\sigma}^2} = 0.294$$

$$U_{от.с} := \frac{U_c}{U_{\sigma}} \cdot k_{т2} = 1$$

$$P_{от.н} := \frac{P_H}{S_{\sigma}} = 1.667$$

$$Q_{от.н} := P_{от.н} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \cos\phi)^2}}{\cos\phi} = 1.033$$

Расчет исходного установившегося режима:

Без АРВ:

$$X_{г.экв.1} := \frac{X_q}{n_{г}} = 0.1$$

$$X_{внеш} := \frac{X_{от.т1}}{n_{г1}} + \frac{X_{от.л1}}{2} + \frac{X_{от.т2}}{2} = 0.331$$

$$E_Q := \sqrt{\left[U_{от.с} + \frac{Q_{от.н} \cdot (X_{г.экв.1} + X_{внеш})}{U_{от.с}} \right]^2 + \left[\frac{P_{от.н} \cdot (X_{г.экв.1} + X_{внеш})}{U_{от.с}} \right]^2} = 1.613$$

$$\delta_{оQ} := \operatorname{atan} \left[\frac{P_{от.н} \cdot (X_{г.экв.1} + X_{внеш})}{U_{от.с}^2 + Q_{от.н} \cdot (X_{г.экв.1} + X_{внеш})} \right] = 0.461$$

$$\frac{\delta_{оQ}}{\operatorname{deg}} = 26.418$$

С АРВПД:

$$X_{г.экв.2} := \frac{X'_d}{n_{г}} = 0.07$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$E' := \sqrt{\left[U_{от.с} + \frac{Q_{от.н} \cdot (X_{Г.ЭКВ.2} + X_{ВНЕШ})}{U_{от.с}} \right]^2 + \left[\frac{P_{от.н} \cdot (X_{Г.ЭКВ.2} + X_{ВНЕШ})}{U_{от.с}} \right]^2} = 1.564$$

$$\delta'_{о} := \text{atan} \left[\frac{P_{от.н} \cdot (X_{Г.ЭКВ.2} + X_{ВНЕШ})}{U_{от.с}^2 + Q_{от.н} \cdot (X_{Г.ЭКВ.2} + X_{ВНЕШ})} \right] = 0.441$$

$$\frac{\delta'_{о}}{\text{deg}} = 25.282$$

$$E'_{q2} := E' \cdot \cos(\delta_{оQ} - \delta'_{о}) = 1.563$$

САРВСД:

$$X_{Г.ЭКВ.3} := 0$$

$$U_{Г} := \sqrt{\left[U_{от.с} + \frac{Q_{от.н} \cdot (X_{ВНЕШ})}{U_{от.с}} \right]^2 + \left[\frac{P_{от.н} \cdot (X_{ВНЕШ})}{U_{от.с}} \right]^2} = 1.45$$

$$\delta_{ou} := \text{atan} \left[\frac{P_{от.н} \cdot (X_{ВНЕШ})}{U_{от.с}^2 + Q_{от.н} \cdot (X_{ВНЕШ})} \right] = 0.39$$

$$\frac{\delta_{ou}}{\text{deg}} = 22.333$$

$$U_{Гq2} := U_{Г} \cdot \cos(\delta_{оQ} - \delta_{ou}) = 1.447$$

Расчет статической устойчивости:

$$X_{d\Sigma} := \frac{X_d}{n_{Г}} + X_{ВНЕШ} = 0.901$$

$$X_{q\Sigma} := \frac{X_q}{n_{Г}} + X_{ВНЕШ} = 0.431$$

$$X_{d'\Sigma} := \frac{X'_d}{n_{Г}} + X_{ВНЕШ} = 0.401$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Без АРВ:

$$E_{qЯ} := E_Q \cdot \frac{X_d - X'_d}{X_q - X'_d} - E'_{q2} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_q - X'_d} = 2.397$$

$$P_{mEqЯ} := \frac{E_{qЯ} \cdot U_{от.с}}{X_{d\Sigma}} = 2.661$$

$$k_{зап.ст.1} := \frac{P_{mEqЯ} - P_{от.н}}{P_{mEqЯ}} \cdot 100 = 37.365$$

$$P_{mEqЯ}(\delta) := \frac{E_{qЯ} \cdot U_{от.с}}{X_{d\Sigma}} \cdot \sin(\delta) + \frac{U_{от.с}^2}{2} \cdot \frac{\left(\frac{X_d}{n_\Gamma} - \frac{X_q}{n_\Gamma} \right)}{X_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma}} \cdot \sin(2 \cdot \delta)$$

С АРВ ПД:

$$P_{mE'q} := \frac{E'_{q2} \cdot U_{от.с}}{X_{d'\Sigma}} = 3.902$$

$$k_{зап.ст.2} := \frac{P_{mE'q} - P_{от.н}}{P_{mE'q}} \cdot 100 = 57.284$$

$$P_{mE'q}(\delta) := \frac{E'_{q2} \cdot U_{от.с}}{X_{d'\Sigma}} \cdot \sin(\delta) - \frac{U_{от.с}^2}{2} \cdot \frac{\left(\frac{X_q}{n_\Gamma} - \frac{X'_d}{n_\Gamma} \right)}{X_{q\Sigma} \cdot X_{d'\Sigma}} \cdot \sin(2 \cdot \delta)$$

С АРВ СД:

$$P_{mUГq} := \frac{U_{Гq2} \cdot U_{от.с}}{X_{внеш}} = 4.375$$

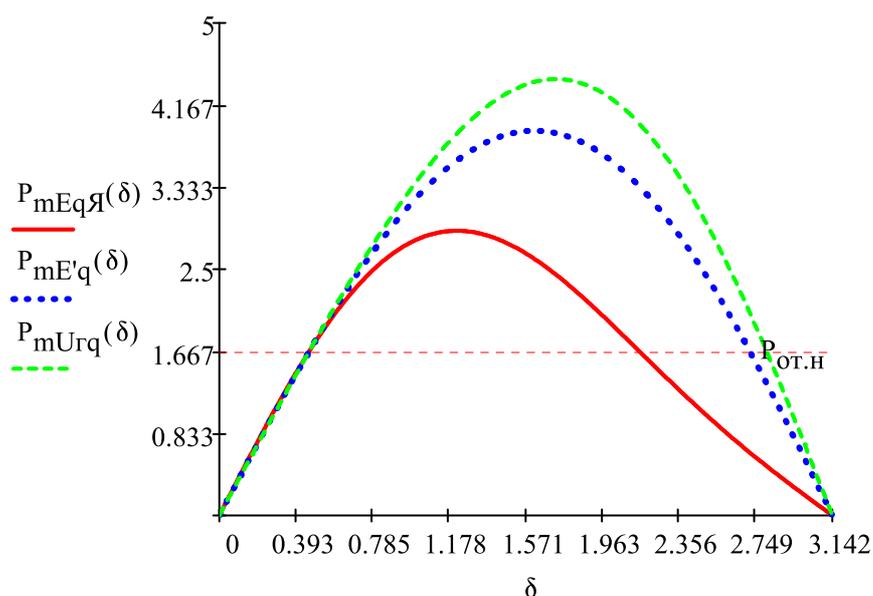
$$k_{зап.ст.3} := \frac{P_{mUГq} - P_{от.н}}{P_{mUГq}} \cdot 100 = 61.904$$

Так как все коэффициенты статической устойчивости больше 20%, то они удовлетворяют условию статической устойчивости системы в нормальном режиме.

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$P_{mU_{Г2}}(\delta) := \frac{U_{Г2} \cdot U_{от.с}}{X_{внеш}} \cdot \sin(\delta) - \frac{U_{от.с}^2}{2} \cdot \frac{\frac{X_q}{n_{Г}}}{X_{q\Sigma} \cdot X_{внеш}} \cdot \sin(2 \cdot \delta)$$

$$\delta := 0, 0.01 .. \pi$$



Расчет динамической устойчивости:

Генератор вводится переходным сопротивлением X'_d

$$X'_d = 0.21$$

Нормальный режим

$$X_{н.р} := \frac{X'_d}{n_{Г}} + X_{внеш} = 0.401$$

$$X_1 := \frac{X_{Г2}}{n_{Г}} + \frac{X_{от.Г1}}{n_{Г1}} + \frac{X_{от.Л1}}{2} = 0.257$$

$$X_2 := \frac{X_{от.Г2}}{2} = 0.157$$

$$X_{1экв.О.П.} := \frac{(X_1 \cdot X_2)}{(X_1 + X_2)} = 0.097$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

При двухфазном КЗ

$$X_{ш1} := X_{1\text{экв.О.П.}} = 0.097$$

Первый аварийный режим:

$$X_3 := \frac{X'_d}{n_\Gamma} + \left(\frac{X_{от.т1}}{n_{т1}} \right) + \frac{X_{от.л1}}{2} = 0.244$$

$$X_{ав1} := X_3 + X_2 + \frac{X_3 \cdot X_2}{X_{ш1}} = 0.793$$

Второй аварийный режим(отключился выключатель Q2):

$$X_4 := \frac{X_{\Gamma 2}}{n_\Gamma} + \frac{X_{от.т1}}{n_{т1}} = 0.11$$

$$X_5 := X_{от.л1} + \frac{X_{от.т2}}{2} = 0.451$$

$$X_{2\text{экв.О.П.}} := \left(\frac{X_4 \cdot X_5}{X_4 + X_5} \right) + X_{от.л1} = 0.383$$

$$X_{ш2} := X_{2\text{экв.О.П.}} = 0.383$$

$$X_6 := \frac{X'_d}{n_\Gamma} + \frac{X_{от.т1}}{n_{т1}} = 0.096$$

$$X_7 := X_{от.л1} + \frac{X_{от.т2}}{2} = 0.451$$

$$X_8 := X_{от.л1} + X_{ш2} = 0.677$$

$$X_{ав2} := X_6 + X_7 + \frac{X_6 \cdot X_7}{X_8} = 0.612$$

Послеаварийный режим (отключился выключатель Q1):

$$X_{п.ав.р.} := \frac{X'_d}{n_\Gamma} + \frac{X_{от.т1}}{n_{т1}} + X_{от.л1} + \frac{X_{от.т2}}{2} = 0.548$$

$$\delta := 0, 0.01 \dots \pi$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

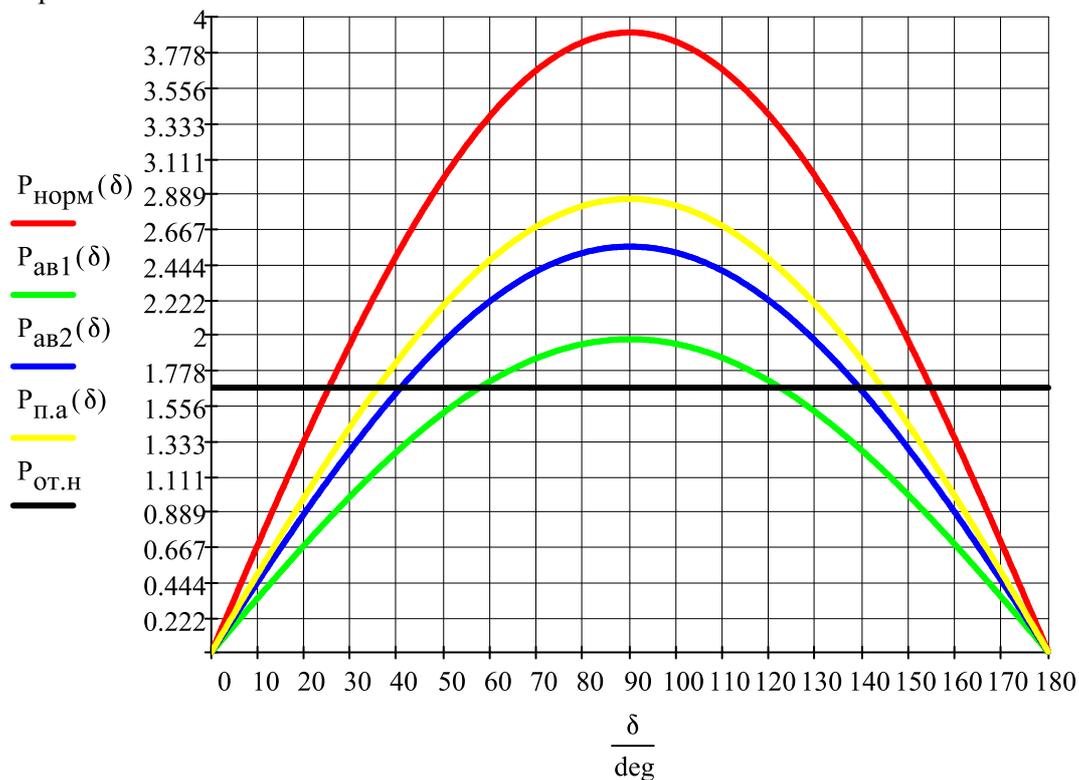
$$P_{\text{норм}}(\delta) := \frac{E'_{q2} \cdot U_{\text{от.с}}}{X_{\text{н.р}}} \cdot \sin(\delta)$$

$$P_{\text{ав1}}(\delta) := \frac{E'_{q2} \cdot U_{\text{от.с}}}{X_{\text{ав1}}} \cdot \sin(\delta)$$

$$P_{\text{ав2}}(\delta) := \frac{E'_{q2} \cdot U_{\text{от.с}}}{X_{\text{ав2}}} \cdot \sin(\delta)$$

$$P_{\text{п.а}}(\delta) := \frac{E'_{q2} \cdot U_{\text{от.с}}}{X_{\text{п.ав.р}}} \cdot \sin(\delta)$$

$$E'_{q2} = 1.563$$



Так как максимально возможная площадка ускорения (для всех режимов) меньше площадки торможения, то проблем с устойчивостью не будет

$$P_{\text{норм}} := \frac{E'_{q2} \cdot U_{\text{от.с}}}{X_{\text{н.р}}} = 3.902$$

$$P_{\text{ав2}} := \frac{E'_{q2} \cdot U_{\text{от.с}}}{X_{\text{ав2}}} = 2.554$$

$$P_{\text{ав1}} := \frac{E'_{q2} \cdot U_{\text{от.с}}}{X_{\text{ав1}}} = 1.971$$

$$P_{\text{п.а}} := \frac{E'_{q2} \cdot U_{\text{от.с}}}{X_{\text{п.ав.р}}} = 2.854$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$\delta_{кр} := \pi - \operatorname{asin}\left(\frac{P_{от.н}}{P_{п.а}}\right) = 2.518$$

$$\delta_0 := \operatorname{asin}\left(\frac{P_{от.н}}{P_{норм}}\right) = 0.441$$

$$\frac{\delta_0}{\text{deg}} = 25.287$$

$$\delta_{пр} := \operatorname{acos}\left[\frac{P_{от.н} \cdot (\delta_{кр} - \delta_0) + P_{п.а} \cdot \cos(\delta_{кр}) - P_{ав1} \cdot \cos(\delta_0)}{P_{п.а} - P_{ав1}}\right] = 2.378$$

$$\delta_0 = 0.441$$

Метод последовательных интервалов:

$$T_{j\Sigma} := T_j \cdot \frac{n_{Г} \cdot S_{Г.НОМ}}{S_{\sigma}} = 15$$

$$\Delta t := 0.05$$

Первый интервал: $t=0-0.05$ с

Ускорение в начале первого интервала:

$$\omega_0 := 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314.159$$

$$dP := (P_{от.н} - P_{ав1} \cdot \sin(\delta_0)) = 0.825$$

$$a_1 := \frac{(P_{от.н} - P_{ав1} \cdot \sin(\delta_0)) \cdot \omega_0}{T_{j\Sigma}} = 17.274$$

Приращение угла δ за первый интервал:

$$\Delta\delta_1 := a_1 \cdot \frac{\Delta t^2}{2} = 0.022$$

Угол к концу первого интервала:

$$\delta_1 := \delta_0 + \Delta\delta_1 = 0.463$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Второй интервал: $t=0.05-0.1$ с

$$a_{2.1} := \frac{(P_{от.н} - P_{ав1} \cdot \sin(\delta_1)) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = 16.464$$

$$a_{2.2} := \frac{(P_{от.н} - P_{ав2} \cdot \sin(\delta_1)) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = 11.013$$

$$a_2 := \frac{a_{2.1} + a_{2.2}}{2} = 13.738$$

$$\Delta\delta_2 := \Delta\delta_1 + a_2 \cdot \Delta t^2 = 0.056$$

$$\delta_2 := \delta_1 + \Delta\delta_2 = 0.519$$

Первый аварийный режим завершен

Третий интервал: $t=0.1-0.15$ с

Ускорение в начале 3-го интервала:

$$a_3 := \frac{(P_{от.н} - P_{ав1} \cdot \sin(\delta_2)) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = 14.429$$

Приращение угла δ за 3-й интервал:

$$\Delta\delta_3 := \Delta\delta_2 + a_3 \cdot \Delta t^2 = 0.092$$

Угол к концу 3-го интервала :

$$\delta_3 := \delta_2 + \Delta\delta_3$$

$$\delta_3 = 0.611$$

Четвертый интервал: $t=0.15-0.2$ с

Ускорение в начале 4-го интервала:

$$a_{4.1} := \frac{(P_{от.н} - P_{ав2} \cdot \sin(\delta_3)) \cdot 280}{T_{j\Sigma}} = 3.765$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$a_{4.2} := \frac{(P_{от.н} - P_{п.а} \cdot \sin(\delta_3)) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = 0.622$$

$$a_4 := \frac{a_{4.1} + a_{4.2}}{2} = 2.193$$

$$\Delta\delta_4 := \Delta\delta_3 + a_4 \cdot \Delta t^2$$

$$\Delta\delta_4 = 0.097$$

$$\delta_4 := \delta_3 + \Delta\delta_4$$

$$\delta_4 = 0.708$$

Второй аварийный режим завершен

Пятый интервал: $t = 0,2-0,25$ с

Ускорение в начале 5-го интервала:

$$a_5 := \frac{(P_{от.н} - P_{п.а} \cdot \sin(\delta_4)) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = -3.978$$

$$\Delta\delta_5 := \Delta\delta_4 + a_5 \cdot \Delta t^2 = 0.088$$

$$\delta_5 := \delta_4 + \Delta\delta_5 = 0.796$$

Шестой интервал: $t = 0,25-0,3$ с

$$a_6 := \frac{(P_{от.н} - P_{п.а} \cdot \sin(\delta_5)) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = -7.796$$

$$\Delta\delta_6 := \Delta\delta_5 + a_6 \cdot \Delta t^2 = 0.068$$

$$\delta_6 := \delta_5 + \Delta\delta_6 = 0.864$$

Седьмой интервал: $t = 0,3-0,35$ с

$$a_{7.1} := \frac{(P_{от.н} - P_{п.а} \cdot \sin(\delta_6)) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = -10.54$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$a_{7.2} := \frac{(P_{от.н} - P_{ав2} \cdot \sin(\delta_6)) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = -5.768$$

$$a_7 := \frac{a_{7.1} + a_{7.2}}{2} = -8.154$$

$$\Delta\delta_7 := \Delta\delta_6 + a_7 \cdot \Delta t^2 = 0.048$$

$$\delta_7 := \delta_6 + \Delta\delta_7 = 0.912$$

Восьмой интервал: $t = 0.35 - 0.4$ с

$$a_8 := \frac{(P_{от.н} - P_{ав2} \cdot \sin(\delta_7)) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = -7.376$$

Приращение угла d за 8-й интервал:

$$\Delta\delta_8 := \Delta\delta_7 + a_8 \cdot \Delta t^2 = 0.029$$

Угол к концу 8-го интервала :

$$\delta_8 := \delta_7 + \Delta\delta_8 = 0.941$$

Девятый интервал: $t = 0.4 - 0.45$ с

Ускорение в начале 9-го интервала:

$$a_{9.1} := \frac{(P_{от.н} - P_{ав2} \cdot \sin(\delta_8)) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = -8.315$$

$$a_{9.2} := \frac{(P_{от.н} - P_{п.а} \cdot \sin(\delta_6)) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = -10.54$$

$$a_9 := \frac{a_{9.1} + a_{9.2}}{2} = -9.427$$

Приращение угла d за 9-й интервал:

$$\Delta\delta_9 := \Delta\delta_8 + a_9 \cdot \Delta t^2 = 5.663 \times 10^{-3}$$

Угол к концу 9-го интервала :

$$\delta_9 := \delta_8 + \Delta\delta_9 = 0.947$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Десятый интервал: $t = 0.45-0.5$

Ускорение в начале 10-го интервала:

$$a_{10} := \frac{(P_{от.н} - P_{п.а} \cdot \sin(\delta_9)) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = -13.585$$

Приращение угла d за 10-й интервал:

$$\Delta\delta_{10} := \Delta\delta_9 + a_{10} \cdot \Delta t^2 = -0.028$$

Угол к концу 10-го интервала :

$$\delta_{10} := \delta_9 + \Delta\delta_{10} = 0.918$$

Одиннадцатый интервал: $t = 0.5-0.55$ с

Ускорение в начале 11-го интервала:

$$a_{11} := \frac{(P_{от.н} - P_{п.а} \cdot \sin(\delta_{10})) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = -12.577$$

Приращение угла d за 11-й интервал:

$$\Delta\delta_{11} := \Delta\delta_{10} + a_{11} \cdot \Delta t^2 = -0.06$$

Угол к концу 11-го интервала :

$$\delta_{11} := \delta_{10} + \Delta\delta_{11} = 0.859$$

Двенадцатый интервал: $t = 0.55-0.6$ с

Ускорение в начале 12-го интервала:

$$a_{12} := \frac{(P_{от.н} - P_{п.а} \cdot \sin(\delta_{11})) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = -10.327$$

Приращение угла d за 12-й интервал:

$$\Delta\delta_{12} := \Delta\delta_{11} + a_{12} \cdot \Delta t^2 = -0.086$$

Угол к концу 12-го интервала :

$$\delta_{12} := \delta_{11} + \Delta\delta_{12} = 0.773$$

Тринадцатый интервал: $t = 0.6-0.65$ с

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Ускорение в начале 13-го интервала:

$$a_{13} := \frac{(P_{от.н} - P_{п.а} \cdot \sin(\delta_{12})) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = -6.825$$

Приращение угла d за 13-й интервал:

$$\Delta\delta_{13} := \Delta\delta_{12} + a_{13} \cdot \Delta t^2 = -0.103$$

Угол к концу 13-го интервала :

$$\delta_{13} := \delta_{12} + \Delta\delta_{13} = 0.67$$

Четырнадцатый интервал: $t = 0.65-0.7$ с

Ускорение в начале 14-го интервала:

$$a_{14} := \frac{(P_{от.н} - P_{п.а} \cdot \sin(\delta_{13})) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = -2.224$$

Приращение угла d за 14-й интервал:

$$\Delta\delta_{14} := \Delta\delta_{13} + a_{14} \cdot \Delta t^2 = -0.108$$

Угол к концу 14-го интервала :

$$\delta_{14} := \delta_{13} + \Delta\delta_{14} = 0.562$$

Пятнадцатый интервал: $t = 0.7-0.75$ с

Ускорение в начале 15-го интервала:

$$a_{15} := \frac{(P_{от.н} - P_{п.а} \cdot \sin(\delta_{14})) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = 3.047$$

Приращение угла d за 15-й интервал:

$$\Delta\delta_{15} := \Delta\delta_{14} + a_{15} \cdot \Delta t^2 = -0.101$$

Угол к концу 15-го интервала :

$$\delta_{15} := \delta_{14} + \Delta\delta_{15} = 0.462$$

Шестнадцатый интервал: $t = 0.75-0.8$ с

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Ускорение в начале 16-го интервала:

$$a_{16} := \frac{(P_{от.н} - P_{п.а} \cdot \sin(\delta_{15})) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = 8.283$$

Приращение угла d за 16-й интервал:

$$\Delta\delta_{16} := \Delta\delta_{15} + a_{16} \cdot \Delta t^2 = -0.08$$

Угол к концу 16-го интервала :

$$\delta_{16} := \delta_{15} + \Delta\delta_{16} = 0.382$$

Семнадцатый интервал: $t = 0.8-0.85$ с

Ускорение в начале 17-го интервала:

$$a_{17} := \frac{(P_{от.н} - P_{п.а} \cdot \sin(\delta_{16})) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = 12.634$$

Приращение угла d за 17-й интервал:

$$\Delta\delta_{17} := \Delta\delta_{16} + a_{17} \cdot \Delta t^2 = -0.048$$

Угол к концу 17-го интервала :

$$\delta_{17} := \delta_{16} + \Delta\delta_{17} = 0.333$$

Восемнадцатый интервал: $t = 0.85-0.9$ с

Ускорение в начале 18-го интервала:

$$a_{18} := \frac{(P_{от.н} - P_{п.а} \cdot \sin(\delta_{17})) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = 15.335$$

Приращение угла d за 18-й интервал:

$$\Delta\delta_{18} := \Delta\delta_{17} + a_{18} \cdot \Delta t^2 = -9.932 \times 10^{-3}$$

Угол к концу 18-го интервала :

$$\delta_{18} := \delta_{17} + \Delta\delta_{18} = 0.324$$

Девятнадцатый интервал: $t = 0.9-0.95$ с

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Ускорение в начале 19-го интервала:

$$a_{19} := \frac{(P_{от.н} - P_{п.а} \cdot \sin(\delta_{18})) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = 15.897$$

Приращение угла d за 19-й интервал:

$$\Delta\delta_{19} := \Delta\delta_{18} + a_{19} \cdot \Delta t^2 = 0.03$$

Угол к концу 19-го интервала :

$$\delta_{19} := \delta_{18} + \Delta\delta_{19} = 0.353$$

Двадцатый интервал: $t = 0.95 - 1.0$ с

Ускорение в начале 20-го интервала:

$$a_{20} := \frac{(P_{от.н} - P_{п.а} \cdot \sin(\delta_{19})) \cdot 314}{T_{j\Sigma}} = 14.217$$

Приращение угла d за 20-й интервал:

$$\Delta\delta_{20} := \Delta\delta_{19} + a_{20} \cdot \Delta t^2 = 0.065$$

Угол к концу 20-го интервала :

$$\delta_{20} := \delta_{19} + \Delta\delta_{20} = 0.419$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

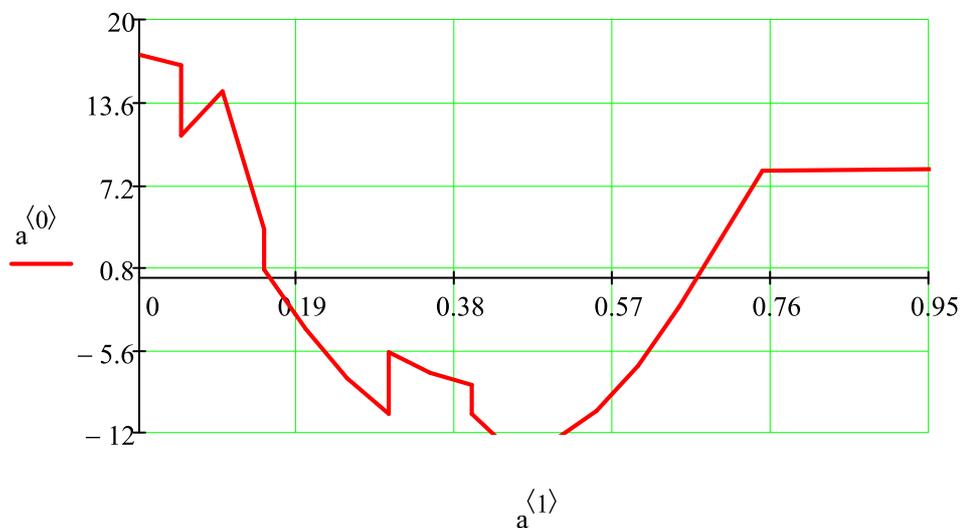
$$\delta := \begin{pmatrix} \delta_0 & 0 \\ \delta_1 & 0.05 \\ \delta_2 & 0.1 \\ \delta_3 & 0.15 \\ \delta_4 & 0.2 \\ \delta_5 & 0.25 \\ \delta_6 & 0.3 \\ \delta_7 & 0.35 \\ \delta_8 & 0.4 \\ \delta_9 & 0.45 \\ \delta_{10} & 0.5 \\ \delta_{11} & 0.55 \\ \delta_{12} & 0.6 \\ \delta_{13} & 0.65 \\ \delta_{14} & 0.7 \\ \delta_{15} & 0.75 \\ \delta_{16} & 0.8 \\ \delta_{17} & 0.85 \\ \delta_{18} & 0.9 \\ \delta_{19} & 0.95 \\ \delta_{20} & 1 \end{pmatrix}$$

$$a := \begin{pmatrix} a_1 & 0 \\ a_{2.1} & 0.05 \\ a_{2.2} & 0.05 \\ a_3 & 0.1 \\ a_{4.1} & 0.15 \\ a_{4.2} & 0.15 \\ a_5 & 0.2 \\ a_6 & 0.25 \\ a_{7.1} & 0.3 \\ a_{7.2} & 0.3 \\ a_8 & 0.35 \\ a_{9.1} & 0.4 \\ a_{9.2} & 0.4 \\ a_{10} & 0.45 \\ a_{11} & 0.5 \\ a_{12} & 0.55 \\ a_{13} & 0.6 \\ a_{14} & 0.65 \\ a_{15} & 0.7 \\ a_{16} & 0.75 \\ a_{17} & 8 \end{pmatrix}$$

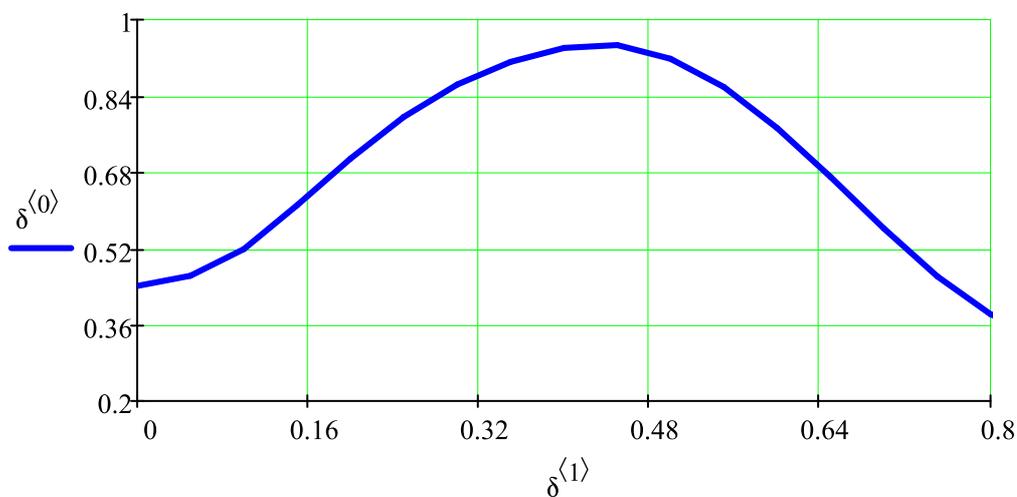
$$k_{упр} := \begin{pmatrix} \frac{\delta_0}{\delta_0} \\ \frac{\delta_1}{\delta_0} \\ \frac{\delta_2}{\delta_0} \\ \frac{\delta_3}{\delta_0} \\ \frac{\delta_4}{\delta_0} \\ \frac{\delta_5}{\delta_0} \\ \frac{\delta_6}{\delta_0} \\ \frac{\delta_7}{\delta_0} \\ \frac{\delta_8}{\delta_0} \\ \frac{\delta_9}{\delta_0} \\ \frac{\delta_{10}}{\delta_0} \\ \frac{\delta_{11}}{\delta_0} \end{pmatrix}$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Зависимость ускорения от времени



Зависимость угла от времени



Уточненный расчет динамической устойчивости:

Генератор вводится синхронным сопротивлением X_q

$$X_q = 0.3$$

Первый аварийный режим:

$$X_{1.2} := \frac{X_q}{n_\Gamma} + \left(\frac{X_{от.т1}}{n_{т1}} \right) + \frac{X_{от.л1}}{2} = 0.274$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$X_{2.2} := \frac{X_{от.т2}}{2} = 0.157$$

$$X_{3.2} := X_{ш1} = 0.097$$

$$X_{12.1} := X_{1.2} + X_{2.2} + \frac{X_{1.2} \cdot X_{2.2}}{X_{3.2}} = 0.872$$

$$X_{11.1} := X_{1.2} + \frac{X_{2.2} \cdot X_{3.2}}{X_{2.2} + X_{3.2}} = 0.334$$

Второй аварийный режим:

$$X_{4.2} := \frac{X_q}{n_r} + \frac{X_{от.т1}}{n_{т1}} = 0.126$$

$$X_{5.2} := X_{от.л1} + \frac{X_{от.т2}}{2} = 0.451$$

$$X_8 := X_{от.л1} + X_{ш2} = 0.677$$

$$X_{12.2} := X_{4.2} + X_{5.2} + \frac{X_{4.2} \cdot X_{5.2}}{X_8} = 0.662$$

$$X_{11.2} := X_{4.2} + \frac{X_{5.2} \cdot X_8}{X_{5.2} + X_8} = 0.397$$

$$X'_{н.р.} := \frac{X_q}{n_r} + X_{внеш} = 0.431$$

$$P_{норм} := \frac{E_Q \cdot U_{от.с}}{X'_{н.р.}} = 3.746$$

$$\delta'_0 := \arcsin\left(\frac{P_{от.н}}{P_{норм}}\right) = 0.461$$

$$X'_{п.ав.р.} := 1.087$$

$$T_{ев} := 0.25$$

$$T_{доп} := 5.42$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$t_1 := \Delta t = 0.05$$

$$E_{qepr} := 5$$

$$E'_{q0} := E'_{q2} = 1.563$$

$$E_{qe0} := E_{qЯ} = 2.397$$

Первый интервал:

$$E_{qe1} := E_{qe0} + (E_{qepr} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_e}}\right) = 2.869$$

$$E_{qe1cp} := \frac{E_{qe0} + E_{qe1}}{2} = 2.633$$

ЭДС для первого момента нарушения режима:

$$E_{q0} := \frac{E'_{q0} - \frac{U_{от.с}}{X_{12.1}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}\right) \cdot \cos(\delta'_0)}{1 - \frac{\frac{X_d}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{12.1}}} = 2.703$$

$$\Delta E'_{q1} := \frac{E_{qe1cp} - E_{q0}}{T_{do}} \cdot \Delta t = -6.536 \times 10^{-4}$$

Величина переходной ЭДС в конце интервала:

$$E'_{q1} := E'_{q0} + \Delta E'_{q1} = 1.563$$

Небаланс на валу:

$$\Delta P_{1'} := P_{от.н} - \frac{E_{q0} \cdot U_{от.с}}{X_{12.1}} \cdot \sin(\delta'_0) = 0.287$$

$$a_{1'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{1'} = 5.999$$

$$\Delta \delta_{1'} := 0.5 \cdot \Delta t^2 \cdot a_{1'} = 7.499 \times 10^{-3}$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{1'} := \delta'_0 + \Delta \delta_{1'} = 0.469$$

Второй интервал:

$$t_2 := t_1 + \Delta t = 0.1$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$E_{qe2} := E_{qe0} + (E_{qепр} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T_e}}\right) = 3.255$$

$$E_{qe2cp} := \frac{E_{qe1} + E_{qe2}}{2} = 3.062$$

$$E_{q1} := \frac{E'_{q1} - \frac{U_{от.с}}{X_{11.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}\right) \cdot \cos(\delta_{1'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{12.1}}} = 1.552$$

$$\Delta E'_{q2} := \frac{E_{qe2cp} - E_{q1}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.014$$

Величина переходной ЭДС в конце интервала:

$$E'_{q2} := E'_{q1} + \Delta E'_{q2} = 1.577$$

Небаланс на валу:

$$\Delta P_{21'} := P_{от.н} - \frac{E_{q1} \cdot U_{от.с}}{X_{ав1}} \cdot \sin(\delta_{1'}) = 0.783$$

$$\Delta P_{22'} := P_{от.н} - \frac{E_{q1} \cdot U_{от.с}}{X_{ав2}} \cdot \sin(\delta_{1'}) = 0.521$$

$$a_{21'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{21'} = 16.389$$

$$a_{22'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{22'} = 10.915$$

$$\Delta \delta_{2'} := \Delta t^2 \cdot 0.5(a_{21'} + a_{22'}) + \Delta \delta_{1'} = 0.042$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{2'} := \delta_{1'} + \Delta \delta_{2'} = 0.51$$

Третий интервал:

$$t_3 := t_2 + \Delta t = 0.15$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$E_{qe3} := E_{qe0} + (E_{qепр} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{\frac{-t_3}{T_e}}\right) = 3.571$$

$$E_{qe3cp} := \frac{E_{qe2} + E_{qe3}}{2} = 3.413$$

$$E_{q21} := \frac{E'_{q2} - \frac{U_{от.с}}{X_{11.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}\right) \cdot \cos(\delta_{2'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{11.2}}} = 1.619$$

$$E_{q22} := \frac{E'_{q2} - \frac{U_{от.с}}{X_{12.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}\right) \cdot \cos(\delta_{2'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{ав2}}} = 1.606$$

$$\Delta E'_{q31} := \frac{E_{qe3cp} - E_{q21}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.017$$

$$\Delta E'_{q32} := \frac{E_{qe3cp} - E_{q22}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.017$$

Величина переходной ЭДС в конце интервала скачком не меняется:

$$E'_{q3} := E'_{q2} + \Delta E'_{q32} = 1.593$$

Небалансы на валу:

$$\Delta P_{3'} := P_{от.н} - \frac{E_{q21} \cdot U_{от.с}}{X_{ав2}} \cdot \sin(\delta_{2'}) = 0.375$$

$$a_{3'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{3'} = 7.851$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$\Delta\delta_{3'} := \Delta t^2 \cdot a_{3'} + \Delta\delta_{2'} = 0.061$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{3'} := \delta_{2'} + \Delta\delta_{3'} = 0.571$$

Четвертый интервал:

$$t_4 := t_3 + \Delta t = 0.2$$

$$E_{qe4} := E_{qe0} + (E_{qепр} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_4}{T_e}}\right) = 3.83$$

$$E_{qe4cp} := \frac{E_{qe3} + E_{qe4}}{2} = 3.701$$

$$E_{q31} := \frac{E'_{q3} - \frac{U_{от.с}}{X_{11.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}\right) \cdot \cos(\delta_{3'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{12.2}}} = 1.6$$

$$E_{q32} := \frac{E'_{q3} - \frac{U_{от.с}}{X_{11.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}\right) \cdot \cos(\delta_{3'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{12.2}}} = 1.6$$

$$\Delta E'_{q41} := \frac{E_{qe4cp} - E_{q31}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.019$$

$$\Delta E'_{q42} := \frac{E_{qe4cp} - E_{q32}}{T_{do}} \cdot \Delta t = -3.498 \times 10^{-3}$$

Величина переходной ЭДС в конце интервала скачком не меняется:

$$E'_{q4} := E'_{q3} + \Delta E'_{q42} = 1.59$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Небалансы на валу

$$\Delta P_{41'} := P_{\text{от.н}} - \frac{E_{q31} \cdot U_{\text{от.с}}}{X_{\text{ав2}}} \cdot \sin(\delta_{3'}) = 0.253$$

$$\Delta P_{42'} := P_{\text{от.н}} - \frac{E_{q32} \cdot U_{\text{от.с}}}{X'_{\text{п.ав.р.}}} \cdot \sin(\delta_{3'}) = -0.363$$

$$a_{41'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{41'} = 5.294$$

$$a_{42'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{42'} = -7.607$$

$$\Delta \delta_{4'} := \Delta t^2 \cdot 0.5(a_{41'} + a_{42'}) + \Delta \delta_{3'} = 0.058$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{4'} := \delta_{3'} + \Delta \delta_{4'} = 0.63$$

Пятый интервал:

$$t_5 := t_4 + \Delta t = 0.25$$

$$E_{qe5} := E_{qe0} + (E_{qe\text{пр}} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_5}{T_e}}\right) = 4.042$$

$$E_{qe5\text{ср}} := \frac{E_{qe4} + E_{qe5}}{2} = 3.936$$

$$E_{q4} := \frac{E'_{q4} - \frac{U_{\text{от.с}}}{X_{12.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}\right) \cdot \cos(\delta_{4'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{11.2}}} = 1.656$$

$$E_{q4} := E_{q4} \cdot 2.63$$

$$\Delta E'_{q5} := \frac{E_{qe5\text{ср}} - E_{q4}}{T_{\text{до}}} \cdot \Delta t = -3.868 \times 10^{-3}$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Величина переходной ЭДС в конце интервала:

$$E'_{q5} := E'_{q4} + \Delta E'_{q5} = 1.586$$

Небаланс на валу:

$$\Delta P_{5'} := P_{от.н} - \frac{E_{q4} \cdot U_{от.с}}{X'_{п.ав.р.}} \cdot \sin(\delta_{4'}) = -0.693$$

$$a_{5'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{5'} = -14.516$$

$$\Delta \delta_{5'} := \Delta t^2 \cdot a_{5'} + \Delta \delta_{4'} = 0.022$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{5'} := \delta_{4'} + \Delta \delta_{5'} = 0.652$$

Шестой интервал:

$$t_6 := t_5 + \Delta t = 0.3$$

$$E_{qe6} := E_{qe0} + (E_{qeпр} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_6}{T_e}}\right) = 4.216$$

$$E_{qe6ср} := \frac{E_{qe5} + E_{qe6}}{2} = 4.129$$

$$E_{q5} := \frac{E'_{q5} - \frac{U_{от.с}}{X_{12.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}\right) \cdot \cos(\delta_{5'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{11.2}}} = 1.652$$

$$\Delta E'_{q6} := \frac{E_{qe6ср} - E_{q5}}{T_{do}} \cdot \Delta t = -0.015$$

Величина переходной ЭДС в конце интервала:

$$E'_{q6} := E'_{q5} + \Delta E'_{q6} = 1.571$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Небаланс на валу:

$$\Delta P_{6'} := P_{от.н} - \frac{E_{q5} \cdot U_{от.с}}{X'_{п.ав.р.}} \cdot \sin(\delta_{5'}) = -1.561$$

$$a_{6'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{6'} = -32.686$$

$$\Delta \delta_{6'} := \Delta t^2 \cdot a_{6'} + \Delta \delta_{5'} = -0.06$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{6'} := \delta_{5'} + \Delta \delta_{6'} = 0.592$$

Седьмой интервал:

$$t_7 := t_6 + \Delta t = 0.35$$

$$E_{qe7} := E_{qe0} + (E_{qeпр} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{\frac{-t_7}{T_e}}\right) = 4.358$$

$$E_{qe7cp} := \frac{E_{qe6} + E_{qe7}}{2} = 4.287$$

$$E_{q61} := \frac{E'_{q6} - \frac{U_{от.с}}{X_{11.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}\right) \cdot \cos(\delta_{6'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{12.2}}} = 1.577$$

$$E_{q62} := \frac{E'_{q6} - \frac{U_{от.с}}{X_{11.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}\right) \cdot \cos(\delta_{6'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{12.2}}} = 1.577$$

$$\Delta E'_{q7} := \frac{E_{qe7cp} - E_{q62}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.025$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Величина переходной ЭДС в конце интервала:

$$E'_{q7} := E'_{q6} + \Delta E'_{q7} = 1.596$$

Небаланс на валу:

$$\Delta P_{71'} := P_{от.н} - \frac{E_{q61} \cdot U_{от.с}}{X'_{п.ав.р.}} \cdot \sin(\delta_{6'}) = -1.047$$

$$\Delta P_{72'} := P_{от.н} - \frac{E_{q62} \cdot U_{от.с}}{X_{ав2}} \cdot \sin(\delta_{6'}) = 0.228$$

$$a_{71'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{71'} = -21.913$$

$$a_{72'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{72'} = 4.777$$

$$\Delta \delta_{7'} := \Delta t^2 \cdot 0.5(a_{71'} + a_{72'}) + \Delta \delta_{6'} = -0.081$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{7'} := \delta_{6'} + \Delta \delta_{7'} = 0.511$$

Восьмой интервал:

$$t_8 := t_7 + \Delta t = 0.4$$

$$E_{qe8} := E_{qe0} + (E_{qeпр} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_8}{T_e}}\right) = 4.474$$

$$E_{qe8cp} := \frac{E_{qe7} + E_{qe8}}{2} = 4.416$$

$$E_{q71} := \frac{E'_{q7} - \frac{U_{от.с}}{X_{11.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}\right) \cdot \cos(\delta_{7'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{12.2}}} = 1.601$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$E_{q72} := \frac{E'_{q7} - \frac{U_{от.с}}{X_{12.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4} \right) \cdot \cos(\delta_{7'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{11.2}}} = 1.66$$

$$\Delta E'_{q81} := \frac{E_{qe8cp} - E_{q71}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.026$$

$$\Delta E'_{q82} := \frac{E_{qe8cp} - E_{q72}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.025$$

Величина переходной ЭДС в конце интервала скачком не меняется:

$$E'_{q8} := E'_{q7} + \Delta E'_{q82} = 1.621$$

Небалансы на валу:

$$\Delta P_{8'} := P_{от.н} - \frac{E_{q71} \cdot U_{от.с}}{X_{ав2}} \cdot \sin(\delta_{7'}) = 0.387$$

$$a_{8'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{8'} = 8.109$$

$$\Delta \delta_{8'} := \Delta t^2 \cdot a_{8'} + \Delta \delta_{7'} = -0.061$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{8'} := \delta_{7'} + \Delta \delta_{8'} = 0.45$$

Девятый интервал:

$$t_9 := t_8 + \Delta t = 0.45$$

$$E_{qe9} := E_{qe0} + (E_{qeпр} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{\frac{-t_9}{T_e}} \right) = 4.57$$

$$E_{qe9cp} := \frac{E_{qe8} + E_{qe9}}{2} = 4.522$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$E'_{q8} := \frac{E'_{q8} - \frac{U_{от.с}}{X_{11.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4} \right) \cdot \cos(\delta_{g'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{12.2}}} = 1.625$$

$$E'_{q82} := \frac{E'_{q8} - \frac{U_{от.с}}{X_{12.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4} \right) \cdot \cos(\delta_{g'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{11.2}}} = 1.686$$

$$\Delta E'_{q9} := \frac{E_{qe9cp} - E_{q8}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.027$$

Величина переходной ЭДС в конце интервала:

$$E'_{q9} := E'_{q8} + \Delta E'_{q9} = 1.648$$

Небаланс на валу:

$$\Delta P_{91'} := P_{от.н} - \frac{E_{q8} \cdot U_{от.с}}{X_{ав2}} \cdot \sin(\delta_{g'}) = 0.511$$

$$a_{91'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{91'} = 10.691 \cdot \sin(\delta_{g'}) = 0.991$$

$$a_{92'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{92'} = 20.754$$

$$\Delta \delta_{a_{92'}} := -7.5 \cdot (a_{91'} + a_{92'}) + \Delta \delta_{g'} = -0.021$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{g'} := \delta_{g'} + \Delta \delta_{g'} = 0.429$$

Десятый интервал:

$$t_{10} := t_9 + \Delta t = 0.5$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$E_{qe10} := E_{qe0} + (E_{qепр} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{10}}{T_e}}\right) = 4.648$$

$$E_{qe10cp} := \frac{E_{qe9} + E_{qe10}}{2} = 4.609$$

$$E_{q9} := \frac{E'_{q9} - \frac{U_{от.с}}{X_{12.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}\right) \cdot \cos(\delta_{g'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{11.2}}} = 1.714$$

$$\Delta E'_{q10} := \frac{E_{qe10cp} - E_{q9}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.027$$

Величина переходной ЭДС в конце интервала:

$$E'_{q10} := E'_{q9} + \Delta E'_{q10} = 1.674$$

Небаланс на валу:

$$\Delta P_{10'} := P_{от.н} - \frac{E_{q9} \cdot U_{от.с}}{X'_{п.ав.р.}} \cdot \sin(\delta_{g'}) = 1.011$$

$$a_{10'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{10'} = 21.159$$

$$\Delta \delta_{10'} := \Delta t^2 \cdot a_{10'} + \Delta \delta_{g'} = 0.031$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{10'} := \delta_{g'} + \Delta \delta_{10'} = 0.46$$

Одиннадцатый интервал:

$$t_{11} := t_{10} + \Delta t = 0.55$$

$$E_{qe11} := E_{qe0} + (E_{qепр} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{11}}{T_e}}\right) = 4.712$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$E_{qe11cp} := \frac{E_{qe10} + E_{qe11}}{2} = 4.68$$

$$E_{q101} := \frac{E'_{q10} - \frac{U_{от.с}}{X_{12.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4} \right) \cdot \cos(\delta_{10'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{11.2}}} = 1.743$$

$$E_{q102} := \frac{E'_{q10} - \frac{U_{от.с}}{X_{12.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4} \right) \cdot \cos(\delta_{10'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{11.2}}} = 1.743$$

$$\Delta E'_{q111} := \frac{E_{qe11cp} - E_{q101}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.027$$

$$\Delta E'_{q112} := \frac{E_{qe11cp} - E_{q102}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.027$$

Величина переходной ЭДС в конце интервала скачком не меняется:

$$E'_{q11} := E'_{q10} + \Delta E'_{q112} = 1.702$$

Небалансы на валу:

$$\Delta P_{11'} := P_{от.н} - \frac{E_{q101} \cdot U_{от.с}}{X'_{п.ав.р.}} \cdot \sin(\delta_{10'}) = 0.954$$

$$a_{11'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{11'} = 19.979$$

$$\Delta \delta_{11'} := \Delta t^2 \cdot a_{11'} + \Delta \delta_{10'} = 0.081$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{11'} := \delta_{10'} + \Delta \delta_{11'} = 0.542$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Двенадцатый интервал:

$$t_{12} := t_{11} + \Delta t = 0.6$$

$$E_{qe12} := E_{qe0} + (E_{qепр} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{12}}{T_e}}\right) = 4.764$$

$$E_{qe12cp} := \frac{E_{qe11} + E_{qe12}}{2} = 4.738$$

$$E_{q11} := \frac{E'_{q11} - \frac{U_{от.с}}{X_{12.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}\right) \cdot \cos(\delta_{11'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{11.2}}} = 1.773$$

$$\Delta E'_{q12} := \frac{E_{qe12cp} - E_{q11}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.027$$

Величина переходной ЭДС в конце интервала:

$$E'_{q12} := E'_{q11} + \Delta E'_{q12} = 1.729$$

Небаланс на валу:

$$\Delta P_{12'} := P_{от.н} - \frac{E_{q11} \cdot U_{от.с}}{X'_{п.ав.р.}} \cdot \sin(\delta_{11'}) = 0.826$$

$$a_{12'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{12'} = 17.285$$

$$\Delta \delta_{12'} := \Delta t^2 \cdot a_{12'} + \Delta \delta_{11'} = 0.125$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{12'} := \delta_{11'} + \Delta \delta_{12'} = 0.666$$

Тринадцатый интервал:

$$t_{13} := t_{12} + \Delta t = 0.65$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$E_{qe13} := E_{qe0} + (E_{qепр} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{13}}{T_e}}\right) = 4.807$$

$$E_{qe13cp} := \frac{E_{qe12} + E_{qe13}}{2} = 4.785$$

$$E_{q12} := \frac{E'_{q12} - \frac{U_{от.с}}{X_{12.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}\right) \cdot \cos(\delta_{12'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{11.2}}} = 1.804$$

$$\Delta E'_{q13} := \frac{E_{qe13cp} - E_{q12}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.027$$

Величина переходной ЭДС в конце интервала:

$$E'_{q13} := E'_{q12} + \Delta E'_{q13} = 1.756$$

Небаланс на валу:

$$\Delta P_{13'} := P_{от.н} - \frac{E_{q12} \cdot U_{от.с}}{X'_{п.ав.р.}} \cdot \sin(\delta_{12'}) = 0.641$$

$$a_{13'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{13'} = 13.412$$

$$\Delta \delta_{13'} := \Delta t^2 \cdot a_{13'} + \Delta \delta_{12'} = 0.158$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{13'} := \delta_{12'} + \Delta \delta_{13'} = 0.824$$

Четырнадцатый интервал:

$$t_{14} := t_{13} + \Delta t = 0.7$$

$$E_{qe14} := E_{qe0} + (E_{qепр} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{14}}{T_e}}\right) = 4.842$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$E_{qe14cp} := \frac{E_{qe13} + E_{qe14}}{2} = 4.824$$

$$E_{q13} := \frac{E'_{q13} - \frac{U_{от.с}}{X_{11.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4} \right) \cdot \cos(\delta_{13'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{12.2}}} = 1.778$$

$$\Delta E'_{q14} := \frac{E_{qe14cp} - E_{q13}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.028$$

Величина переходной ЭДС в конце интервала:

$$E'_{q14} := E'_{q13} + \Delta E'_{q14} = 1.785$$

Небаланс на валу:

$$\Delta P_{14'} := P_{от.н} - \frac{E_{q13} \cdot U_{от.с}}{X'_{п.ав.р.}} \cdot \sin(\delta_{13'}) = 0.466$$

$$a_{14'} := \frac{-1.314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{14'} = -9.747$$

$$\Delta \delta_{14'} := \Delta t^2 \cdot a_{14'} + \Delta \delta_{13'} = 0.134$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{14'} := \delta_{13'} + \Delta \delta_{14'} = 0.958$$

Пятнадцатый интервал:

$$t_{15} := t_{14} + \Delta t = 0.75$$

$$E_{qe15} := E_{qe0} + (E_{qепр} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{15}}{T_e}} \right) = 4.87$$

$$E_{qe15cp} := \frac{E_{qe14} + E_{qe15}}{2} = 4.856$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$E'_{q14} := \frac{E'_{q14} - \frac{U_{от.с}}{X_{11.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{3} - \frac{X'_d}{3} \right) \cdot \cos(\delta_{14'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{12.2}}} = 1.802$$

$$\Delta E'_{q15} := \frac{E_{qe15cp} - E_{q14}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.028$$

Величина переходной ЭДС в конце интервала:

$$E'_{q15} := E'_{q14} + \Delta E'_{q15} = 1.813$$

Небаланс на валу:

$$\Delta P_{15'} := P_{от.н} - \frac{E_{q14} \cdot U_{от.с}}{X'_{п.ав.р.}} \cdot \sin(\delta_{14'}) = 0.31$$

$$a_{15'} := \frac{0.314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{15'} = 6.493 \times 10^{-3}$$

$$\Delta \delta_{15'} := \Delta t^2 \cdot a_{15'} + \Delta \delta_{14'} = 0.134$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{15'} := \delta_{14'} + \Delta \delta_{15'} = 1.092$$

Шестнадцатый интервал:

$$t_{16} := t_{15} + \Delta t = 0.8$$

$$E_{qe16} := E_{qe0} + (E_{qепр} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{16}}{T_e}} \right) = 4.894$$

$$E_{qe16cp} := \frac{E_{qe15} + E_{qe16}}{2} = 4.882$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$E'_{q15} := \frac{E'_{q15} - \frac{U_{от.с}}{X_{11.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4} \right) \cdot \cos(\delta_{15'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{12.2}}} = 1.849$$

$$\Delta E'_{q16} := \frac{E_{qe16cp} - E_{q15}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.028$$

Величина переходной ЭДС в конце интервала:

$$E'_{q16} := E'_{q15} + \Delta E'_{q16} = 1.841$$

Небаланс на валу:

$$\Delta P_{16'} := P_{от.н} - \frac{E_{q15} \cdot U_{от.с}}{X'_{п.ав.в.}} \cdot \sin(\delta_{15'}) = 0.157$$

$$a_{16'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{16'} = 3.28$$

$$\Delta \delta_{16'} := \Delta t^2 \cdot a_{16'} + \Delta \delta_{15'} = 0.142$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{16'} := \delta_{15'} + \Delta \delta_{16'} = 1.234$$

Семнадцатый интервал:

$$t_{17} := t_{16} + \Delta t = 0.85$$

$$E_{qe17} := E_{qe0} + (E_{qепр} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{17}}{T_e}} \right) = 4.913$$

$$E_{qe17cp} := \frac{E_{qe16} + E_{qe17}}{2} = 4.903$$

$$E'_{q16} := \frac{E'_{q16} - \frac{U_{от.с}}{X_{11.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4} \right) \cdot \cos(\delta_{16'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{12.2}}} = 1.886$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$\Delta E'_{q17} := \frac{E_{qe17cp} - E_{q16}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.028$$

Величина переходной ЭДС в конце интервала:

$$E'_{q17} := E'_{q16} + \Delta E'_{q17} = 1.868$$

Небаланс на валу:

$$\Delta P_{17'} := P_{от.н} - \frac{E_{q16} \cdot U_{от.с}}{X'_{п.ав.р.}} \cdot \sin(\delta_{16'}) = 0.029$$

$$a_{17'} := \frac{314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{17'} = 0.611$$

$$\Delta \delta_{17'} := \Delta t^2 \cdot a_{17'} + \Delta \delta_{16'} = 0.143$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{17'} := \delta_{16'} + \Delta \delta_{17'} = 1.377$$

Восемнадцатый интервал:

$$t_{18} := t_{17} + \Delta t = 0.9$$

$$E_{qe18} := E_{qe0} + (E_{qепр} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{18}}{T_e}}\right) = 4.929$$

$$E_{qe18cp} := \frac{E_{qe17} + E_{qe18}}{2} = 4.921$$

$$E'_{q17} := \frac{E'_{q17} - \frac{U_{от.с}}{X_{12.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}\right) \cdot \cos(\delta_{17'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{12.2}}} = 1.927$$

$$\Delta E'_{q18} := \frac{E_{qe18cp} - E_{q17}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.028$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Величина переходной ЭДС в конце интервала:

$$E'_{q18} := E'_{q17} + \Delta E'_{q18} = 1.896$$

Небаланс на валу:

$$\Delta P_{18'} := P_{от.н} - \frac{E_{q17} \cdot U_{от.с}}{X'_{п.ав.р.}} \cdot \sin(\delta_{17'}) = -0.073$$

$$a_{18'} := \frac{2.5 \cdot 314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{18'} = -3.843$$

$$\Delta \delta_{18'} := \Delta t^2 \cdot a_{18'} + \Delta \delta_{17'} = 0.134$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{18'} := \delta_{17'} + \Delta \delta_{18'} = 1.511$$

Девятнадцатый интервал:

$$t_{19} := t_{18} + \Delta t = 0.95$$

$$E_{qe19} := E_{qe0} + (E_{qепр} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{19}}{T_e}}\right) = 4.942$$

$$E_{qe19cp} := \frac{E_{qe18} + E_{qe19}}{2} = 4.935$$

$$E_{q18} := \frac{E'_{q18} - \frac{U_{от.с}}{X_{12.2}} \cdot \left(\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}\right) \cdot \cos(\delta_{18'})}{1 - \frac{\frac{X_q}{4} - \frac{X'_d}{4}}{X_{12.2}}} = 1.961$$

$$\Delta E'_{q19} := \frac{E_{qe19cp} - E_{q18}}{T_{do}} \cdot \Delta t = 0.027$$

Величина переходной ЭДС в конце интервала:

$$E'_{q19} := E'_{q18} + \Delta E'_{q19} = 1.924$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Небаланс на валу:

$$\Delta P_{19'} := P_{\text{от.н}} - \frac{E_{q18} \cdot U_{\text{от.с}}}{X'_{\text{п.ав.р.}}} \cdot \sin(\delta_{18'}) = -0.134$$

$$a_{19'} := \frac{3 \cdot 314}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{19'} = -8.41$$

$$\Delta \delta_{19'} := \Delta t^2 \cdot a_{19'} + \Delta \delta_{18'} = 0.113$$

Угол в конце интервала:

$$\delta_{19'} := \delta_{18'} + \Delta \delta_{19'} = 1.624$$

Двадцатый интервал:

$$t_{20} := t_{19} + \Delta t = 1$$

$$E_{qe20} := E_{qe0} + (E_{qe\text{пр}} - E_{qe0}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{20}}{T_e}}\right) = 4.952$$

$$E_{qe20\text{ср}} := \frac{E_{qe19} + E_{qe20}}{2} = 4.947$$

$$E'_{q19} := \frac{E'_{q19} - \frac{U_{\text{от.с}}}{X'_{\text{п.ав.р.}}} \cdot \left(\frac{X_q}{3} - \frac{X'_d}{3}\right) \cdot \cos(\delta_{19'})}{\frac{X_q}{3} - \frac{X'_d}{3} - \frac{1}{X'_{\text{п.ав.р.}}}} = 1.98$$

$$\Delta E'_{q20} := \frac{E_{qe20\text{ср}} - E'_{q19}}{T_{\text{до}}} \cdot \Delta t = 0.027$$

Величина переходной ЭДС в конце интервала:

$$E'_{q20} := E'_{q19} + \Delta E'_{q20} = 1.951$$

Небаланс на валу:

$$\Delta P_{20'} := P_{\text{от.н}} - \frac{E_{q19} \cdot U_{\text{от.с}}}{X'_{\text{п.ав.р.}}} \cdot \sin(\delta_{19'}) = -0.152$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$a_{20}' := \frac{314.5}{T_{j\Sigma}} \cdot \Delta P_{20}' = -15.905$$

$$\Delta\delta_{20}' := \Delta t^2 \cdot a_{20}' + \Delta\delta_{19}' = 0.073$$

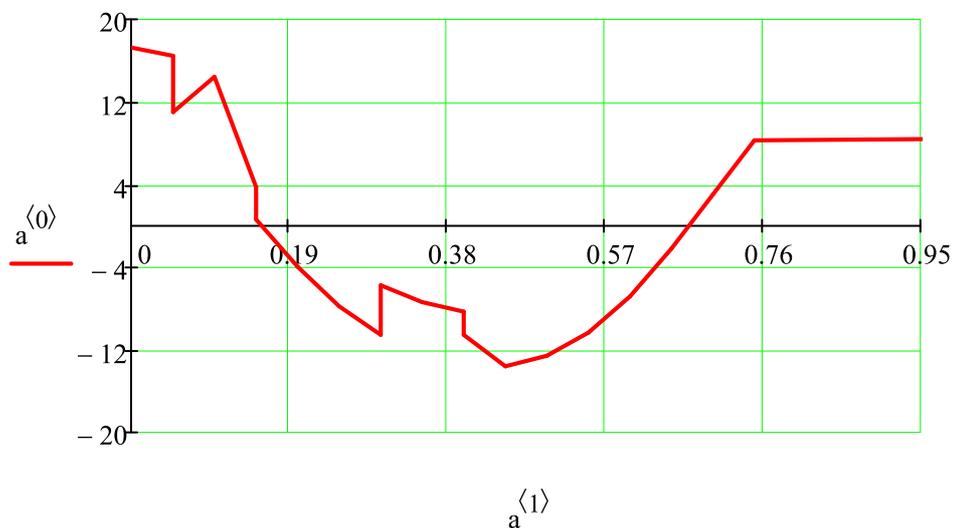
Угол в конце интервала:

$$\delta_{20}' := \delta_{19}' + \Delta\delta_{20}' = 1.697$$

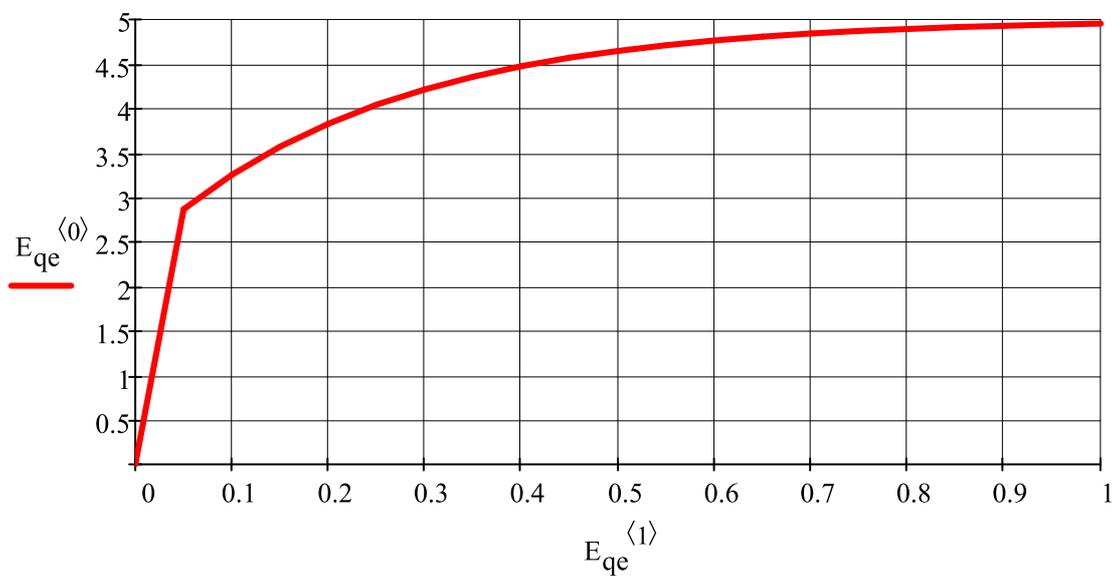
$E'_q :=$	$E_{qe} :=$	$a' :=$
$E'_{q0} \quad 0$ $E'_{q1} \quad 0.05$ $E'_{q2} \quad 0.1$ $E'_{q3} \quad 0.15$ $E'_{q4} \quad 0.2$ $E'_{q5} \quad 0.25$ $E'_{q6} \quad 0.3$ $E'_{q7} \quad 0.35$ $E'_{q8} \quad 0.4$ $E'_{q9} \quad 0.45$ $E'_{q10} \quad 0.5$ $E'_{q11} \quad 0.55$ $E'_{q12} \quad 0.6$ $E'_{q13} \quad 0.65$ $E'_{q14} \quad 0.7$ $E'_{q15} \quad 0.75$ $E'_{q16} \quad 0.8$ $E'_{q17} \quad 0.85$ $E'_{q18} \quad 0.9$ $E'_{q19} \quad 0.95$ $E'_{q20} \quad 1$	$E_{qe0} \quad 0$ $E_{qe1} \quad 0.05$ $E_{qe2} \quad 0.1$ $E_{qe3} \quad 0.15$ $E_{qe4} \quad 0.2$ $E_{qe5} \quad 0.25$ $E_{qe6} \quad 0.3$ $E_{qe7} \quad 0.35$ $E_{qe8} \quad 0.4$ $E_{qe9} \quad 0.45$ $E_{qe10} \quad 0.5$ $E_{qe11} \quad 0.55$ $E_{qe12} \quad 0.6$ $E_{qe13} \quad 0.65$ $E_{qe14} \quad 0.7$ $E_{qe15} \quad 0.75$ $E_{qe16} \quad 0.8$ $E_{qe17} \quad 0.85$ $E_{qe18} \quad 0.9$ $E_{qe19} \quad 0.95$ $E_{qe20} \quad 1$	$a_{1'} \quad 0$ $a_{21'} \quad 0.05$ $a_{22'} \quad 0.05$ $a_{3'} \quad 0.1$ $a_{41'} \quad 0.15$ $a_{42'} \quad 0.15$ $a_{5'} \quad 0.2$ $a_{6'} \quad 0.25$ $a_{71'} \quad 0.3$ $a_{72'} \quad 0.3$ $a_{8'} \quad 0.35$ $a_{91'} \quad 0.4$ $a_{92'} \quad 0.4$ $a_{10'} \quad 0.45$ $a_{11'} \quad 0.5$ $a_{12'} \quad 0.55$ $a_{13'} \quad 0.6$ $a_{14'} \quad 0.65$ $a_{15'} \quad 0.7$ $a_{16'} \quad 0.75$ $a_{17'} \quad 0.8$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Зависимость ускорения от времени



Зависимость E_{qe} от времени



$$K_{упр0} := \frac{\delta_0}{\delta_0} = 1$$

$$K_{утч0} := \frac{\delta'_0}{\delta'_0} = 1$$

$$K_{упр1} := \frac{\delta_1}{\delta_0} = 1.049$$

$$K_{утч1} := \frac{\delta'_1}{\delta'_0} = 1.016$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$K_{\text{упр}2} := \frac{\delta_2}{\delta_0} = 1.176$$

$$K_{\text{утч}2} := \frac{\delta_{2'}}{\delta'_0} = 1.107$$

$$K_{\text{упр}3} := \frac{\delta_3}{\delta_0} = 1.384$$

$$K_{\text{утч}3} := \frac{\delta_{3'}}{\delta'_0} = 1.239$$

$$K_{\text{упр}4} := \frac{\delta_4}{\delta_0} = 1.605$$

$$K_{\text{утч}4} := \frac{\delta_{4'}}{\delta'_0} = 1.366$$

$$K_{\text{упр}5} := \frac{\delta_5}{\delta_0} = 1.803$$

$$K_{\text{утч}5} := \frac{\delta_{5'}}{\delta'_0} = 1.414$$

$$K_{\text{упр}6} := \frac{\delta_6}{\delta_0} = 1.958$$

$$K_{\text{утч}6} := \frac{\delta_{6'}}{\delta'_0} = 1.285$$

$$K_{\text{упр}7} := \frac{\delta_7}{\delta_0} = 2.066$$

$$K_{\text{утч}7} := \frac{\delta_{7'}}{\delta'_0} = 1.109$$

$$K_{\text{упр}8} := \frac{\delta_8}{\delta_0} = 2.132$$

$$K_{\text{утч}8} := \frac{\delta_{8'}}{\delta'_0} = 0.977$$

$$K_{\text{упр}9} := \frac{\delta_9}{\delta_0} = 2.145$$

$$K_{\text{утч}9} := \frac{\delta_{9'}}{\delta'_0} = 0.93$$

$$K_{\text{упр}10} := \frac{\delta_{10}}{\delta_0} = 2.081$$

$$K_{\text{утч}10} := \frac{\delta_{10'}}{\delta'_0} = 0.998$$

$$K_{\text{упр}11} := \frac{\delta_{11}}{\delta_0} = 1.945$$

$$K_{\text{утч}11} := \frac{\delta_{11'}}{\delta'_0} = 1.175$$

$$K_{\text{упр}12} := \frac{\delta_{12}}{\delta_0} = 1.751$$

$$K_{\text{утч}12} := \frac{\delta_{12'}}{\delta'_0} = 1.445$$

$$K_{\text{упр}13} := \frac{\delta_{13}}{\delta_0} = 1.519$$

$$K_{\text{утч}13} := \frac{\delta_{13'}}{\delta'_0} = 1.788$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$K_{\text{упр14}} := \frac{\delta_{14}}{\delta_0} = 1.274$$

$$K_{\text{утч14}} := \frac{\delta_{14'}}{\delta'_0} = 2.078$$

$$K_{\text{упр15}} := \frac{\delta_{15}}{\delta_0} = 1.046$$

$$K_{\text{утч15}} := \frac{\delta_{15'}}{\delta'_0} = 2.368$$

$$K_{\text{упр16}} := \frac{\delta_{16}}{\delta_0} = 0.865$$

$$K_{\text{утч16}} := \frac{\delta_{16'}}{\delta'_0} = 2.676$$

$$K_{\text{упр17}} := \frac{\delta_{17}}{\delta_0} = 0.756$$

$$K_{\text{утч17}} := \frac{\delta_{17'}}{\delta'_0} = 2.987$$

$$K_{\text{упр18}} := \frac{\delta_{18}}{\delta_0} = 0.733$$

$$K_{\text{утч18}} := \frac{\delta_{18'}}{\delta'_0} = 3.278$$

$$K_{\text{упр19}} := \frac{\delta_{19}}{\delta_0} = 0.801$$

$$K_{\text{утч19}} := \frac{\delta_{19'}}{\delta'_0} = 3.522$$

$$K_{\text{упр20}} := \frac{\delta_{20}}{\delta_0} = 0.949$$

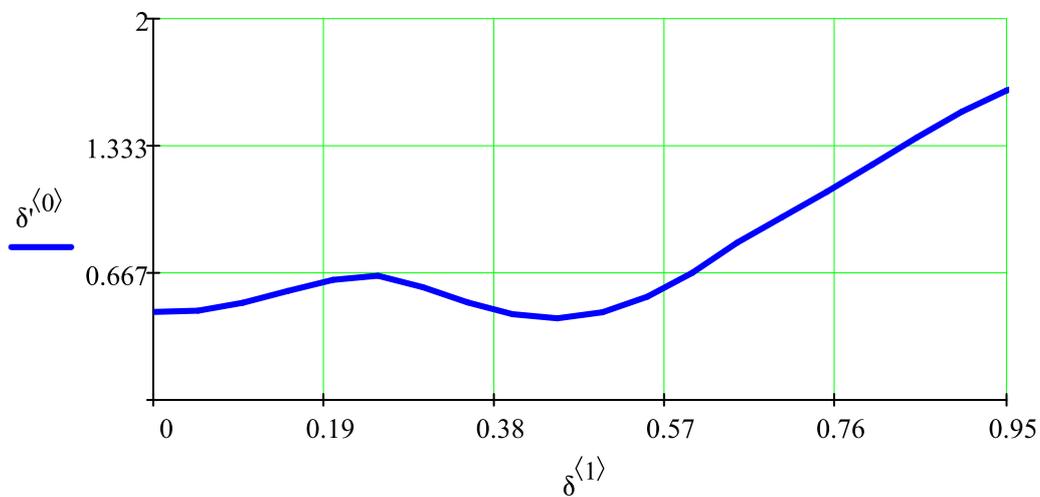
$$K_{\text{утч20}} := \frac{\delta_{20'}}{\delta'_0} = 3.681$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

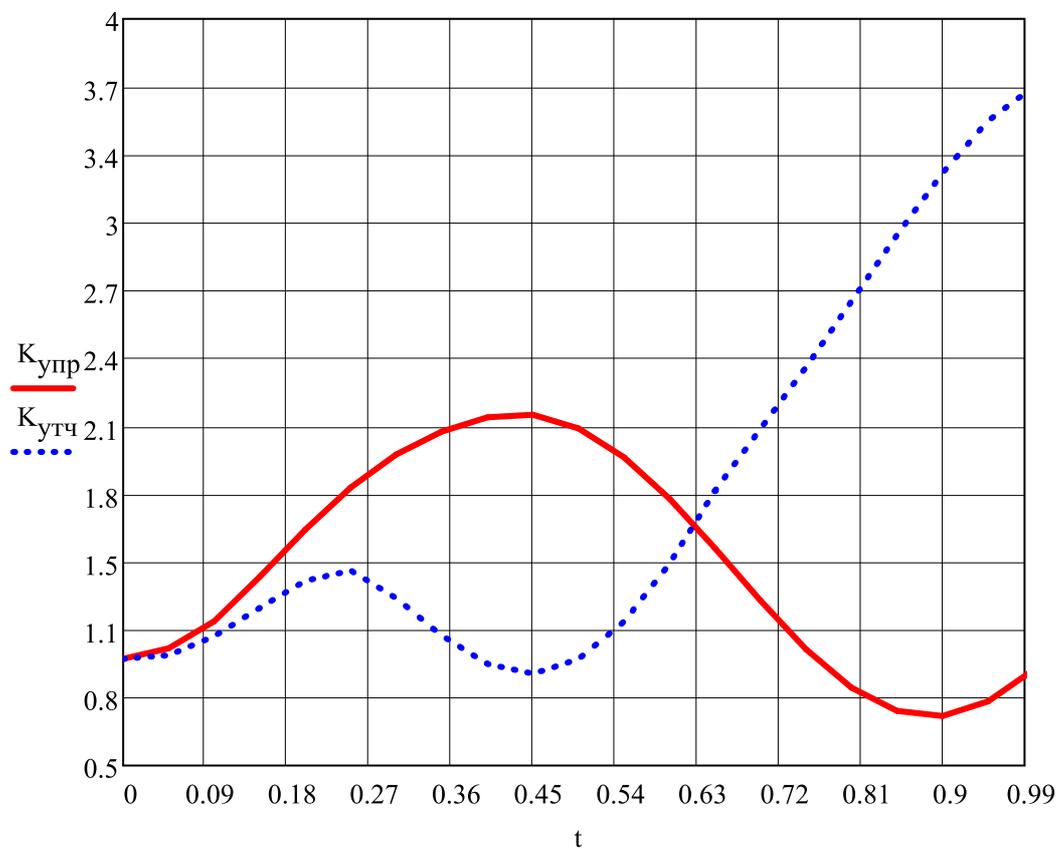
$K_{упр} :=$	$K_{утч} :=$	$t :=$	$\delta' :=$
$\begin{pmatrix} K_{упр0} \\ K_{упр1} \\ K_{упр2} \\ K_{упр3} \\ K_{упр4} \\ K_{упр5} \\ K_{упр6} \\ K_{упр7} \\ K_{упр8} \\ K_{упр9} \\ K_{упр10} \\ K_{упр11} \\ K_{упр12} \\ K_{упр13} \\ K_{упр14} \\ K_{упр15} \\ K_{упр16} \\ K_{упр17} \\ K_{упр18} \\ K_{упр19} \\ K_{упр20} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} K_{утч0} \\ K_{утч1} \\ K_{утч2} \\ K_{утч3} \\ K_{утч4} \\ K_{утч5} \\ K_{утч6} \\ K_{утч7} \\ K_{утч8} \\ K_{утч9} \\ K_{утч10} \\ K_{утч11} \\ K_{утч12} \\ K_{утч13} \\ K_{утч14} \\ K_{утч15} \\ K_{утч16} \\ K_{утч17} \\ K_{утч18} \\ K_{утч19} \\ K_{утч20} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0.05 \\ 0.1 \\ 0.15 \\ 0.2 \\ 0.25 \\ 0.3 \\ 0.35 \\ 0.4 \\ 0.45 \\ 0.5 \\ 0.55 \\ 0.6 \\ 0.65 \\ 0.7 \\ 0.75 \\ 0.8 \\ 0.85 \\ 0.9 \\ 0.95 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \delta'_{0'} & 0 \\ \delta'_{1'} & 0.05 \\ \delta'_{2'} & 0.1 \\ \delta'_{3'} & 0.15 \\ \delta'_{4'} & 0.2 \\ \delta'_{5'} & 0.25 \\ \delta'_{6'} & 0.3 \\ \delta'_{7'} & 0.35 \\ \delta'_{8'} & 0.4 \\ \delta'_{9'} & 0.45 \\ \delta'_{10'} & 0.5 \\ \delta'_{11'} & 0.55 \\ \delta'_{12'} & 0.6 \\ \delta'_{13'} & 0.65 \\ \delta'_{14'} & 0.7 \\ \delta'_{15'} & 0.75 \\ \delta'_{16'} & 0.8 \\ \delta'_{17'} & 0.85 \\ \delta'_{18'} & 0.9 \\ \delta'_{19'} & 0.95 \\ \delta'_{20'} & 1 \end{pmatrix}$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Уточненная зависимость угла от времени



Изменение вылета ротора при выражении угла $\delta_{(i)}$ в долях от соответствующего начального угла



ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Статическая устойчивость асинхронной нагрузки:

$$P_H = 300 \quad \cos\phi = 0.85 \quad T_{j.c} = 6 \quad P_0 := P_{от.н} = 1.667$$
$$\sin\phi := \sqrt{1 - \cos\phi^2} = 0.527 \quad X_c := 0.1 \quad Q_0 := Q_{от.н} = 1.033$$

Комплексное сопротивление нагрузки:

$$S_{нагр} := \frac{P_H}{\cos\phi} = 352.941$$

$$z_H := \frac{S_0}{S_{нагр}} \cdot (\cos\phi + j \cdot \sin\phi) = 0.434 + 0.269i$$

Активное сопротивление

$$s_0 = 0.03$$

$$R_2 := \operatorname{Re}(z_H) \cdot s_0 = 0.013$$

Генератор без АРВ

$$x_{\Sigma 1} := X_{Г.эқв.1} + X_c + \operatorname{Im}(z_H) = 0.469$$

$$s_{кр.Е.1} := \frac{R_2}{x_{\Sigma 1}} = 0.028$$

$$P_{max1} := \frac{U_{от.с}^2}{2 \cdot x_{\Sigma 1}} = 1.067$$

$$E_{Гкр1} := \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot x_{\Sigma 1}} = 0.968$$

Критическое напряжение на шинах:

$$U_{нкp1} := \sqrt{\left[E_{Гкр1} - \frac{Q_0 \cdot (X_{Г.эқв.1} + X_c)}{E_{Гкр1}} \right]^2 + \left[\frac{P_0 \cdot (X_{Г.эқв.1} + X_c)}{E_{Гкр1}} \right]^2} = 0.83$$

$$K_{зу1} := \frac{U_{от.с} - U_{нкp1}}{U_{от.с}} \cdot 100 = 17.041$$

Нагрузка является устойчивой

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Генератор с АРВ ПТ

$$x_{\Sigma 2} := X_{Г.экв.2} + X_c + \text{Im}(z_H) = 0.439$$

$$s_{кр2} := \frac{R_2}{x_{\Sigma 2}} = 0.03$$

$$P_{\max 2} := \frac{U_{от.с}^2}{2 \cdot x_{\Sigma 2}} = 1.14$$

$$E_{Гкр2} := \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot x_{\Sigma 2}} = 0.937$$

Критическое напряжение на шинах:

$$U_{нкp2} := \sqrt{\left[E_{Гкр2} - \frac{Q_0 \cdot (X_{Г.экв.2} + X_c)}{E_{Гкр2}} \right]^2 + \left[\frac{P_0 \cdot (X_{Г.экв.2} + X_c)}{E_{Гкр2}} \right]^2} = 0.808$$

$$K_{зу2} := \frac{U_{от.с} - U_{нкp2}}{U_{от.с}} \cdot 100 = 19.205$$

Нагрузка является устойчивой

Генератор с АРВ СД

$$x_{\Sigma 3} := X_{Г.экв.3} + X_c + \text{Im}(z_H) = 0.369$$

$$s_{кр3} := \frac{R_2}{x_{\Sigma 3}} = 0.035$$

$$P_{\max 3} := \frac{U_{от.с}^2}{2 \cdot x_{\Sigma 3}} = 1.356$$

$$E_{Гкр3} := \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot x_{\Sigma 3}} = 0.859$$

Критическое напряжение на шинах:

$$U_{нкp3} := \sqrt{\left[E_{Гкр3} - \frac{Q_0 \cdot (X_{Г.экв.3} + X_c)}{E_{Гкр3}} \right]^2 + \left[\frac{P_0 \cdot (X_{Г.экв.3} + X_c)}{E_{Гкр3}} \right]^2} = 0.763$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$K_{\text{зи3}} := \frac{U_{\text{от.с}} - U_{\text{нкр3}}}{U_{\text{от.с}}} \cdot 100 = 23.653$$

Нагрузка является устойчивой

Статическая устойчивость типовой нагрузки

Характеристика типовой нагрузки

$U_{\text{нагр.}}, \text{ о.е.}$	1,0	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7
$P_{\text{нагр.}}, \text{ о.е.}$	1,0	0,969	0,941	0,916	0,893	0,872	0,855
$Q_{\text{нагр.}}, \text{ о.е.}$	1,0	0,93	0,885	0,858	0,844	0,848	0,880

$$P_{\text{H1}} := P_0 = 1.667$$

$$Q_{\text{H1}} := Q_0 = 1.033$$

$$P_{\text{H2}} := P_0 \cdot 0.969 = 1.615$$

$$Q_{\text{H2}} := Q_0 \cdot 0.93 = 0.961$$

$$P_{\text{H3}} := P_0 \cdot 0.941 = 1.568$$

$$Q_{\text{H3}} := Q_0 \cdot 0.885 = 0.914$$

$$P_{\text{H4}} := P_0 \cdot 0.916 = 1.527$$

$$Q_{\text{H4}} := Q_0 \cdot 0.858 = 0.886$$

$$P_{\text{H5}} := P_0 \cdot 0.893 = 1.488$$

$$Q_{\text{H5}} := Q_0 \cdot 0.844 = 0.872$$

$$P_{\text{H6}} := P_0 \cdot 0.872 = 1.453$$

$$Q_{\text{H6}} := Q_0 \cdot 0.848 = 0.876$$

$$P_{\text{H7}} := P_0 \cdot 0.855 = 1.425$$

$$Q_{\text{H7}} := Q_0 \cdot 0.88 = 0.909$$

$$E_{\text{ЭКВ1}} := \sqrt{\left[1 + \frac{Q_{\text{H1}} \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}})}{1}\right]^2 + \left[\frac{P_{\text{H1}} \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}})}{1}\right]^2} = 1.209$$

$$E_{\text{ЭКВ2}} := \sqrt{\left[0.95 + \frac{Q_{\text{H2}} \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}})}{0.95}\right]^2 + \left[\frac{P_{\text{H2}} \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}})}{0.95}\right]^2} = 1.159$$

$$E_{\text{ЭКВ3}} := \sqrt{\left[0.9 + \frac{Q_{\text{H3}} \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}})}{0.9}\right]^2 + \left[\frac{P_{\text{H3}} \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}})}{0.9}\right]^2} = 1.113$$

$$E_{\text{ЭКВ4}} := \sqrt{\left[0.85 + \frac{Q_{\text{H4}} \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}})}{0.85}\right]^2 + \left[\frac{P_{\text{H4}} \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}})}{0.85}\right]^2} = 1.072$$

$$E_{\text{ЭКВ5}} := \sqrt{\left[0.8 + \frac{Q_{\text{H5}} \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}})}{0.8}\right]^2 + \left[\frac{P_{\text{H5}} \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}})}{0.8}\right]^2} = 1.035$$

$$E_{\text{ЭКВ6}} := \sqrt{\left[0.75 + \frac{Q_{\text{H6}} \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}})}{0.75}\right]^2 + \left[\frac{P_{\text{H6}} \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}})}{0.75}\right]^2} = 1.004$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$E_{\text{ЭКВ}7} := \sqrt{\left[0.7 + \frac{Q_{\text{H}7} \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}})}{0.7}\right]^2 + \left[\frac{P_{\text{H}7} \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}})}{0.7}\right]^2} = 0.984$$

$$\Delta Q_{\text{ЭКВ}1} := \left(\frac{P_{\text{H}1}^2 + Q_{\text{H}1}^2}{1^2}\right) \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}}) = 0.654$$

$$\Delta Q_{\text{ЭКВ}2} := \left(\frac{P_{\text{H}2}^2 + Q_{\text{H}2}^2}{0.95^2}\right) \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}}) = 0.665$$

$$\Delta Q_{\text{ЭКВ}3} := \left(\frac{P_{\text{H}3}^2 + Q_{\text{H}3}^2}{0.9^2}\right) \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}}) = 0.692$$

$$\Delta Q_{\text{ЭКВ}4} := \left(\frac{P_{\text{H}4}^2 + Q_{\text{H}4}^2}{0.85^2}\right) \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}}) = 0.733$$

$$\Delta Q_{\text{ЭКВ}5} := \left(\frac{P_{\text{H}5}^2 + Q_{\text{H}5}^2}{0.8^2}\right) \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}}) = 0.79$$

$$\Delta Q_{\text{ЭКВ}6} := \left(\frac{P_{\text{H}6}^2 + Q_{\text{H}6}^2}{0.75^2}\right) \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}}) = 0.87$$

$$\Delta Q_{\text{ЭКВ}7} := \left(\frac{P_{\text{H}7}^2 + Q_{\text{H}7}^2}{0.7^2}\right) \cdot (X_{\text{Г.ЭКВ.2}} + X_{\text{с}}) = 0.991$$

$$Q_{\text{ЭКВ}1} := Q_{\text{H}1} + \Delta Q_{\text{ЭКВ}1} = 1.687$$

$$Q_{\text{ЭКВ}2} := Q_{\text{H}2} + \Delta Q_{\text{ЭКВ}2} = 1.626$$

$$Q_{\text{ЭКВ}3} := Q_{\text{H}3} + \Delta Q_{\text{ЭКВ}3} = 1.606$$

$$Q_{\text{ЭКВ}4} := Q_{\text{H}4} + \Delta Q_{\text{ЭКВ}4} = 1.619$$

$$Q_{\text{ЭКВ}5} := Q_{\text{H}5} + \Delta Q_{\text{ЭКВ}5} = 1.662$$

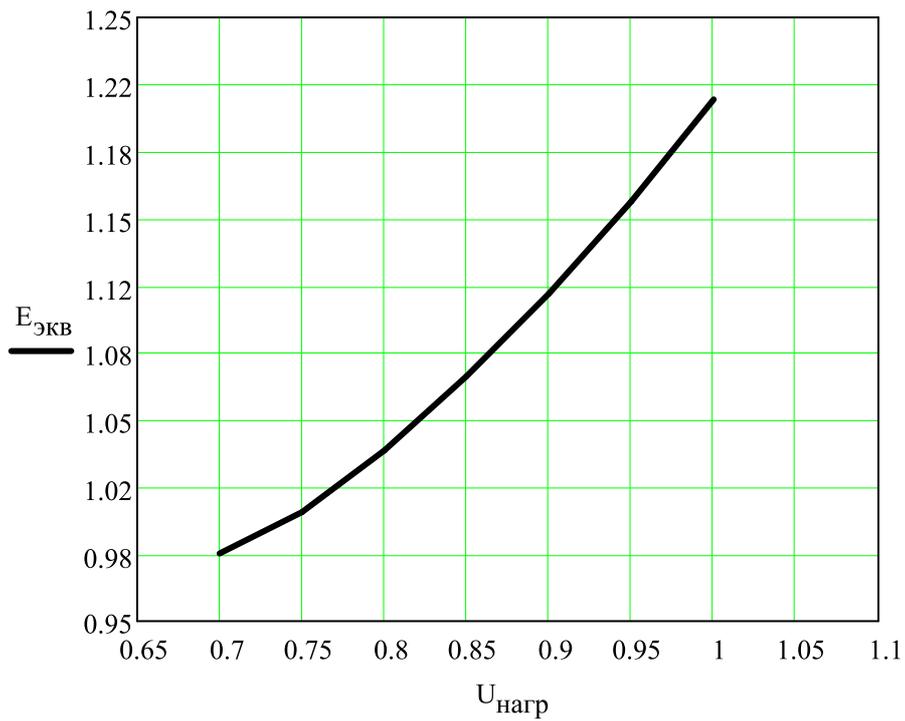
$$Q_{\text{ЭКВ}6} := Q_{\text{H}6} + \Delta Q_{\text{ЭКВ}6} = 1.746$$

$$Q_{\text{ЭКВ}7} := Q_{\text{H}7} + \Delta Q_{\text{ЭКВ}7} = 1.9$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

$$\begin{matrix} E_{\text{ЭКВ}} := & \begin{pmatrix} E_{\text{ЭКВ1}} \\ E_{\text{ЭКВ2}} \\ E_{\text{ЭКВ3}} \\ E_{\text{ЭКВ4}} \\ E_{\text{ЭКВ5}} \\ E_{\text{ЭКВ6}} \\ E_{\text{ЭКВ7}} \end{pmatrix} & Q_{\text{ЭКВ}} := & \begin{pmatrix} Q_{\text{ЭКВ1}} \\ Q_{\text{ЭКВ2}} \\ Q_{\text{ЭКВ3}} \\ Q_{\text{ЭКВ4}} \\ Q_{\text{ЭКВ5}} \\ Q_{\text{ЭКВ6}} \\ Q_{\text{ЭКВ7}} \end{pmatrix} & U_{\text{нагр}} := & \begin{pmatrix} 1 \\ 0.95 \\ 0.9 \\ 0.85 \\ 0.8 \\ 0.75 \\ 0.7 \end{pmatrix}
 \end{matrix}$$

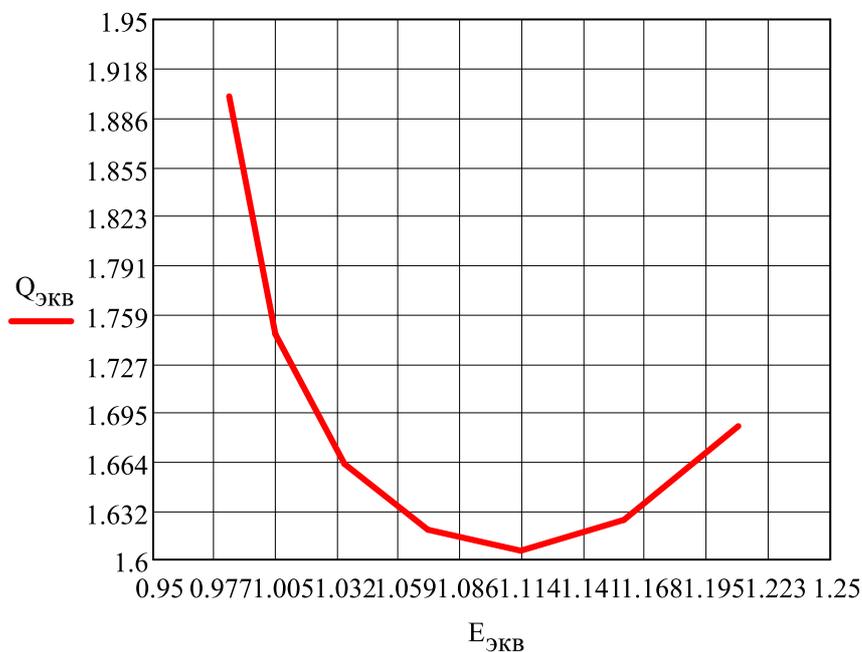
Зависимость $E_{\text{ЭКВ}}$ от $U_{\text{нагр}}$



$$U_{\text{нкp4}} := 0.78$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет переходного процесса в программе MathCad 15

Зависимость $Q_{\text{ЭКВ}}$ от $E_{\text{ЭКВ}}$



$$K_{\text{зу4}} := \frac{U_{\text{от.с}} - U_{\text{нкр4}}}{U_{\text{от.с}}} \cdot 100 = 22$$

Нагрузка статически устойчива.

Динамическая устойчивость асинхронной нагрузки

$$P_{\text{max}} := \frac{1^2}{2 \cdot \text{Im}(z_{\text{H}})} = 1.861$$

$$K_{\text{max}} := \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{от.н}}} = 1.117$$

$$s_{\text{кр}} := \frac{R_2}{\text{Im}(z_{\text{H}})} = 0.048$$

Находим предельное скольжение

$$M_{\text{H}}(s_{\text{пр}}) := \frac{2 \cdot K_{\text{max}}}{\frac{s_{\text{пр}}}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s_{\text{пр}}}} - P_{\text{от.н}}$$

Подкоренное выражение оказалось положительным. Это означает, что при перерыве электроснабжения самозапуск двигателя обеспечивается.