

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

На правах рукописи



Чумаченко Виталий Валерьевич

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ
ТОРМОЗОМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Специальность 05.14.02 – электрические станции и электроэнергетические системы

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, Кузнецов Олег Николаевич

Москва – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОБЗОР СПОСОБОВ УЛУЧШЕНИЯ УСЛОВИЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ И СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ	12
2.ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭМТ НА УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЭС	26
2.1. Математическая модель ЭМТ и его системы регулирования	28
2.2. Исследование статической устойчивости на примере простейшей энергосистемы.....	35
2.2.1. Исследование свободного движения системы.....	35
2.2.2. Исследование движения системы с ЭМТ.....	38
2.3. Исследование динамической устойчивости на примере простейшей энергосистемы.	43
3. СИНТЕЗ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ ЭМТ.....	47
3.1. Оптимальное управление мощностью ЭМТ для обеспечения устойчивости ЭЭС	47
3.1.1. Общие сведения о принципе максимума Понтрягина.	48
3.1.2. Применение принципа максимума Понтрягина для простейшей ЭЭС.....	49
3.1.3. Решение двухточечной краевой задачи методом стрельбы.	52
3.1.4. Алгоритм решения задачи оптимального управления ЭМТ	54
3.1.5. Оптимальное управление ЭМТ.....	57
3.2. Синтез закона управления с применением метода «обратного решения»	67
3.3. Инженерный подход в синтезе закона управления ЭМТ	74
3.4. Сопоставление синтезированных законов управления с оптимальным.....	105
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЭМТ В МНОГОМАШИННЫХ СХЕМАХ.....	109
4.1. Исследование в схеме IEEE.....	109
4.2. Исследование возможностей ЭМТ на примере Тюменской энергосистемы.....	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	130
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:	132
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Описание ПК DIgSILENT PowerFactory v 15.1.	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Исходные данные по 14-узловой 5-ти генераторной схеме IEEE.....	144

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Основной задачей функционирования электроэнергетической системы (ЭЭС) является экономичное и надёжное электроснабжение потребителей при обеспечении требуемого качества электроэнергии. Все элементы ЭЭС связаны единством процессов генерирования, передачи, распределения и потребления электрической энергии и процессов, появляющихся при изменении состояния системы [1]. Одним из основных требований надёжной работы ЭЭС является сохранение синхронной работы генераторов в составе единой энергетической системы. Протекание переходных процессов существенно влияет на условия работы ЭЭС и в первую очередь на надёжность её работы, устойчивость и живучесть.

В установившемся режиме на валу каждого агрегата обеспечивается баланс вырабатываемой и потребляемой активной мощности, все генерирующие агрегаты работают с одинаковой частотой вращения. В случае нарушения баланса активной мощности на валу агрегата начинается его торможение или ускорение в зависимости от вида возмущения по отношению к другим параллельно работающим агрегатам – возникает электромеханический переходный процесс, сопровождающийся изменением углов между векторами ЭДС. Длительность и интенсивность электромеханического переходного процесса зависит от постоянных инерции и других параметров вращающихся агрегатов, характеристик электрической сети, характера и интенсивности возмущения, действия устройств противоаварийного управления.

Нарушение синхронной работы генератора с остальной частью энергосистемы приводит к значительным колебаниям параметров электрического режима (токов, напряжений и т.д.) и последующему срабатыванию устройств противоаварийной автоматики. В зависимости от объёма управляющих воздействий, это может привести к отключению выпавших из синхронизма

генераторов, нарушению электроснабжения большого числа потребителей или, в худшем случае, полному развалу энергосистемы. Поэтому обеспечение устойчивости электроэнергетической системы является одной из важнейших задач при её проектировании и эксплуатации.

Сложность задачи обеспечения динамической устойчивости и управления переходными режимами ЭЭС, в первую очередь, вызвана непрерывностью производства и потребления электрической энергии – строгим соответствием произведённой и потребленной электроэнергии в каждый момент времени [2]. Задача обеспечения устойчивости ЭЭС охватывает широкий круг вопросов, которые могут быть разделены на:

- анализ установившихся режимов и электромеханических переходных процессов в управляемых электроэнергетических системах;
- определение наиболее эффективных управляющих воздействий, их сочетаний и законов управления, обеспечивающих устойчивость энергосистем и энергообъединений;
- разработку новых технических способов и средств обеспечения динамической устойчивости энергосистем.

В настоящее время известен ряд технических способов и организационных мероприятий, позволяющих улучшить условия протекания электромеханических переходных процессов, каждый из которых характеризуется своими достоинствами и недостатками.

Относительно новым средством улучшения условий динамической устойчивости является электромагнитный тормоз (ЭМТ) [3]. При включении ЭМТ в работу устройство создаёт дополнительный нагрузочный момент, тем самым воздействуя непосредственно на баланс моментов на валу генерирующего агрегата. Проведенные исследования [4] показали, что работа ЭМТ позволяет предотвратить нарушения динамической устойчивости генерирующих агрегатов в крупной энергосистеме.

Независимость тормозного момента от параметров режима ЭЭС, быстрдействие и эффективность работы ЭМТ может быть использована в крупных энергосистемах в местах, где остро стоят вопросы обеспечения динамической устойчивости. Одним из условий применения ЭМТ в качестве средства обеспечения динамической устойчивости является разработка законов управления мощностью ЭМТ.

Цель работы

Целью работы является разработка законов управления электромагнитным тормозом синхронных генераторов для обеспечения условий устойчивости ЭЭС при различных возмущениях. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить влияние работы ЭМТ на статическую и динамическую устойчивость энергосистемы;
- исследовать оптимальное управление ЭМТ;
- провести синтез закона управления ЭМТ;
- выбрать «квазиоптимальный» закон управления ЭМТ;
- исследовать влияние работы ЭМТ с выбранным «квазиоптимальным» законом управления на условия динамической устойчивости сложной ЭЭС, в том числе оценить возможность демпфирования слабозатухающих межсистемных колебаний.

Методы исследования

При решении поставленных задач использовались существующие подходы к математическому описанию ЭЭС с использованием систем дифференциальных и алгебраических уравнений. Решение систем дифференциальных уравнений проводилось с использованием методов численного интегрирования. Влияние ЭМТ на условия статической устойчивости были рассмотрены с применением теоремы Ляпунова об устойчивости. Синтез закона управления ЭМТ проводился с

применением метода «обратного решения», а также инженерного подхода. В качестве платформы моделирования использовался программный комплекс *Matlab 2010b* с использованием среды *Simulink*. Оптимальное управление ЭМТ получено с применением принципа максимума Понтрягина. Для написания программы расчёта оптимального управления в простейшей ЭЭС с установкой ЭМТ использовался язык программирования *Visual Basic 2010*. Для исследования электромеханических процессов в крупных энергосистемах использовался программный комплекс *DIgSILENT Power Factory 15.0* и *RastrWin 2.0*. Кроме того, для корректного импорта данных в программный комплекс *DIgSILENT Power Factory 15.0* был разработан конвертор данных на языке программирования *Visual Basic 2010*.

Научная новизна

1. Проведена оценка влияния ЭМТ на динамическую и статическую устойчивость энергосистемы. Показано, что ЭМТ улучшает условия как динамической, так и статической устойчивости;
2. Получено оптимальное управление ЭМТ простейшей ЭЭС;
3. Выполнен синтез законов управления ЭМТ и выбран «квазиоптимальный» закон управления.
4. Исследована возможность использования ЭМТ в многомашинных энергосистемах для обеспечения динамической устойчивости генерирующих агрегатов с малыми постоянными инерции и показана способность ЭМТ демпфировать слабозатухающие межсистемные колебания .

Достоверность

Достоверность полученных в работе результатов обеспечена применением корректных математических моделей элементов ЭЭС, применением широко распространённых программно-вычислительных комплексов и проведёнными проверочными расчётами.

На защиту выносятся:

1. Результаты анализа влияния работы ЭМТ на условия динамической и статической устойчивости ЭЭС;
2. Методика и результаты расчёта оптимального управления ЭМТ.
3. Законы управления ЭМТ, в том числе «квазиоптимальный» закон управления мощностью ЭМТ;
4. Результаты исследования возможностей ЭМТ по обеспечению условий динамической устойчивости ЭЭС.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Составлена упрощённая математическая модель ЭМТ для расчётов электромеханических переходных процессов с учётом системы возбуждения ЭМТ;
2. Сформирован алгоритм определения оптимального управления ЭМТ;
3. Синтезирован «квазиоптимальный» закон управления ЭМТ, который может быть применён для обеспечения динамической устойчивости сложной энергосистемы.
4. Показана эффективность работы ЭМТ с выбранным законом управления по обеспечению динамической устойчивости в сложной энергосистеме.
5. Показана возможность использования ЭМТ для демпфирования слабозатухающих колебаний по межсистемным связям.

Апробация диссертационной работы

Основные результаты работы докладывались на международной научно-технической конференции «Наука, образование, инновации: приоритетные направления развития», посвящённой 60-летию юбилею Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, 18-19 сентября 2014 г., г. Бишкек и заседании кафедры «Электроэнергетические системы» НИУ

«МЭИ». Положения диссертации были обсуждены на семинаре Лаборатории №7 «Адаптивных и робастных систем им. Я. З. Цыпкина» в Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской Академии Наук (ИПУ РАН) (15 сентября 2015 года).

Публикации

По материалам диссертации опубликованы статьи:

1. Журнал «Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ» №5-6/2014 на тему «Сопоставление эффективности законов управления электромагнитного тормоза» (авторы: Панин А.В, Чумаченко В.В., Кузнецов О.Н.),

2. Журнал «Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ» №9-10/2014 на тему «Моделирование электромагнитного тормоза для улучшения условий динамической устойчивости электроэнергетической системы» (авторы: Панин А.В, Чумаченко В.В., Кузнецов О.Н.),

3. Журнал «Вестник МЭИ» №2/2015 на тему «Синтез оптимального управления мощностью электромагнитного тормоза для улучшения условий устойчивости электроэнергетической системы» (авторы: Чумаченко В.В., Кузнецов О.Н.),

4. Журнал «Автоматика и телемеханика» №9/2016 на тему «Исследование устойчивости энергосистемы с однополярным электромагнитным тормозом» (авторы: Б.Т.Поляк, О.Н.Кузнецов, В.В.Чумаченко), а также на английском языке «Stability Study of a Power System with Unipolar Electromagnetic Brake» ISSN 0005-1179, Automation and Remote Control, 2016, Vol. 77, No. 9, pp. 1557–1566.

По материалам диссертации опубликован доклад на научно-технической конференции в «Известиях Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова №32 (Часть 1)», 18-19 сентября 2014 г., г. Бишкек на

тему «Применение электромагнитного тормоза для улучшения условий устойчивости ЭЭС» (авторы: Кузнецов О.Н., Панин А.В., Чумаченко В.В.)

Личный вклад соискателя

Доказано положительное влияние ЭМТ на условия статической и динамической устойчивости. Определена методика расчёта оптимального управления мощностью ЭМТ. Синтезировано оптимальное управление мощностью ЭМТ. Проведён синтез законов управления мощностью ЭМТ, выявлены их достоинства и недостатки. Выбран «квазиоптимальный» закон управления ЭМТ. Рассмотрены возможности ЭМТ в части улучшения условий динамической устойчивости энергосистемы большой размерности.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы включает в себя 140 страниц печатного текста, 15 таблиц и 70 рисунков. Приложение содержит 10 страниц.

Основное содержание работы

Во введении описана актуальность работы, определены цели и сформулированы задачи исследования, а также раскрыта структура диссертации.

В первой главе рассмотрен ряд существующих управляемых технических средств, способствующих обеспечению динамической устойчивости электроэнергетической системы. Описаны методы управления данными средствами. Рассмотрено новое техническое устройство – электромагнитный тормоз, способный обеспечить устойчивость ЭЭС и улучшить качество переходного процесса. Определены методы последующих исследований.

Во второй главе составлена математическая модель ЭМТ с управлением, используемая в дальнейших расчётах. Описан ряд упрощений, принимающихся в дальнейших расчётах, а также выбрано принимаемое в дальнейших расчётах значение постоянных времени обмоток возбуждения электромагнитного тормоза.

Проведено исследование влияния работы ЭМТ на условия статической и динамической устойчивости в электроэнергетической системе. Изучено поведение системы при установке ЭМТ. Доказано улучшение условий статической устойчивости системы с ЭМТ путем построения специальной функции Ляпунова. На примере простейшей энергосистемы показано улучшение условий динамической устойчивости ЭЭС при работе ЭМТ.

В третьей главе рассмотрено оптимальное управление ЭМТ для обеспечения динамической устойчивости ЭЭС. Рассмотрены варианты эффективного применения электромагнитного тормоза для обеспечения условий динамической устойчивости электроэнергетической системы. На основе принципа максимума Понтрягина сформулированы критерии оптимальности для простейшей энергосистемы с электромагнитным тормозом. Построен алгоритм решения двухточечной краевой задачи с применением метода стрельбы. Сформулированы задачи, необходимые для реализации оптимального управления электромагнитным тормозом в сложной энергосистеме в «темпе процесса». Рассмотрена задача синтеза законов управления ЭМТ. Основываясь на методе «обратного решения» проведён синтез закона управления ЭМТ в простейшей энергосистеме и показана эффективность данного метода. Сформулирован алгоритм синтеза законов управления в сложных электроэнергетических системах. Используя инженерный подход к синтезу законов управления, выбран «квазиоптимальный» закон управления ЭМТ, используемый в дальнейшем для проверки эффективности работы ЭМТ.

В четвёртой главе проведено исследование работы ЭМТ в крупной энергосистеме. На примере тестовой 14-узловой 5-ти генераторной схемы IEEE была показана эффективность работы ЭМТ в части сохранения динамической устойчивости энергосистемы. Для расчётов переходных процессов в реальной энергосистеме была выбрана Тюменская энергосистема. Устанавливая ЭМТ на различные генерирующие агрегаты энергосистемы, была показана эффективность работы ЭМТ в части сохранения динамической устойчивости крупной

энергосистемы. Кроме того, было показано, что с помощью ЭМТ можно эффективно демпфировать слабозатухающие низкочастотные колебания по межсистемным связям.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты, полученные в работе, обозначены направления дальнейших исследований.

1. ОБЗОР СПОСОБОВ УЛУЧШЕНИЯ УСЛОВИЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ И СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

В настоящее время известен ряд мероприятий и способов улучшения условия динамической устойчивости. Из общего числа можно выделить управляемые способы улучшения динамической устойчивости, такие как форсировка возбуждения (ФВ), управляемые устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ), импульсная разгрузка турбины (ИРТ), механическое торможение (МТ), электрическое торможение (ЭТ).

Форсировка возбуждения [2,5-7]. Форсировка возбуждения применяется для сохранения устойчивой синхронной работы генератора с системой при возникновении коротких замыканий в прилегающей сети. Принцип работы заключается в увеличении напряжения на зажимах обмотки возбуждения синхронного генератора до потолочного значения при возникновении скольжения ротора синхронного генератора или при снижении напряжения ниже 85% от номинального значения. Увеличение напряжения выполняется путём изменения угла зажигания тиристорov возбуждателя. При этом возбуждатель переводится в режим с потолочным напряжением. Кратность ФВ, определяемая отношением потолочного напряжения на роторе к номинальному, согласно [8], должна быть не менее 2. ФВ – быстродействующее средство улучшения динамической устойчивости, так как скорость нарастания напряжения возбуждателя определяется только постоянной времени возбуждателя [9]. Режим ФВ является кратковременным [10] (например, для турбогенераторов с непосредственным охлаждением работа РФ допускается в течение 20 сек). Во избежание перерегулирования необходима также расфорсировка возбуждения – принудительное снижение напряжения и тока возбуждения от потолочного до заданного.

Таким образом, управление током возбуждения при ФВ осуществляется при достижении уставок срабатывания (по напряжению или скольжению) и

обеспечивает максимальную скорость нарастания напряжения возбуждения в аварийных режимах.

Управляемые устройства компенсации реактивной мощности [11-14].

Устройства компенсации реактивной мощности позволяют регулировать напряжение в точке подключения к энергосистеме, повысить пропускную способность линий электропередачи, а также улучшить условия как статической, так и динамической устойчивости системы путём демпфирования колебаний, возникающих в ЭЭС при возникновении возмущений. В настоящее время существует широкая группа управляемых УКРМ, позволяющие обеспечить необходимое качество переходных процессов в ЭЭС (рисунок 1.1):

- Статические тиристорные компенсаторы (СТК);
- Управляемые шунтирующие реакторы (УШР);
- Статический компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ);
- Управляемая продольная ёмкостная компенсация (УПК).

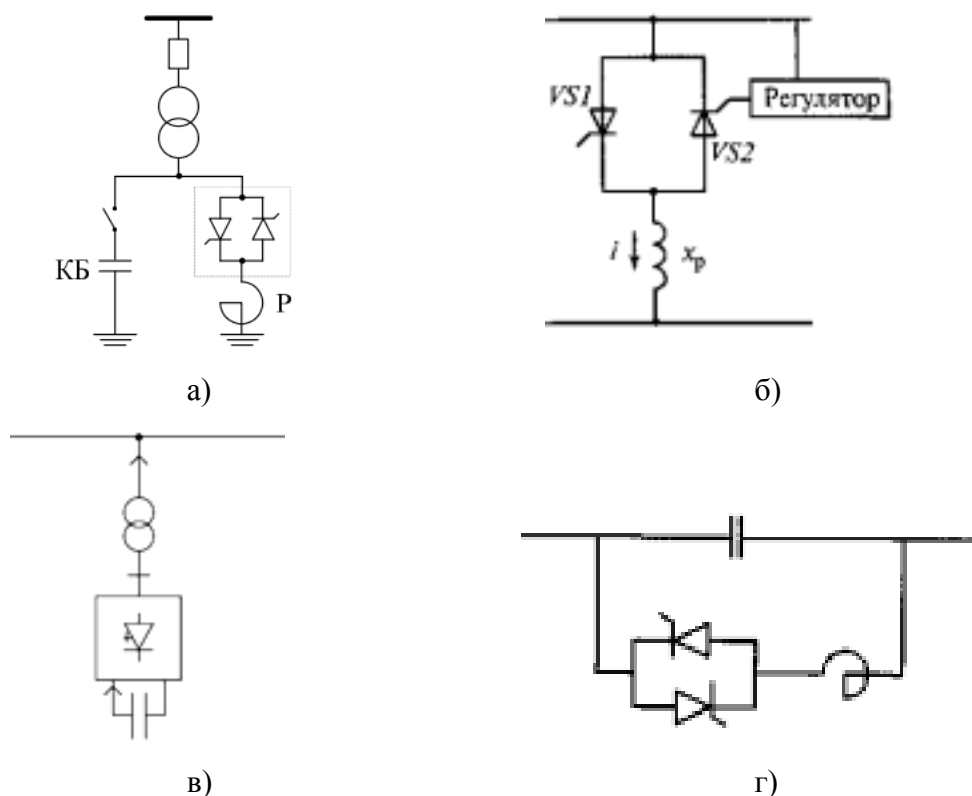


Рисунок 1.1 – Управляемые УКРМ. (а – СТК; б – УШР; в – СТАТКОМ; г – УПК)

В настоящее время описанные устройства используют полностью управляемые тиристоры, на которые подаётся управляющие импульсы в виде угла отпирания и запираания тиристора. Применение тиристорных преобразователей обеспечивает практически безынерционное регулирование реактивной мощности [15]. Устройства СТК, УШР и СТАТКОМ реагируют на изменение напряжения в точке присоединения к сети, на тиристоры поступает управляющий сигнал, который изменяет потребление/генерацию реактивной мощности, тем самым поддерживая напряжение в контролируемом узле и демпфируя возникающие колебания электрического режима. УПК с тиристорным управлением регулирует электромагнитную характеристику линии путём изменения тока, протекающего через реактор, определяя степень компенсации электропередачи.

Импульсная разгрузка турбины [7]. ИРТ называется быстрое уменьшение мощности турбины за счет прикрытия регулирующих клапанов на период до нескольких секунд, осуществляемое путем подачи управляющего сигнала на электрогидравлический преобразователь (ЭГП). Работа ИРТ значительно снижает амплитуду первого вылета угла ротора генератора во время аварийного возмущения, что позволяет сохранить устойчивость в первом цикле качаний ротора.

Управляющий сигнал представляет собой импульс тока с определённой амплитудой $A_{и}$ и длительностью $T_{и}$ (рисунок 1.2). Изменяя амплитуду и длительность импульса, можно управлять глубиной и скоростью разгрузки турбины. Выбор амплитуды и длительности управляющего импульса осуществляется автоматически. Каналами, влияющими на выбор управляющего импульса, могут выступать величина и длительность сброса электрической мощности, изменение напряжения на шинах электростанции, изменение скорости и ускорение ротора генератора и другие параметры [16]. Для ИРТ характерна большая величина времени задержки срабатывания (порядка 0,15-0,2 с), обусловленной инерционностью элементов гидравлической системы регулирования и наличием паровых объёмов перед турбиной [17].

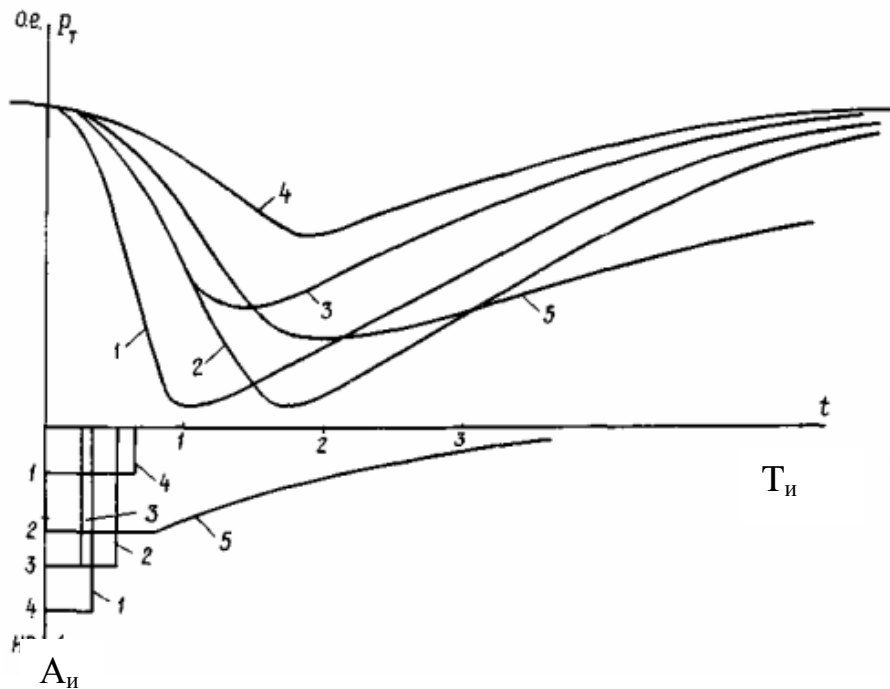


Рисунок 1.2 – Импульсная разгрузка турбины и формируемые управляющие импульсы

Механическое торможение [18]. Улучшение условий динамической устойчивости происходит за счёт введения дополнительного механического тормозящего момента на вал генерирующего агрегата. Установка должна была содержать электромагнит управления, усилительную систему, работающую от сжатого воздуха, и управляемые ею механические тормоза ротора генератора. Из-за трудностей реализации и громоздкости конструкции МТ как устройство, способствующее сохранению динамической устойчивости, распространения так и не получило [19].

Управление торможением предполагалось осуществлять с помощью подачи управляющего сигнала на тормозную систему ротора генератора. Сигнал управления подаётся при резком сбросе мощности или ускорении генераторов [20].

Электрическое торможение [7, 16]. ЭТ обеспечивает гашение избыточной энергии, запасенной роторами генераторов во время КЗ, путем кратковременного

включения активных нагрузочных сопротивлений. Различные способы подключения нагрузочных сопротивлений к ЭЭС представлены на рисунке 1.3.

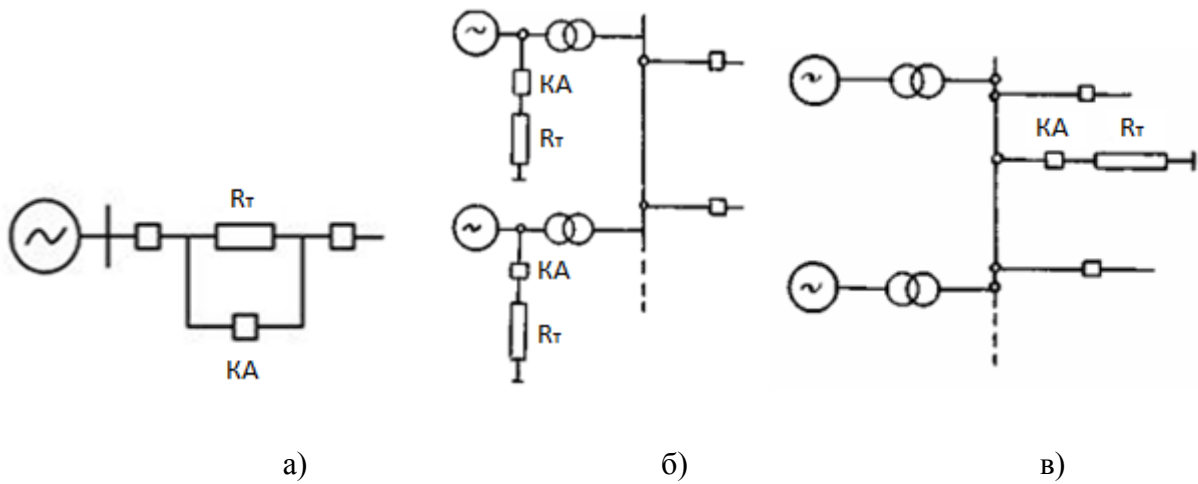


Рисунок 1.3 – Электрическое торможение (а – последовательное подключение; б – параллельное подключение к шинам отдельных генераторов; в – параллельное подключение к шинам электростанции). КА – коммутационный аппарат; R_т – нагрузочное сопротивление.

В работах по исследованию работы ЭТ [21-30] решаются задачи выбора места установки ЭТ, мощности, параметров нагрузочного сопротивления, времени торможения и закона управления. Основным требованием, предъявляемым к ЭТ является быстрдействие коммутационной аппаратуры, как на включение, так и на отключение [16] (0,03-0,05 сек). В качестве таких быстрдействующих выключателей могут применяться элегазовые, тиристорные выключатели. Эффективность ЭТ напрямую зависит от алгоритмов управления. Одной из основных задач является определение момента отключения ЭТ, с одной стороны, чтобы обеспечить максимальный эффект от включения нагрузочных сопротивлений, а с другой стороны, избежать эффекта перерегулирования. Включение ЭТ в работу должно происходить сразу в момент возникновения короткого замыкания [31]. Отключение ЭТ должно происходить после того, как прекращается увеличение угла ротора генератора относительно приёмной системы [32]. Управление ЭТ осуществляется дискретными командами на включение и отключение.

Электромагнитный тормоз. Электромагнитные тормоза нашли широкое применение в промышленности. В грузоподъёмном и лифтовом оборудовании ЭМТ обеспечивают плавный спуск грузов с необходимой скоростью, регулируемый изменением тока возбуждения электромагнитов [33, 34]. При различного рода испытаниях двигателей и других двигательных установок ЭМТ применяются в качестве нагрузки, создавая необходимый регулируемый нагрузочный момент [35, 36]. В автомобилестроении ЭМТ устанавливают на пассажирский и грузовой транспорт, обеспечивая надёжное и экономичное торможение [37-40]. В нефтедобывающей промышленности ЭМТ применяют на современных буровых лебёдках в качестве вспомогательного тормозного оборудования [41-42]. В электроэнергетике ЭМТ до настоящего времени не нашёл своего применения, однако его потенциальные преимущества дают основания для использования его в качестве средства улучшения условий динамической и статической устойчивости ЭЭС.

В соответствии с патентом [3] электромагнитный тормоз механически соединяют с ротором генератора и ротором первичного двигателя посредством муфт. Принцип действия ЭМТ (рисунок 1.4) основан на возникновении вихревых токов в массивном металлическом диске при создании переменного электромагнитного поля в ЭМТ. Электромагнитное поле, пронизывающее диск, создается посредством электромагнитов постоянного тока. При вращении вала генерирующего агрегата в диске ЭМТ наводится переменное электромагнитное поле, которое вызывает вихревые токи в стали диска, направление которых препятствует изменению потока вектора магнитной индукции. Взаимодействие магнитного поля и вихревых токов приводит к возникновению тормозящего момента. При протекании вихревых токов по диску, обладающему конечной величиной сопротивления, возникают потери энергии, которое сопровождается выделением тепла в диске ЭМТ. Таким образом, происходит трансформация кинетической энергии механической работы металлического диска ЭМТ в тепловую энергию.

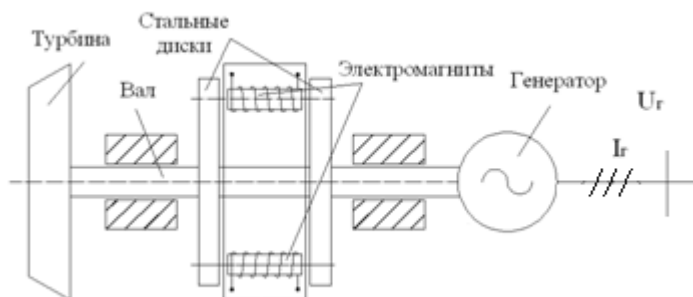


Рисунок 1.4 – Устройство ЭМТ

ЭМТ имеет малую инерционность и воздействует непосредственно на баланс моментов на валу генерирующего агрегата, а также его параметры не зависят от параметров режима и сети ЭЭС. Кроме того, система регулирования ЭМТ может иметь независимый источник питания (аккумуляторная батарея; интегрированный в ЭМТ генератор), что позволяет обеспечить автономное питание системы возбуждения ЭМТ. Такие достоинства ЭМТ как быстродействие, воздействие непосредственно на баланс моментов на валу генерирующего агрегата, независимость работы от параметров внешней электрической сети, дают основания полагать, что ЭМТ можно использовать в качестве средства улучшения условий динамической устойчивости ЭЭС и демпфирования незатухающих и слабозатухающих колебаний переходных процессов по межсистемным связям, вызванных как аварийными событиями (КЗ, отключение нагрузки и т.д.), так и действием систем автоматического регулирования элементов ЭЭС.

Задачей управления электромеханическими процессами является обеспечение статической и динамической устойчивости ЭЭС, а также необходимого качества затухания переходных процессов. Управление в аварийном режиме обеспечиваются в основном устройствами релейной защиты и автоматики. Управление режимом ЭЭС с помощью ЭМТ можно отнести к предотвращению нарушения устойчивости системы.

Одной из основных задач, стоящих на пути использования ЭМТ в ЭЭС, является поиск управления мощностью ЭМТ. Для управления мощностью торможения ЭМТ необходимо управлять током возбуждения ЭМТ. Таким

образом, целью настоящей работы является разработка законов управления электромагнитным тормозом для обеспечения устойчивости ЭЭС при различных возмущениях.

При исследовании и построении необходимого закона управления ЭМТ для обеспечения динамической и статической устойчивости были применены общеизвестные подходы к составлению математического описания ЭЭС, решению систем дифференциальных уравнений с использованием методов численного интегрирования и решению систем линейных уравнений. В то же время, оценка влияния ЭМТ на условия статической устойчивости не может исследоваться при помощи метода «малых отклонений», так как работа ЭМТ характеризуется резкой нелинейностью тормозного момента в окрестности точки допустимого установившегося режима ЭЭС.

Для определения необходимого закона управления, отвечающего требованиям эффективного и экономичного использования возможностей ЭМТ необходимо рассчитать оптимальное управление мощностью ЭМТ. Условия оптимального управления ЭМТ получены с помощью принципа максимума Понтрягина в соответствии с желаемым критерием оптимальности. При использовании принципа максимума Понтрягина определяются траектории переходного процесса и собственно управления в соответствии с выбранным критерием качества. Для решения возникающей при расчёте оптимального управления краевой задачи применён метод стрельбы. Достоинствами метода стрельбы являются универсальность, применимость к решению нелинейных задач, а также возможность применения при численном интегрировании методов высокого порядка точности (например, метод Рунге-Кутты). Полученные траектории являются оптимальными лишь для конкретных начальных условий, которые подлежат определению в процессе решения.

Поведение ЭЭС описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений. Задача синтеза закона управления ЭМТ усложняется ввиду однополярной характеристики момента ЭМТ (развивает только тормозной

момент вне зависимости от направления тока в обмотке возбуждения). Несмотря на то, что в настоящее время существует множество методов синтеза законов управления нелинейных систем, с учётом различных ограничений универсальных методов не существует [43].

Существующие методы синтеза законов управления могут быть разделены на группы.

1. **Группа методов, основанная на линеаризации.** Данная группа методов подразумевает исследование нелинейной системы после преобразования её к линейной. После преобразования поставленные задачи синтеза закона управления решаются стандартными методами теории линейных систем. Таким образом, предполагается некоторая линейность рассматриваемой системы в некоторой рассматриваемой окрестности. К данной группе методов относятся методы точной линеаризации [43,44] и метод линейной интерполяции [45].

Данная группа методов не применима к поставленной задаче синтеза закона управления ЭМТ, так как требуется наличие линейного представления момента ЭМТ в окрестности $(-\varepsilon; +\varepsilon)$ точки линеаризации, что невозможно для ЭМТ.

2. **Группа методов, основанная на принципе динамической компенсации [45,46].** Группа методов основана на выборе эталонного поведения системы или, иначе, эталонной передаточной функции системы, которая обеспечивает заданное качество переходных процессов. Таким образом, задача синтеза сводится к нахождению такой передаточной функции регулятора, которая обеспечивала бы соответствие передаточной функции замкнутой системы эталонной передаточной функции. В таком случае переходный процесс будет определяться заданными показателями качества.

Методы динамической компенсации имеют ряд недостатков: сложность представляемой синтезируемой передаточной функции, так как она должна включать компенсирующую (обратную передаточную функцию объекта) и эталонную (передаточную функцию разомкнутой эталонной системы)

передаточные функции; синтезируемая передаточная функция обычно содержит дифференцирующие звенья, которые физически трудно реализуемы; необходимо выполнение требования устойчивости многочленов, совпадающих в числителе и знаменателе передаточной функции. При использовании методов динамической компенсации теряется свойство резкой нелинейности тормозного момента ЭМТ.

3. Группа частотных методов [47,48]. Частотные методы являются наиболее распространёнными в практике методов для решения задачи синтеза законов управления. Методы построены на анализе частотных характеристик исследуемого объекта. Частотные методы широко развиты для класса задач синтеза законов управления линейных систем, например, критерий Найквиста [49], критерий Михайлова [50]. Для исследований нелинейных систем существует ряд методов (частотный критерий Попова, частотная теорема Якубовича-Калмана, частотный критерий Чо-Нарендры, критерий Гелига [47]), однако данные методы решают только частную задачу Лурье [51].

К особенностям группы методов относится ограниченность применения данных методов – данные методы могут быть использованы только для узкого класса нелинейных систем. При использовании методов динамической компенсации невозможно учесть резкую нелинейность тормозного момента ЭМТ. Таким образом, частотные методы нельзя применять для поставленной задачи синтеза закона управления ЭМТ.

4. Методы, основанные на теории робастности. Основной идеей методов является синтез такого закона управления, который бы обеспечивал устойчивость для множества состояний системы, определяемого свойством неопределённости. Данная группа методов позволяет объединить частотные методы и методы пространства состояний. На основе теории робастности сформулировано множество методов синтеза закона управления, отличающиеся различным подходом и видам неопределённостей, различными свойствами синтезированного закону управления на выходе, а также различными вычислительными особенностями [52, 53].

Целью синтеза робастного закона управления является определение такого закона управления, который бы обеспечивал приемлемое качество управления согласно выбранному заранее критерию во всех рассматриваемых режимах функционирования системы (для различных схемно-режимных ситуаций). Поэтому одним из основных особенностей метода следует отметить отличие переходного процесса, полученного после синтеза, от оптимальных траекторий управления.

5. Методы функций Ляпунова [54]. Данная группа методов основана на втором методе Ляпунова или методе функций Ляпунова [55]. Данный метод подразумевает устойчивость рассматриваемой системы при условии существования положительно определённой функции Ляпунова, обладающей свойством знакоотрицательности её производной. Таким образом, устойчивость рассматриваемой системы доказывается на основании выбранной функции Ляпунова. Одним из основных недостатков данных методов является отсутствие регулярного метода выбора самой функции Ляпунова. Тем не менее, самым главным преимуществом метода функций Ляпунова перед остальными подходами к исследованию нелинейных систем является его универсальность. В настоящее время данный метод является единственным, который может использоваться для исследования устойчивости динамических систем любого нелинейного вида и любой размерности.

Метод функций Ляпунова использован в настоящей работе при доказательстве положительного влияния работы ЭМТ на статическую устойчивость энергосистемы, а также при синтезе законов управления ЭМТ как составная часть итеративных методов синтеза, которые рассмотрены далее.

6. Методы итеративного синтеза. Данная группа методов предполагает использование знакоотрицательности производной функции Ляпунова в качестве критерия в итерационном процессе выбора управления и перехода к «расширенной» системе уравнений от одного уравнения к полной системе

дифференциальных уравнений. Каждая итерация – выбор управления и функции Ляпунова, и переход от подсистем меньшего порядка к большему.

В группу методов входят метод обратного хода (backstepping) [55], метод прямого хода (forwarding) [56] и метод исследования с насыщением (nested saturation design) [57]. К достоинствам методов можно отнести отсутствие необходимости линеаризации и связанных с этим ограничений, увеличенная скорость синтеза систем управления. К недостаткам можно отнести не универсальность метода, необходимость выбора настроечных параметров синтезированного закона управления.

В качестве метода синтеза закона управления ЭМТ, используемого в работе, был выбран метод обратного хода, так как данный метод позволяет решить широкий спектр задач управления нелинейными системами, включая неустойчивые, не требует линеаризации, предназначен для систем в нижне-треугольной форме [43], а также прост для реализации и не требует сложных вычислений.

7. Метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). Данный метод является некоторым упрощением метода обратного хода. Процесс синтеза закона управления методом АКАР сводится к двум этапам: на первом этапе определяется закон управления в аналитическом виде на основе обобщённого функционального уравнения, на втором этапе происходит процесс выбора настроечных параметров синтезируемого закона управления [58]. Синтезируемый на основе метода АКАР закон управления не гарантирует существование функции Ляпунова, однако позволяет обеспечить достижение минимума определяемого методом функционала.

Недостатками метода АКАР является накладываемое требование на отсутствие ограничений синтезируемого закона управления, отсутствие гарантий разрешимости расширенной системы дифференциальных уравнений. Также следует отметить, что синтезируемый закон часто сильно отличается от траектории, построенной на основе критериев оптимальности [59]. Указанные

недостатки не позволяют использовать методы АКАР при решении задачи синтеза закона управления ЭМТ.

Таким образом, для поставленных задач исследования влияния работы ЭМТ на устойчивость системы, а также для решения задач синтеза законов управления с учётом резкой нелинейности характеристики тормозного момента могут быть использованы методы функций Ляпунова и итеративные методы синтеза.

Синтез закона управления может быть выполнен без применения различных теоретических подходов. Анализируя качественно причинно-следственные связи взаимного влияния параметров, протекающих в ЭЭС процессов можно сформулировать принципы управления процессом и выбрать параметры управления для достижения желаемого хода процесса. Этот подход синтеза управления назовём «инженерным». В качестве второго метода синтеза в работе выбран «инженерный» подход, позволяющий получить простые законы управления, из которых необходимо выбрать близкий к оптимальному или «квазиоптимальный» закон управления.

Выводы:

1. В настоящее время существует ряд управляемых средств улучшения условий динамической устойчивости ЭЭС. Каждое характеризуется собственными принципами управления и воздействуют на параметры режима системы, обеспечивая устойчивость системы.
2. Одним из перспективных управляемых средств обеспечения динамической устойчивости может рассматриваться ЭМТ. ЭМТ непосредственно влияет на баланс моментов на валу генерирующего агрегата, практически независимо от электрического режима энергосистемы. Эффективность применения ЭМТ определяется законом его управления.
3. Для исследования влияния работы ЭМТ на устойчивость системы, а также для решения задач синтеза законов управления с учётом резкой нелинейности тормозного момента в работе будут использованы методы функций Ляпунова, итеративные методы синтеза, а также «инженерный» подход.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭМТ НА УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЭС

В общем случае под устойчивостью ЭЭС подразумевается способность электроэнергетической системы восстанавливать допустимое по условиям эксплуатации состояние после возмущения. При анализе устойчивости работы ЭЭС различают статическую и динамическую устойчивость. Условия статической устойчивости характеризуют поведение энергосистемы при малых отклонениях параметров режима, условия динамической устойчивости определяют поведение электрической системы при больших возмущениях, возникающих вследствие отключения генераторов, коротких замыканий. Рассмотрим влияние работы ЭМТ на условия статической и динамической устойчивости ЭЭС.

Исследование проводилось на примере системы: станция – шины бесконечной мощности (рисунок 2.1). На станции установлено 4 турбогенератора мощностью 75 МВт каждый. Мощность 300 МВт передается по двухцепной линии 220 кВ длиной 270 км в систему ($U_c=110$ кВ).

Параметры генераторов указаны в таблице 2.1. Параметры элементов рассматриваемой схемы сети указаны в таблице 2.2.

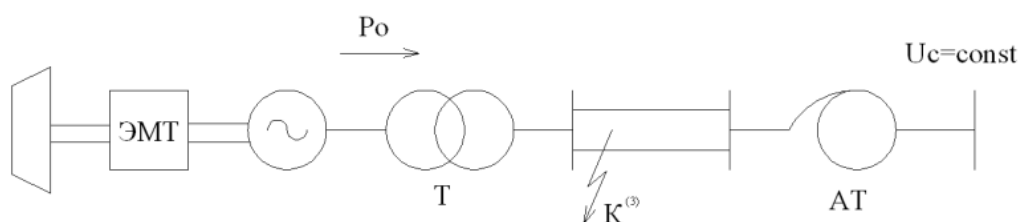


Рисунок 2.1 – Схема рассматриваемой электрической системы

Таблица 2.1. Параметры генераторов

$P_{\text{ГНОМ}}, \text{МВт}$	$\cos\varphi_{\text{НОМ}}$	$U_{\text{ГНОМ}}, \text{кВ}$	$N_{\text{Г}}$	$X_d \text{ о.е.}$	$X'_d \text{ о.е.}$	$T_{d0}, \text{сек}$	$T_J, \text{сек}$
75	0,85	13,8	4	0,91	0,56	6,8	8,1

Таблица 2.2. Параметры элементов рассматриваемой схемы сети

ЛЭП, одна цепь			
Марка провода	Длина, км	$U_{\text{НОМ}}, \text{кВ}$	$X_{\text{уд}}$
АС-400/51	270	220	0,41

Трансформаторы			Автотрансформаторы		
Тип	N_T	$u_k, \%$	Тип	N_{AT}	$u_k, \%$
ТДЦ-125000/220	4	11	АТДЦТН-200000/220/110	2	11

Поведение такой системы описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений [1]:

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{T_J} P_T - \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{T_J} P(E_q, \delta) \\ T_{d0} \frac{dE'_q}{dt} + E_q = E_{qe} \end{cases} \quad (2.1)$$

где δ – угол, характеризующий положение ротора генерирующего агрегата относительно U_c ; ω – скорость вращения ротора; ω_0 – угловая скорость в установившемся режиме; $\omega_{\text{НОМ}}$ – номинальная скорость вращения ротора; T_J – постоянная инерции эквивалентного генератора; T_{d0} – постоянная времени обмотки возбуждения эквивалентного генератора; P_T – мощность турбины, в расчётах $P_T = P_{T0} = \text{const}$; P – электрическая мощность эквивалентного генератора; E'_q – переходная ЭДС, пропорциональная потокосцеплению обмотки возбуждения; E_q – синхронная ЭДС, пропорциональная току возбуждения; E_{qe} – вынужденная ЭДС, пропорциональная напряжению возбуждения.

Первое уравнение системы (2.1) представляет собой взаимосвязь угла ротора эквивалентного генератора с угловой скоростью вращения ротора. Второе – уравнение движения ротора эквивалентного генератора. Третье – уравнение переходного процесса в обмотке возбуждения.

Электрическая мощность P – нелинейная функция, зависящая от синхронной ЭДС E_q и угла ротора δ . Для упрощения расчётов переходные процессы в

обмотке возбуждения генератора (ОВГ) не рассматриваются, тогда $E' = const$ [1] и система (3.1) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{T_J} P_T - \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{T_J} P_m \sin \delta, \end{cases} \quad (2.2)$$

где $P_m = const$, определяющая максимальное значение передаваемой мощности.

2.1. Математическая модель ЭМТ и его системы регулирования

ЭМТ действует на баланс моментов на валу генерирующего агрегата, поэтому тормозящий момент входит непосредственно в уравнение движения ротора генерирующего агрегата:

$$\frac{T_J}{\omega_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{d(\omega - \omega_0)}{dt} = M_T - M_{\text{ЭЛ}} - M_{\text{ЭМТ}}, \quad (2.3)$$

где M_T – крутящий момент первичного двигателя; $M_{\text{ЭЛ}}$ – электромагнитный момент генератора; $M_{\text{ЭМТ}}$ – тормозной момент, создаваемый ЭМТ.

Пользуясь общеизвестным допущением [1], уравнение (2.3) можно записать в виде:

$$\frac{T_J}{\omega_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{d(\omega - \omega_0)}{dt} = P_T - P_{\text{ЭЛ}} - P_{\text{ЭМТ}}, \quad (2.4)$$

где P_T – мощность первичного двигателя; $P_{\text{ЭЛ}}$ – электромагнитная мощность генератора; $P_{\text{ЭМТ}}$ – мощность торможения, создаваемая ЭМТ.

Металлический диск тормоза размещают на валу генерирующего агрегата между первичным двигателем и генератором. Электромагнитное поле во вращающемся диске создаёт обмотка возбуждения, представляющая собой электромагнит постоянного тока с сердечником (рисунок 2.2).

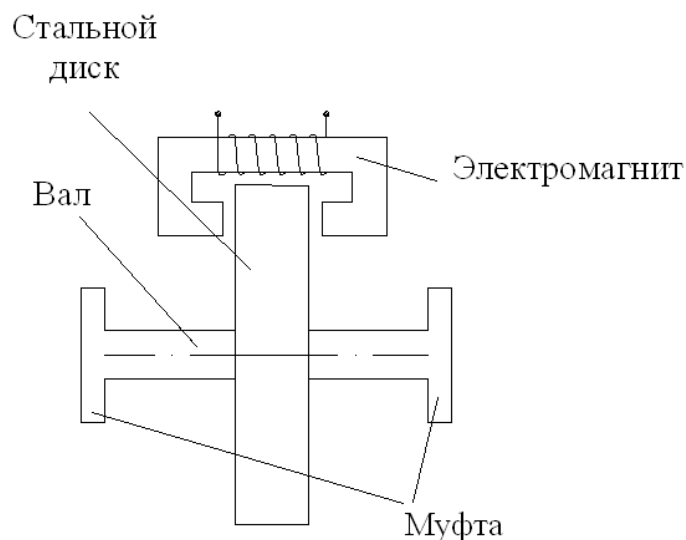


Рисунок 2.2 – Конструкция электромагнитного тормоза.

При подаче тока управления на обмотку возбуждения во вращающемся диске возникает переменное электромагнитное поле и соответственно тормозной момент. Обмотка возбуждения, возбудитель (управляемый источник постоянного напряжения), регулятор возбуждения вместе составляют систему возбуждения ЭМТ (рисунок 2.3). Изменяя ток возбуждения соответственно, можно регулировать величину тормозного момента.

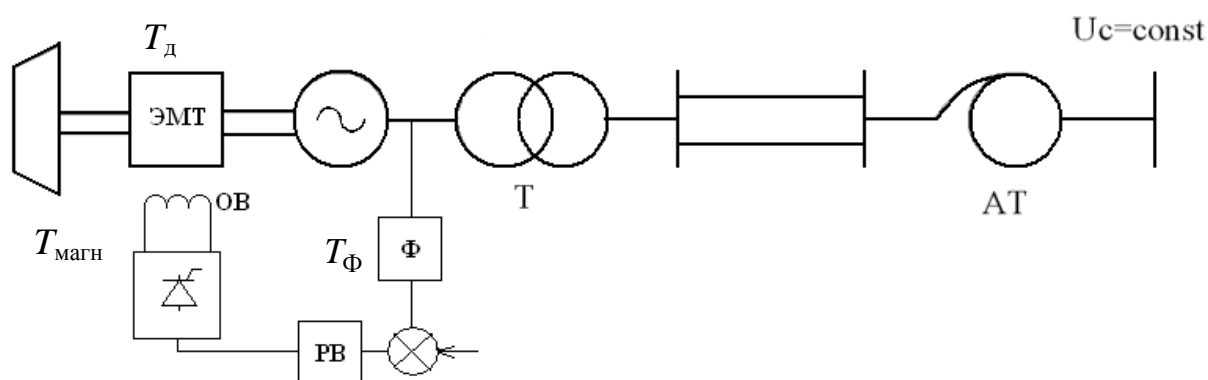


Рисунок 2.3. Структурная схема простейшего регулятора возбуждения ЭМТ. РВ – регулятор возбуждения, ОВ – обмотка возбуждения; Ф – фильтр.

Математическая модель ЭМТ строится в предположении, что конструкция ЭМТ выполнена таким образом, что взаимным влиянием электромагнитных полей генератора и ЭМТ можно пренебречь.

Мощность ЭМТ является зависимой функцией от выбранных параметров регулирования $P_{\text{ЭМТ}} = P_{\text{ЭМТ}}(\delta, P_{\text{ЭЛ}}, t, \dots)$. Регуляторы возбуждения могут быть как с зоной нечувствительности, так и осуществляющие непрерывное регулирование. Каждый элемент системы регулирования обладает собственной инерционностью, так как обмотки электромагнита и возбудителя характеризуются постоянными электромагнитной инерции – ток в этих обмотках меняется по экспоненциальному закону. Следовательно, ток, проходящий через каждый элемент регулятора возбуждения, определяется формулой:

$$i = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{магн}}}} \right) \quad (2.5)$$

Ток возбуждения ЭМТ изменяется в соответствии с выражением:

$$\Delta I_{\text{ЭМТ}} = \frac{\Delta W}{(1 + pT_{\phi})(1 + pT_{\text{магн}})(1 + pT_{\text{д}})}, \quad (2.6)$$

где T_{ϕ} – постоянная времени фильтра, необходимая для подавления высших гармоник после выпрямления сигнала; $T_{\text{магн}}$ – постоянная времени обмотки возбуждения ЭМТ, $T_{\text{д}}$ – постоянная времени электромагнитных процессов в диске ЭМТ, ΔW – закон управления ЭМТ, $\Delta I_{\text{ЭМТ}}$ – отклонение тока возбуждения ЭМТ при заданном законе управления. Величины постоянных времени в (2.6) характеризуются конкретным устройством и зависят от его характеристик. В соответствии с [60-61] для регулятора возбуждения АРВ-М постоянная времени T_{ϕ} принимается равной 0,02 с для системы регулирования с использованием тиристорных преобразователей. Следует отметить, что современные цифровые регуляторы возбуждения позволяют гибко изменять не только коэффициенты усиления каналов регулирования, но и варьировать постоянные времени динамических звеньев [60]. $T_{\text{магн}}$ зависит непосредственно от выбранных конструктивных параметров электромагнита. Постоянная времени $T_{\text{д}}$ по

сравнению с остальными постоянными имеет малую величину и ею можно пренебречь [62].

Как показано в [62], зависимость мощности ЭМТ от тока возбуждения носит линейный характер ввиду быстрого насыщения металла. Тогда мощность ЭМТ может быть определена как:

$$\Delta P_{\text{ЭМТ}} = \frac{\Delta W_1(p)}{(1 + pT_{\phi})(1 + pT_{\text{магн}})}, \quad (2.7)$$

где $\Delta W_1(p)$ – передаточная функция системы управления ЭМТ, $\Delta P_{\text{ЭМТ}}$ – отклонение мощности ЭМТ при заданном законе управления.

$T_{\text{магн}}$ определяется как:

$$T_{\text{магн}} = \frac{L_{\text{магн}}}{R_{\text{магн}}}, \quad (2.8)$$

где $L_{\text{магн}}$ – индуктивность электромагнита, $R_{\text{магн}}$ – суммарное сопротивление токоограничивающего сопротивления и омического сопротивления электромагнита.

В [62] рассчитаны параметры конструкции ЭМТ различной номинальной мощности. При этом величина магнитной индукции не превышала 1,5 Тл при величине воздушного зазора $\delta = 1$ мм. В [63] были определены необходимые технические характеристики для сохранения динамической устойчивости в крупной энергосистеме. В том числе варьировались значения постоянной времени электромагнита ЭМТ (0,1 – 0,2 сек). Было показано, что при величине постоянной времени 0,1 сек для сохранения динамической устойчивости требуется меньшее значение номинальной мощности ЭМТ.

Для дальнейших исследований выбирается конструкция ЭМТ, параметры которой были рассчитаны в [64]. Номинальная мощность ЭМТ составляет 50 МВт. Кроме того, выбранной мощности достаточно для сохранения динамической устойчивости при дальнейших расчётах. Предлагаемая конструкция ЭМТ

включает в себя два металлических диска, между которыми закрепляются электромагниты постоянного тока (рисунок 2.4).

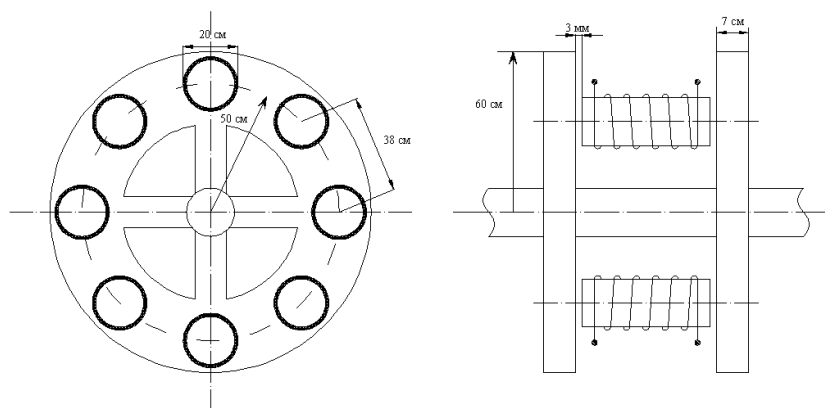


Рисунок 2.4 – Конструкция электромагнитного тормоза мощностью 50 МВт

В работе принимается, что обмотка возбуждения представляет собой простую однослойную катушку индуктивности. Для расчёта постоянной времени электромагнита необходимо определить его $L_{\text{магн}}$ и $R_{\text{магн}}$, которые зависят от конкретных параметров обмотки возбуждения:

$$L_{\text{магн}} = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot S_{\text{серд}} \cdot N^2}{l_{\text{серд}}} = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{серд}}}{2}\right)^2 \cdot N^2}{l_{\text{серд}}}, \quad (2.9)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, μ – относительная магнитная проницаемость материала сердечника, $S_{\text{серд}}$ – площадь сердечника электромагнита, N – число витков, $l_{\text{серд}}$ – длина средней линии сердечника, $d_{\text{серд}}$ – диаметр сердечника.

$$R_{\text{магн}} = \rho_0 \cdot \frac{l_{\text{пр}}}{S_{\text{пр}}} = \rho_0 \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{серд}} \cdot N}{S_{\text{пр}}}, \quad (2.10)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление материала обмотки электромагнита, $l_{\text{пр}}$ – длина провода, $S_{\text{пр}}$ – сечение провода.

Подставляя (2.9) и (2.10) в (2.8) получим:

$$T_{\text{магн}} = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot d_{\text{серд}} \cdot N \cdot s_{\text{пр}}}{4 \cdot l_{\text{серд}} \cdot \rho_0}, \quad (2.11)$$

МДС обмотки возбуждения составляет $F_{OB}=4000 \text{ А}\cdot\text{в}$ [64].

Пусть ток, протекающий по обмотке электромагнита $I=20 \text{ А}$. Так как $F = N \cdot I$, число витков $N = \frac{4000}{20} \approx 200$.

Тогда величина постоянной времени электромагнита, исходя из того, что $l_{\text{серд}} = 1 \text{ м.}$, $d_{\text{серд}}=0,2 \text{ м.}$, $s_{\text{пр}}=2,5 \text{ мм}^2$:

$$T_{\text{магн}} = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot d_{\text{серд}} \cdot N \cdot s_{\text{пр}}}{4 \cdot l_{\text{серд}} \cdot \rho_0} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 500 \cdot 0,2 \cdot 200 \cdot 2,5}{4 \cdot 1 \cdot 0,0175} = 0,9 \text{ с}$$

$$R_{\text{магн}} = \rho_0 \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{серд}} \cdot N}{s_{\text{пр}}} = 0,0175 \cdot \frac{\pi \cdot 0,2 \cdot 200}{2,5} = 0,88 \text{ Ом}$$

Для такой системы требуется источник напряжения величиной 17,6 В. Для того, чтобы уменьшить постоянную времени электромагнита до 0,1 с, необходимо увеличить величину напряжения, подводимого к обмотке возбуждения. Изменение тока возбуждения определяется выражением:

$$i = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{магн}}}} \right)$$

Тогда значение возрастания тока возбуждения определяется его производной:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U}{R \cdot T_{\text{магн}}} e^{-\frac{t}{T_{\text{магн}}}}$$

Постоянные времени системы регулирования определяют быстродействие ЭМТ. Скорость возрастания тока в обмотке возбуждения ЭМТ можно увеличить, увеличивая напряжение возбуждения, аналогично форсировке возбуждения синхронных генераторов. Таким образом, даже при больших значениях

собственной постоянной времени обмотки возбуждения тормоза, обуславливающей низкое быстродействие, скорость нарастания тока возбуждения можно увеличить до требуемых значений (рисунок 2.4) с учётом технических ограничений. Однако это в свою очередь приводит к увеличению мощности возбудителя и соответственно его удорожанию.

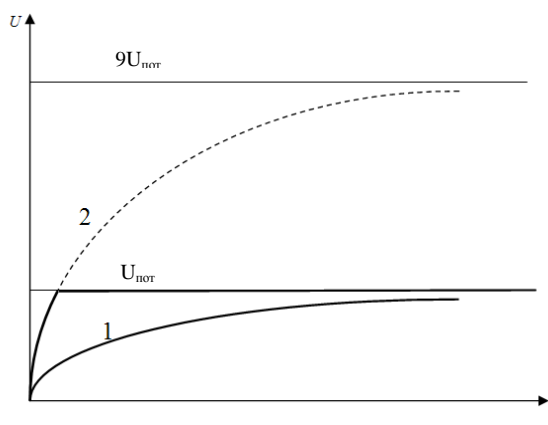


Рисунок 2.4 – Подъем напряжения возбудителя. 1 – без форсировки возбуждения. 2 – с форсировкой возбуждения.

Для того, чтобы в начальный момент времени ($t=0$) возрастание тока возбуждения соответствовало постоянной времени $T = 0,1 \text{ с}$, необходимо увеличить напряжение в 9 раз. Таким образом, требуется источник напряжения величиной 158,4 В. Мощность такого источника питания ОБ ЭМТ составляет 3,168 кВт. Полная мощность источника будет увеличиваться пропорционально количеству электромагнитов. Для ЭМТ мощностью 50 МВт в [64] число магнитов постоянного тока равно 8. Таким образом, мощность источника напряжения равен 25,3 кВт, что составляет 0,05 % от мощности ЭМТ.

Таким образом, в работе принимается значение постоянной времени электромагнита $T_{\text{магн}} = 0,1 \text{ сек}$.

Стоит отметить, что задача разработки конструкции и расчёта параметров электромагнита в работе не ставится. Это отдельный класс задач, включающий в себя оценку влияния параметров электромагнита на работу ЭМТ, выбор количества электромагнитов в зависимости от мощности ЭМТ, построение

опытных характеристик электромагнита, минимизация конструкции и разработка конструктивных методов изменения постоянной времени для достижения необходимых параметров быстродействия.

2.2. Исследование статической устойчивости на примере простейшей энергосистемы.

Одной из отличительных особенностей применения ЭМТ является его однополярное действие – устройство создаёт только нагрузочный момент при том, что в исходном состоянии развиваемый им момент равен нулю. Это в свою очередь означает резко нелинейную зависимость мощности ЭМТ от времени $P_{ЭМТ}(t)$. Исследование статической устойчивости системы обычно проводят с использованием метода «малых отклонений», который подразумевает линеаризацию исходной системы нелинейных дифференциальных уравнений в окрестности точки равновесия. Линеаризация описывает свойства системы в некоторой окрестности относительно установившегося значения параметров. Однако, рассматривая ЭМТ в составе энергосистемы, линеаризация системы уравнений в свою очередь будет означать неучёт однонаправленности действия ЭМТ. Таким образом, использование стандартных методов исследования статической устойчивости ЭЭС с учётом работы ЭМТ невозможно. Поэтому необходимо использовать анализ нелинейных систем дифференциальных уравнений, решение которых может быть получено только численными путями. Для доказательства предположения, что ЭМТ с выбранным каналом управления улучшает условия статической устойчивости простейшей энергосистемы, рассмотрено свободное движение энергосистемы без управления.

2.2.1. Исследование свободного движения системы.

Для упрощения расчётов вводятся новые переменные:

$\delta = x; \Delta\omega = y; \frac{\omega_{НОМ}}{T_J} P_T = c; \frac{\omega_{НОМ}}{T_J} P_m = a$. Тогда систему (2.2) можно записать в виде

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y \\ \frac{dy}{dt} = c - a \sin x \end{cases} \quad (2.12)$$

Уравнениям типа (2.12) посвящено множество работ, начиная с исследований Трикоми Ф., Андронова А.А., Бакаева Ю.Н., Белюстиной Л.Н. и других [65–68]. Такие уравнения возникают при исследовании устойчивости синхронных электрических машин и в системах фазовой автоматической подстройки частоты.

Установившийся режим (или точки равновесия) определяется уравнением $\sin x = c/a$ (поскольку ЭЭС обладает апериодической статической устойчивостью, то $c/a < 1$). Ближайшую к 0 точку равновесия обозначим z :

$$\sin z = c/a, \quad 0 \leq z \leq \pi/2 \quad (2.13)$$

В соответствии с рекомендациями [69] выбирается функция Ляпунова [70–73], играющую роль полной энергии системы, в виде

$$V(x, y) = (1/2)y^2 + s(x),$$

где функция $s(x)$ выбирается из условия $s'(x) = -(c - a \sin x)$. Подобрав нужным образом константу интегрирования, выбирается $s(x) = a(\cos z - \cos x) + c(z - x)$.

Тогда функция Ляпунова примет вид:

$$V(x, y) = (1/2)y^2 + a(\cos z - \cos x) + c(z - x) \quad (2.14)$$

Пусть начальные условия малы, то есть:

$$V(x(0), y(0)) < h = 2a \cos z + c(2z - \pi), \quad -\pi - z \leq x(0) \leq \pi - z, \quad (2.15)$$

Тогда $s(z) = 0, s'(z) = 0, s''(z) = a \cos z > 0$, т.е. $V(x, y) \geq 0$ и z – точка локального минимума $s(x)$. Тем самым $(z, 0)$ – точка локального минимума $V(x, y)$. Ближайшими к z локальными максимумами $s(x)$ являются точки $z_{-1} = -\pi - z, z_1 = \pi - z$. При этом $s(z_{-1}) > s(z_1) = h$. Таким образом условие (2.15)

определяет область локального минимума. С другой стороны для $V(t) = V(x(t), y(t))$ получаем:

$$\dot{V} = \frac{\partial V(x(t), y(t))}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial V(x(t), y(t))}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} = (a \cdot \sin x - c)y + y(c - a \cdot \sin x) = 0,$$

т.е. функция $V(t)$ остается постоянной на решениях системы (2.12), и можно воспользоваться общей теоремой Лагранжа-Дирихле [66] для консервативных систем, которая определяет, что для системы (2.2) справедливо утверждение:

- Система консервативна, т.е. $V = const$ на траектории.
- Траектории системы периодичны, на фазовой плоскости они замкнуты и ограничены и содержат внутри точку $(z, 0)$, они симметричны относительно прямой $y = 0$.

Фазовые портреты движения в такой системе в плоскости параметров x и y приведены на рисунке 2.5 для нескольких начальных условий в окрестности (2.14) точки равновесия $(z, 0)$. Параметры системы взяты в соответствии с описанным примером, $a = 35,82; c = 26,32; z = 0,8253$.

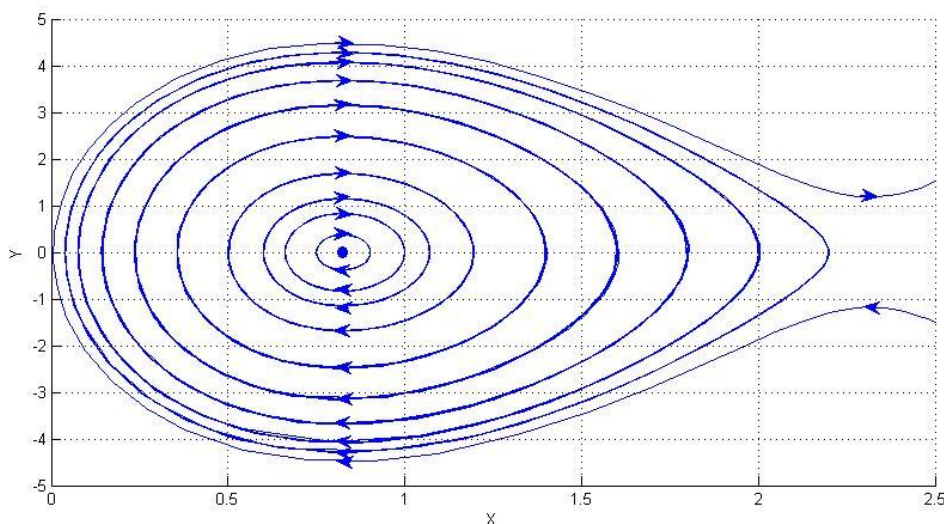


Рисунок 2.5 – Локальное поведение траекторий

В соответствии с доказанным утверждением орбиты замкнуты и ограничены, они пересекают ось абсцисс в двух точках – $x_1 < z$ и $x_2 > z$. При этом $y(t) -$

периодическая функция, которая меняет свой знак на противоположный в точках x_1 и x_2 . Таким образом, переходный процесс представляет собой незатухающие колебания около точки равновесия $(z,0)$. При малых $V(0)$ траектории близки к эллипсу с центром в $(z,0)$, при приближении $V(0)$ к h симметрия орбит относительно вертикальной оси теряется.

2.2.2. Исследование движения системы с ЭМТ.

В качестве сигнала управления выбирается отклонение скорости вращения ротора $\Delta\omega$. При этом необходимо учитывать, что при $\Delta\omega < 0$ ЭМТ отключен. Величина тормозного момента прямо пропорциональна току возбуждения [62], поэтому система (2.2) может быть записана в виде:

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{T_J} P_T - \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{T_J} P_m \sin \delta - \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{T_J} P_{\text{ЭМТ}}, \\ P_{\text{ЭМТ}} = b(\Delta\omega)_+ \end{cases}$$

где $P_{\text{ЭМТ}}$ – мощность электромагнитного тормоза, $b > 0$ – коэффициент усиления, используется обозначение функции $b(\Delta\omega)_+ = \max\{b(\Delta\omega), 0\}$.

С учетом замены переменных система может быть записана в виде:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y \\ \frac{dy}{dt} = c - a \sin x - by_+ \end{cases} \quad (2.16)$$

y_+ означает положительную часть y : $y_+ = \max\{y, 0\}$.

Необходимо доказать, что при условиях, описанных выше система (2.16) локально асимптотически устойчива, т.е. $x(t) \rightarrow z$, $y(t) \rightarrow 0$ для $t \rightarrow \infty$, если начальные условия удовлетворяют (2.15).

Для доказательства вводится такая же функция Ляпунова $V(x, y)$, что и выше:

$$V(x, y) = (1/2)y^2 + a(\cos z - \cos x) + c(z - x)$$

Вычисляя \dot{V} , получим:

$$\dot{V} = (a \cdot \sin x - c)y + y(c - a \cdot \sin x - by_+) = -by_+$$

Таким образом, $\dot{V} = -by_+ \leq 0$ и функция $V(x, y)$ является локальной функцией Ляпунова для системы (2.16). С другой стороны, для этой системы выполняются условия теоремы Барбашина-Красовского [71]. Действительно, $\dot{V} = 0$ только при $y \leq 0$, однако эта полуплоскость не содержит полных траекторий (всякая траектория в этой области описывается уравнением (2.12) и в соответствии с доказанным утверждением покидает полуплоскость). Все условия теоремы Барбашина-Красовского выполнены, и из нее следует локальная асимптотическая устойчивость системы.

Поведение системы для того же примера с управлением и без управления показано на рисунке 2.6 (покоординатно) и на рисунке 2.7 (на фазовой плоскости).

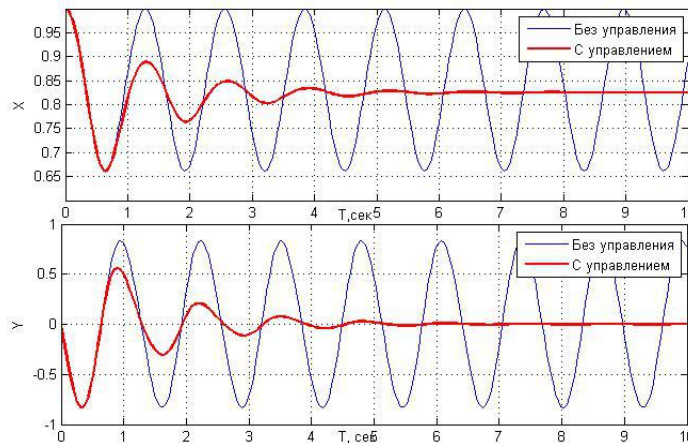


Рисунок 2.6 – Движение системы с управлением и без управления

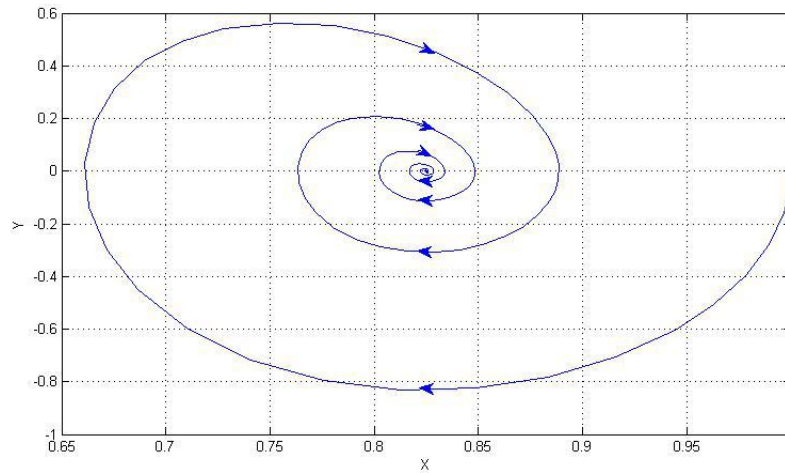


Рисунок 2.7 – Фазовый портрет системы с управлением

В соответствии с доказанными выше результатами переходный процесс разбивается на этапы: при $y < 0$ – процесс аналогичен переходному процессу без работы ЭМТ и представляет собой незатухающий процесс; при $y > 0$ – затухающий процесс. Это иллюстрирует рисунок 2.8, показывающий вид функции $V(t)$ – чередуются полупериоды, на которых она постоянна или убывает.

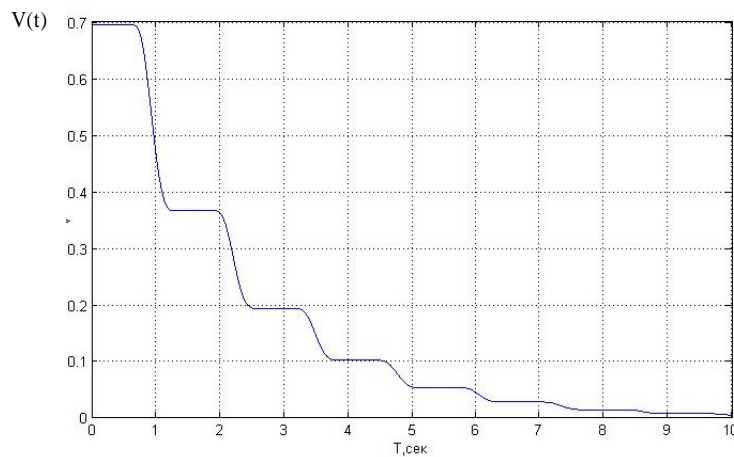


Рисунок 2.8 – Изменение функции Ляпунова во времени

Наглядно процесс включения и отключения ЭМТ при выбранном канале регулирования можно продемонстрировать при помощи метода площадей (рисунок 2.9).

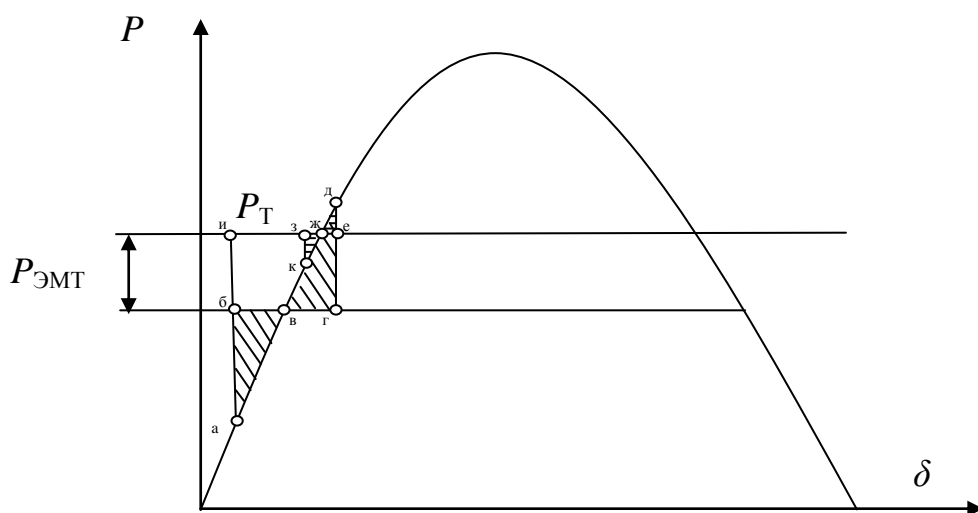


Рисунок 2.9 – Процесс управления включением ЭМТ.

При некотором отклонении от положения равновесия (точка «а») возникает избыточный момент на валу ($P_T > P$) и вал генерирующего агрегата начинает ускоряться ($\Delta\omega > 0$). В этот момент включается ЭМТ, тем самым уменьшая площадку ускорения с $A_{а-и-ж}$ до $A_{а-б-в}$. После перехода через точку равновесия «в» угловая скорость начнёт уменьшаться до точки «д» ($A_{а-б-в} = A_{в-г-д}$). В точке «д» отклонение угловой скорости $\Delta\omega = 0$ и ЭМТ отключается. Пока $\Delta\omega < 0$ ЭМТ отключен и $A_{д-е-ж} = A_{ж-з-к}$. Далее процесс повторяется. Как видно, при включении ЭМТ размах колебаний резко уменьшается.

Следует отметить, что вывод о положительном влиянии ЭМТ на статическую устойчивость системы был доказан для конкретного управляющего сигнала – угловой скорости вращения ротора генерирующего агрегата. Возможным сигналом управления в соответствии с [3,64,74] может стать отклонение электрической мощности. Поведение системы в этом случае описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_{НОМ}}{T_J} P_T - \frac{\omega_{НОМ}}{T_J} P_m \sin\delta - \frac{\omega_{НОМ}}{T_J} P_{ЭМТ}, \\ P_{ЭМТ} = b(P_T - P_m \sin\delta)_+ \end{cases} \quad (2.17)$$

Система уравнений (3.8) с учётом замен переменных запишется в виде:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y \\ \frac{dy}{dt} = c - a \sin x - b(c - a \sin x)_+ \end{cases} \quad (2.18)$$

Рассматривая функцию Ляпунова, видно, что $\dot{V} = 0$ для любых начальных условий, поэтому всегда выполняется условие $V = const$ на любой траектории. Таким образом, траектории будут обладать теми же свойствами, что и система без ЭМТ, то есть ЭМТ с управлением по отклонению электрической мощности не влияет на статическую устойчивость. Это связано прежде всего с моментами включения и выключения ЭМТ при рассматриваемом законе управления (рисунок 2.10).

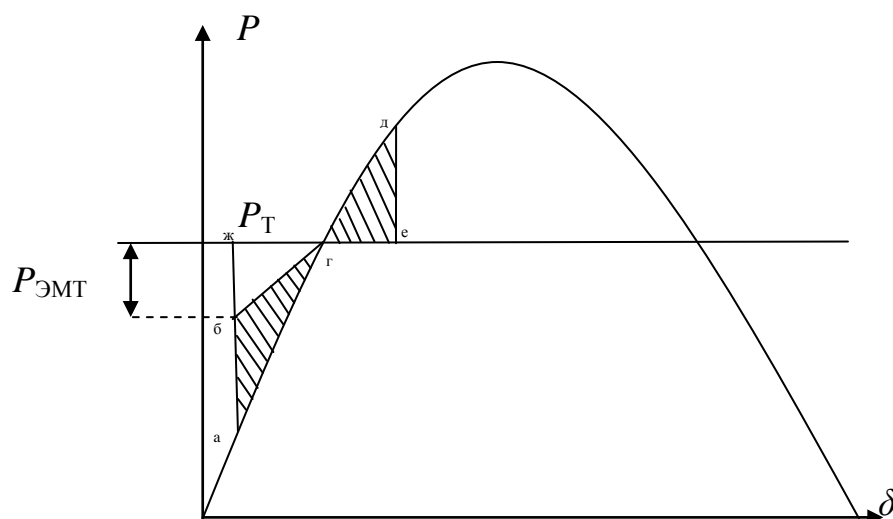


Рисунок 2.10 – Процесс управления включением ЭМТ при втором законе регулирования.

При выбранном управлении процесс включения и отключения ЭМТ происходит в точке «г», тем самым не изменяя первоначальные площадки ускорения и торможения в течение переходного процесса ($A_{а-б-г} = A_{г-д-е}$), что означает незатухающие колебания ротора генератора в переходном процессе. Отличие от работы ЭЭС без ЭМТ состоит в том, что работа ЭМТ уменьшает первоначальную площадку ускорения $A_{а-ж-г}$ на величину площадки торможения ЭМТ ($A_{б-ж-г}$) пропорционально величине небаланса мощности на валу

генерирующего агрегата. Таким образом, работа ЭМТ уменьшает величину максимального вылета угла выбега генератора. При этом величина минимального угла выбега остаётся прежним. Чтобы устранить этот недостаток, необходимо вводить коррекцию по моменту включения ЭМТ.

Был рассмотрен частный и наиболее простой случай математического описания поведения энергосистемы – генерирующие агрегаты без учёта электромеханических переходных процессов в обмотке возбуждения ($E'_q = const$). Однако точно такое же доказательство можно распространить и на энергосистемы с учётом переходных процессов в обмотке возбуждения, в том числе с регулированием возбуждения. Основным требованием к введённой функции Ляпунова является монотонность нелинейной функции на рассматриваемом участке вблизи точки равновесия. Пусть $g(x)$ – монотонная функция на рассматриваемом участке. Система дифференциальных уравнений в общем виде с учетом управления записывается как:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y \\ \frac{dy}{dt} = g(x) - by_+ \end{cases} \quad (2.19)$$

и функция $V(x, y)$ строится по тем же правилам, что и выше.

Другое возможное обобщение относится к возможности применения ЭМТ в сложных энергосистемах. ЭМТ в данном случае будет способствовать сохранению устойчивости ЭЭС, на котором это устройство установлено.

2.3. Исследование динамической устойчивости на примере простейшей энергосистемы.

Для оценки влияния устройства ЭМТ на условия динамической устойчивости было рассмотрено в качестве возмущения проходящее трёхфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ. Время существования короткого замыкания равно 0,2 сек. Анализ переходных процессов показывает, что динамическая устойчивость

ЭЭС без ЭМТ нарушается. При работе ЭМТ динамическая устойчивость ЭЭС сохраняется и обеспечивается затухание переходного процесса. Короткое замыкание приводит к ускорению ротора генерирующего агрегата. В качестве возмущения, вызывающего отрицательный небаланс и соответственно торможение ротора генерирующего агрегата сразу после приложения возмущения, было выбрано отключение одного из четырёх генераторов в представленной схеме. Результаты расчётов переходных процессов представлены на рисунках 2.11-2.12. Как видно, ЭМТ не работает в момент возникновения возмущения, включение происходит только при ускорении ротора генератора. Анализ результатов расчёта показывает, что включение ЭМТ в работу позволяет улучшить условия протекания переходного процесса в энергосистеме при данном возмущении. Работа ЭМТ по принципу действия аналогична работе регулятора скорости генерирующего агрегата. Отличие состоит в том, что регулятор скорости действует как на торможение, так и на ускорение, то есть обладает биполярным действием. Однополярное действие ЭМТ снижает эффективность влияния на переходные процессы при возмущениях, ЭМТ может создавать только тормозной момент.

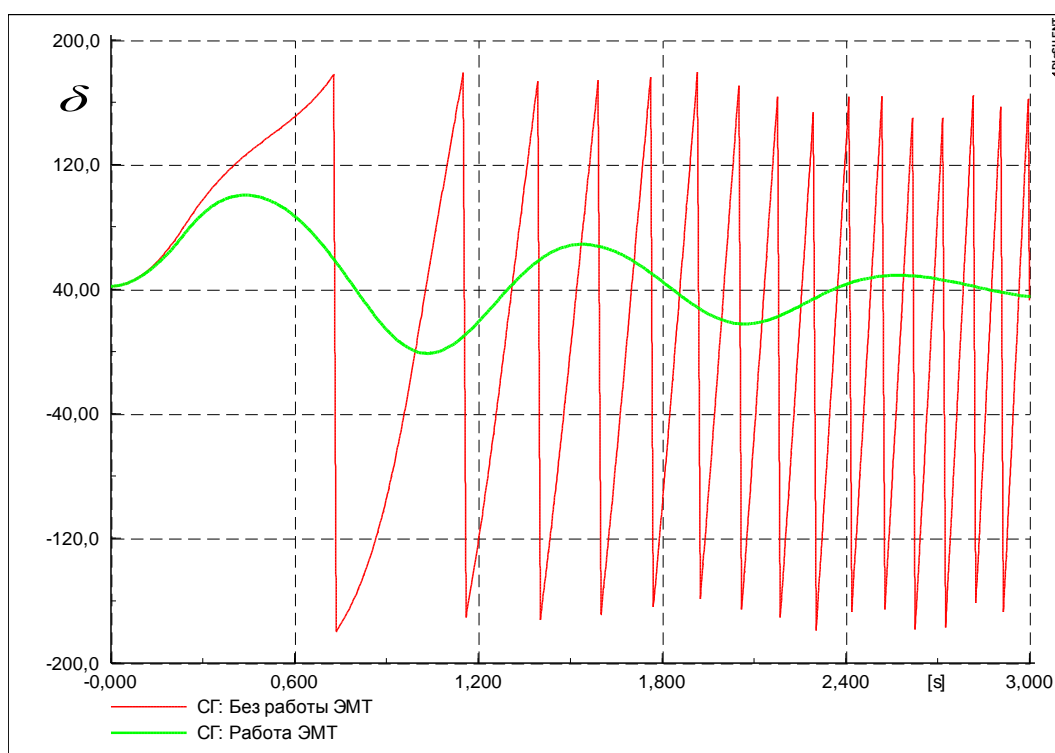


Рисунок 2.11 – Исследование динамической устойчивости ЭЭС. Трёхфазное короткое замыкание. Угол ротора генерирующего агрегата.

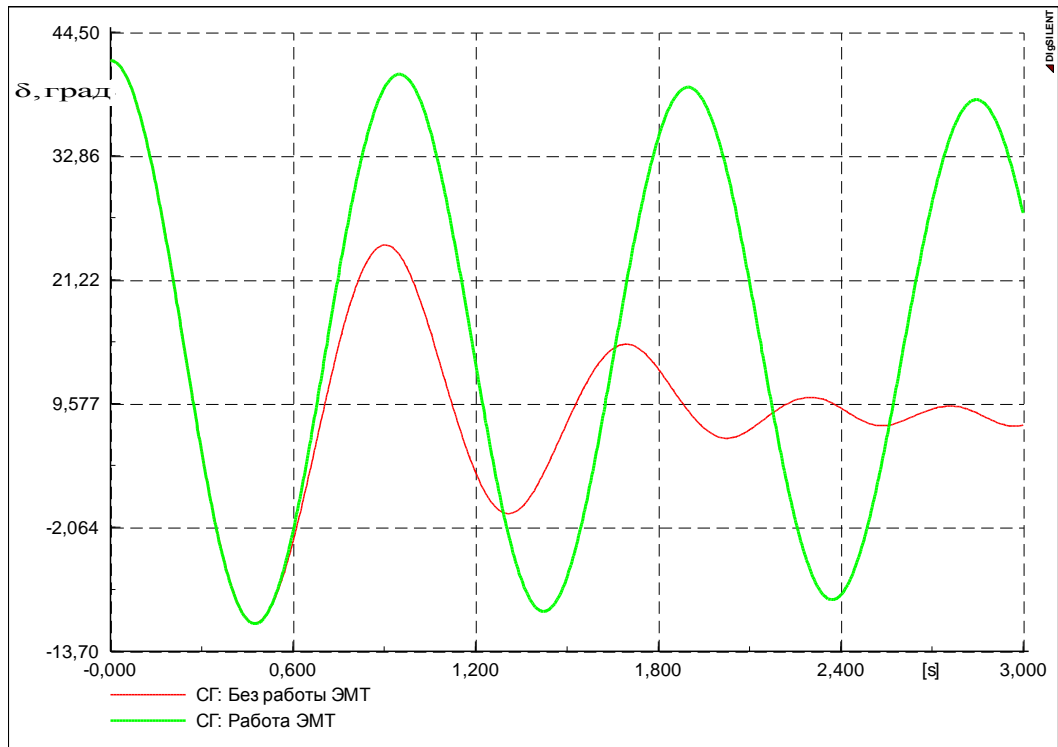


Рисунок 2.12 – Исследование динамической устойчивости ЭЭС. Отключение генератора. Угол ротора генерирующего агрегата.

Выводы:

1. Исследование статической устойчивости энергосистемы с учётом однополярного действия ЭМТ при помощи стандартных методов с применением линеаризации системы уравнений невозможно. Необходимо использовать общие методы, например с применением функций Ляпунова.

2. Работа ЭМТ с каналом управления по отклонению угловой скорости вращения улучшает условия статической устойчивости простейшей энергосистемы.

3. Влияние ЭМТ на статическую устойчивость ЭЭС зависит от выбора канала управления. В частности, при канале управления по отклонению электромагнитной мощности, влияние на статическую устойчивость ЭЭС отсутствует.

4. Работа ЭМТ позволяет улучшить условия динамической устойчивости ЭЭС – включение ЭМТ позволило сохранить устойчивость ЭЭС при возникновении больших возмущений с возникновением как отрицательного, так и положительного небаланса на валу генерирующего агрегата.

3. СИНТЕЗ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ ЭМТ

Задача синтеза законов управления является одной из основных в теории автоматического управления. Под синтезом понимается процесс получения закона управления, в результате которого определяется структура и параметры САУ из условия удовлетворения целому комплексу технических требований: обеспечение устойчивости (стабилизация) и качества переходных процессов, повышение точности управления в установившихся режимах и др.[47]

3.1. Оптимальное управление мощностью ЭМТ для обеспечения устойчивости ЭЭС

При разработке закона управления возникает задача нахождения так называемого эталонного управления тем или иным процессом. Оптимальность может относиться к различным свойствам процесса, в зависимости от поставленной задачи (например, достижение цели процесса за кратчайшее время, минимизация затрачиваемой энергии). Для формализации исследований необходимо определить критерий эффективности управления и выбрать метод расчёта управляющих воздействий, доставляющих экстремальное значение этому критерию [75]. В качестве критерия оптимальности выступает $J \rightarrow \min$, где J – интегральный показатель, который может включать отклонения параметров режима и сигналов управления от заданных установившихся значений. Такими критериями могут быть, например:

- длительность протекания переходного процесса

$$J = \int_0^T dt = T \rightarrow \min , \quad (3.1)$$

- отклонение угла поворота ротора от установившегося значения

$$J = \int_0^T (\Delta\delta)^2 dt \rightarrow \min , \quad (3.2)$$

- отклонение угла и скольжения ротора

$$J = \int_0^T \left((\Delta\delta)^2 + ks^2 \right) dt \rightarrow \min, \quad (3.3)$$

Наиболее удобным и распространённым средством описания динамических систем являются дифференциальные уравнения. Для обеспечения выполнения выбранного критерия оптимальности ведётся поиск управления. Хорошие результаты для нелинейных систем даёт применение принципа максимума Понтрягина, однако решение в большинстве задач определяется численно.

3.1.1. Общие сведения о принципе максимума Понтрягина.

Задача оптимального управления формулируется следующим образом: дана динамическая система, поведение которой можно описать обыкновенными дифференциальными уравнениями:

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \quad (3.4)$$

где $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$ – вектор переменных состояния, причём $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$; $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_m)^T$ – вектор управлений, $0 \leq m \leq n$;

Пусть требуется найти такое управление, которое соответствует минимуму функционала:

$$J = \int_0^T F(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) dt, \quad (3.5)$$

где $F(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \geq 0$.

Тогда в соответствии с принципом максимума Понтрягина [75-77] для оптимальности управления необходимо существование вектор-функции $p(t)$, такой что:

- $x(t)$ и $p(t)$ были решениями системы уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{dH}{d\mathbf{p}}, \dot{\mathbf{p}} = -\frac{dH}{d\mathbf{x}}, \quad (3.6)$$

где функция H – функция Гамильтона, определяется как:

$$H = H(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{p}(t), t) = \left(\mathbf{p}(t), \dot{\mathbf{x}}(t) \right) - F(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t), \quad (3.7)$$

где $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_n)^T$ – некоторый вектор сопряжённых переменных.

б) функция H имела максимум по \mathbf{u} .

Задача нахождения оптимального управления $u(t)$ сводится к решению системы дифференциальных уравнений при условии, что для переменных \mathbf{x} заданы начальные и конечные условия, а для сопряжённых \mathbf{p} – конечные: $\mathbf{p}(T) = 0$.

3.1.2. Применение принципа максимума Понтрягина для простейшей ЭЭС.

Рассматривается схема ЭЭС «станция-шины бесконечной мощности», состоящая из синхронного генератора, шин бесконечной мощности, трансформатора, двухцепной линии электропередачи, ЭМТ, установленного на вал генерирующего агрегата (рисунок 3.1).

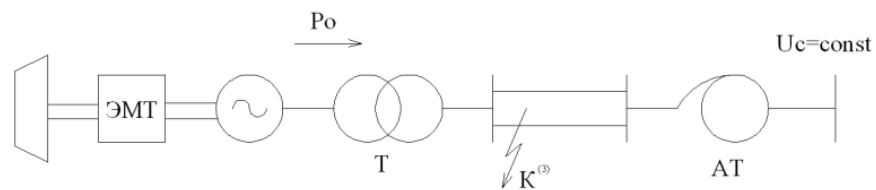


Рисунок 3.1 – Схема простейшей ЭЭС с установкой ЭМТ

Система дифференциальных уравнений в нормальной форме запишется:

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = s \\ \frac{ds}{dt} = \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{T_J} P_T - \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{T_J} P_m \sin \delta - \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{T_J} P_{\text{ЭМТ}} \end{cases} \quad (3.8)$$

В качестве упрощения рассматривается оптимальное управление с момента отключения КЗ. В таком случае будет учитываться запаздывание в системе регулирования, а также нет необходимости составлять дополнительную систему уравнений до отключения КЗ. Кроме того, принимается, что мощность турбины постоянна. Таким образом, задача сведётся к решению одной системы уравнений (3.8). Таким образом $t_{\text{откл}}=t_0=0$ и $\delta(0) = \delta_0, s(0)=s_0$.

Пусть: $x_1 = \delta; x_2 = s; u = \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{T_J} P_{\text{ЭМТ}}; a = \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{T_J} P_m, b = \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{T_J} P_T$, тогда:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = b - a \cdot \sin(x_1) - u \end{cases}, \quad (3.9)$$

где $x_1(0)=x_{10}; x_2(0)=x_{20}; u(0)=u_0$; Кроме того, необходимо ввести ограничения на управление мощностью ЭМТ, учитывая обстоятельство однополярного действия устройства: $0 \leq u \leq u_{\text{max}}$.

В качестве критерия оптимальности выбирается минимум отклонения угла ротора, угловой скорости и управляющего воздействия:

$$J = \int_0^T \left[(x_1 - x_{1F})^2 + k(x_2 - x_{2F})^2 + k_u(u - u_F)^2 \right] dt = \min ,$$

где переменные с индексом F отвечают послеаварийному установившемуся режиму. Тогда для определения условий оптимальности управления составляется функция Гамильтона:

$$H = (\mathbf{p}, \dot{\mathbf{x}}) - F = (\mathbf{p}, \mathbf{f}) - F, \quad (3.10)$$

$$\text{где } \mathbf{p} = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix}; \mathbf{f} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ b - a \cdot \sin(x_1) - u \end{pmatrix};$$

$$F = (x_1 - x_{1F})^2 + k(x_2 - x_{2F})^2 + k_u(u - u_F)^2. \quad (3.11)$$

Тогда согласно принципу максимума Понтрягина условия оптимальности сводятся к

$$\mathbf{x} = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{p}} = f, \text{ т.е. } \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = b - a \cdot \sin(x_1) - u \end{cases}$$

$$\mathbf{p} = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} = f, \text{ т.е. } \begin{cases} \dot{p}_2 = -\frac{\partial H}{\partial x_2} = -p_1 + 2k(x_2 - x_{2F}) \\ \dot{p}_1 = -\frac{\partial H}{\partial x_1} = p_2 \cdot a \cdot \cos x_1 + 2(x_1 - x_{1F}) \end{cases}$$

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0, \text{ т.е. } -p_2 - 2k_u(u - u_F) = 0$$

$$\text{Тогда оптимальное управление } u = u_F - \frac{p_2}{2k_u}.$$

Таким образом, оптимальные траектории дает решение системы четырёх дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = b - a \cdot \sin(x_1) - (u_F - \frac{p_2}{2k_u}) \\ \dot{p}_2 = -p_1 + 2k(x_2 - x_{2F}) \\ \dot{p}_1 = p_2 \cdot a \cdot \cos x_1 + 2(x_1 - x_{1F}) \end{cases} \right| \begin{matrix} x_1(0) = x_{10} \\ x_2(0) = x_{20} \\ p_1(T) = 0 \\ p_2(T) = 0 \end{matrix}, \quad (3.12)$$

Учитывая обстоятельство, что ЭМТ не должен работать в установившихся послеаварийных режимах $u_F=0$:

$$\left. \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = b - a \cdot \sin(x_1) + \frac{p_2}{2k_u} \\ \dot{p}_2 = -p_1 + 2k(x_2 - x_{2F}) \\ \dot{p}_1 = p_2 \cdot a \cdot \cos x_1 + 2(x_1 - x_{1F}) \end{cases} \right| \begin{matrix} x_1(0) = x_{10} \\ x_2(0) = x_{20} \\ p_1(T) = 0 \\ p_2(T) = 0 \end{matrix}, \quad (3.13)$$

Результатом решения полученной системы обыкновенных дифференциальных уравнений являются траектории переменных величин $(\delta(t))$,

$s(t)$, $p(t)$) и управляющих воздействий ($u(t)$), оптимальных в соответствии с выбранным критерием качества. Однако решение системы уравнений осложняется тем, что начальные условия для сопряжённых переменных неизвестны, известны только конечные значения. Такая задача называется *двухточечная краевая задача* и известные численные методы решения такой нелинейной системы применять нельзя.

Для решения полученной двухточечной краевой задачи существуют различные методы – метод квазилинеаризации [78-71], аналитические методы [82-83], метод стрельбы [84-85]. Достоинствами последнего метода являются универсальность, применимость к нелинейным задачам, а также возможность применения при численном интегрировании методов высокого порядка точности (например, метод Рунге-Кутты).

3.1.3. Решение двухточечной краевой задачи методом стрельбы.

В соответствии с [85] метод стрельбы состоит в сведении краевой задачи к задаче Коши, для решения которой существует много методов, позволяющих получить результат с заданной точностью. Таким образом, если имеется двухточечная краевая задача:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}_1(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t) \\ \dot{\mathbf{p}} = \mathbf{f}_2(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t) \\ \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{p}(T) = 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

где $\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2$ – вектор-функции размерности n , $\mathbf{x}(0)$ - вектор размерности n , $\mathbf{p}(T)$ - вектор размерности n , то решение состоит в отыскании такого вектора значений $\mathbf{p}(0) = \mathbf{p}_0$, при которых решение задачи Коши на интервале $t \in [0; T]$ позволяет обеспечить $\mathbf{p}(T) = 0$ и $\mathbf{x}(T) = \mathbf{x}_F$.

Так как n начальных условий известны, то в итоге получается система уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}_1(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t) \\ \dot{\mathbf{p}} = \mathbf{f}_2(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t) \\ x_i(0) = x_i, \quad i = 1, \dots, n \\ p_j(0) = p_j, \quad j = 1, \dots, n \end{cases}, \quad (3.15)$$

решение которой является также решением краевой задачи $\mathbf{p}^n(T, x_1, \dots, x_n, p_1, \dots, p_n) = 0$. Уравнения $(p_i(0) = p_j, j = 1, \dots, n)$ называются уравнениями «сшивания». Для численного решения системы (3.15) применяется метод Ньютона. Если известно начальное приближение \mathbf{p}^0 , которое принадлежит малой окрестности \mathbf{p}_0 , то $(i+1)$ -ая итерация вычисляется:

$$\mathbf{p}^{(i+1)} = \mathbf{p}^{(i)} - \left(J(\mathbf{p}^{(i)}) \right)^{-1} \mathbf{p}^{(i)}(T, x_1, \dots, x_n, p_1, \dots, p_n), \quad (3.16)$$

где $J(\mathbf{p}^{(i)}) = \left\{ \frac{\partial p_k^{(i)}(T)}{\partial p_j} \right\}_{j,k=1}^n$ - матрица Якоби. Вычисление $(n+1)$ -ой итерации

удобно записать в виде

$$\mathbf{p}^{n+1} = \mathbf{p}^n + \delta^n, \quad (3.17)$$

где $\delta^n = - \left(J(\mathbf{p}^{(i)}) \right)^{-1} \mathbf{p}^{(i)}(T, x_1, \dots, x_n, p_1, \dots, p_n)$

Тогда $(i+1)$ -ая итерация считается искомым решением, если:

1. $\left\| \mathbf{p}^{(i)}(T, x_1, \dots, x_m, p_1, \dots, p_m) \right\| < \varepsilon$
2. $\left\| \delta_j^{(i)} \right\| = \left\| \mathbf{p}_j^{(i+1)} - \mathbf{p}_j^{(i)} \right\| \leq \varepsilon$, при $\left\| \mathbf{p}_j^{(i+1)} \right\| \leq 1$ или

$$\frac{\left\| \delta_j^{(i)} \right\|}{\left\| \mathbf{p}_j^{(i+1)} \right\|} = \frac{\left\| \mathbf{p}_j^{(i+1)} - \mathbf{p}_j^{(i)} \right\|}{\left\| \mathbf{p}_j^{(i+1)} \right\|} \leq \varepsilon, \text{ при } \left\| \mathbf{p}_j^{(i+1)} \right\| > 1$$

Вычисление матрицы Якоби и соответственно частных производных $\frac{\partial p_k^{(i)}(T)}{\partial p_j}$

обеспечиваются заменой на разностные соотношения:

$$\frac{\partial p_k^{(i)}(T)}{\partial p_j} \approx \frac{p_k^{(i)}(T, x_1, \dots, x_m, p_1, \dots, p_j + h_j, \dots, p_m) - p_k^{(i)}(T, x_1, \dots, x_m, p_1, \dots, p_m)}{h_j} \quad (3.18)$$

Итак, в первую очередь решается задача Коши и определяется численное значение в конце рассматриваемого промежутка времени T : $\mathbf{p}^n(T, x_1, \dots, x_n, p_1, \dots, p_n)$. Далее для расчёта j -ого столбца матрицы Якоби решается новая задача Коши с $\mathbf{p} = p_1, \dots, p_{j-1}, p_j + h_j, p_{j+1}, \dots, p_k$ и вычисляется $\mathbf{p}^{(i)}(T, x_1, \dots, x_n, p_1, \dots, p_j + h_j, \dots, p_n)$. Таким образом, для каждого итерационного шага требуется решение $(2n-n+1)$ задач Коши.

При выборе шага h_j следует учитывать, что замена производной матрицы Якоби разностным соотношением имеет ошибку $O(h_j)$, однако при выборе очень малого значения h_j при округлении может сильно возрасти ошибка. Поэтому h_j следует выбирать в соответствии с:

$$h_j = \begin{cases} \sqrt{\varepsilon}, & \text{если } |p_j^0| \leq 1 \\ \sqrt{\varepsilon} \cdot p_j^0, & \text{если } |p_j^0| > 1 \end{cases}, \quad (3.19)$$

где ε – точность расчёта.

3.1.4. Алгоритм решения задачи оптимального управления ЭМТ

Имеется система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс в простейшей ЭЭС с установкой ЭМТ на валу генерирующего агрегата и учитывающих оптимальное управление мощностью ЭМТ на основании функционала (3.11):

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = b - a \cdot \sin(x_1) + \frac{p_2}{2k_u} \\ \dot{p}_2 = -p_1 + 2k(x_2 - x_{2F}) \\ \dot{p}_1 = p_2 \cdot a \cdot \sin x_1 + 2(x_1 - x_{1F}) \\ 0 \leq u \leq u_{max} \end{array} \right. \quad \left. \begin{array}{l} x_1(0) = x_{10} \\ x_2(0) = x_{20} \\ p_1(T) = 0 \\ p_2(T) = 0 \end{array} \right. \quad (3.20)$$

Алгоритм численного решения двухточечной краевой задачи, полученной в параграфе 3.1.2:

1. Выбираются начальные приближения сопряжённых переменных p_1^0, p_2^0 .
2. Выбирается погрешность вычисления ε .
3. Пусть, $p_1 = p_1^n, p_2 = p_2^n$.
4. Выбираются шаги h_1 и h_2 для разностных соотношений, исходя из условий:

$$h_j = \begin{cases} \sqrt{\varepsilon}, & \text{если } |l_j^0| \leq 1 \\ \sqrt{\varepsilon} \cdot l_j^0 & \text{если } |l_j^0| > 1 \end{cases}, j=1,2$$

5. Начиная с $j=0$ для каждого уравнения системы методом Рунге-Кутты 4 порядка, описанный в [86-87], находится решение задачи Коши (3.20). Реализовывается по схеме:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{j+1}^{(i)} = x_j^{(i)} + \Delta x_j^{(i)}; \quad j=1, \dots, n \\ \Delta x_j^{(i)} = \frac{h}{6} (K_1^{(i)} + 2K_2^{(i)} + 2K_3^{(i)} + K_4^{(i)}) \\ K_1^{(i)} = f(t_j, x_j) \\ K_2^{(i)} = f\left(t_j + \frac{h}{2}, x_j + \frac{h}{2} K_1^{(i)}\right) \\ K_3^{(i)} = f\left(t_j + \frac{h}{2}, x_j + \frac{h}{2} K_2^{(i)}\right) \\ K_4^{(i)} = f\left(t_j + h, x_j + h K_3^{(i)}\right) \end{array} \right.$$

6. Вычисляются $f_1^{(i)}$ и $f_2^{(i)}$:

$$f_1^{(i)} \equiv f_1(p_1^{(i)}, p_2^{(i)}) \equiv p_1(T, p_1^{(i)}, p_2^{(i)}) - 0 = p_1(T, p_1^{(i)}, p_2^{(i)})$$

$$f_2^{(i)} \equiv f_2(p_1^{(i)}, p_2^{(i)}) \equiv p_2(T, p_1^{(i)}, p_2^{(i)}) - 0 = p_2(T, p_1^{(i)}, p_2^{(i)})$$

7. Положив $p_1 = p_1^{(i)} + h_1, p_2 = p_2^{(i)}$
8. Снова решается задача Коши методом Рунге-Кутты 4 порядка.
9. Вычисляются $\tilde{f}_1^{(i)}, \tilde{f}_2^{(i)}$:

$$\tilde{f}_1^{(i)} \equiv f_1(p_1^{(i)} + h_1, l_2^{(i)}) \equiv p_1(T, p_1^{(i)} + h_1, p_2^{(i)})$$

$$\tilde{f}_2^{(i)} \equiv f_2(p_1^{(i)} + h_1, l_2^{(i)}) \equiv p_2(T, p_1^{(i)} + h_1, p_2^{(i)})$$

10. Вычисляются значения частных производных первого столбца матрицы Якоби:

$$\frac{\partial f_1}{\partial p_1}(p_1^{(i)}, p_2^{(i)}) \approx \frac{\tilde{f}_1^{(i)} - f_1^{(i)}}{h_1}, \quad \frac{\partial f_2}{\partial p_1}(p_1^{(i)}, p_2^{(i)}) \approx \frac{\tilde{f}_2^{(i)} - f_2^{(i)}}{h_1}$$

11. Пусть $p_1 = p_1^{(i)}, p_2 = p_2^{(i)} + h_2$.

12. Снова решаем задачу Коши методом Рунге-Кутты 4 порядка.

13. Вычисляются $\tilde{f}_1^{(i)}, \tilde{f}_2^{(i)}$:

$$\tilde{f}_1^{(i)} \equiv f_1(p_1^{(i)}, p_2^{(i)} + h_2) \equiv p_1(T, p_1^{(i)}, p_2^{(i)} + h_2)$$

$$\tilde{f}_2^{(i)} \equiv f_2(p_1^{(i)}, p_2^{(i)} + h_2) \equiv p_2(T, p_1^{(i)}, p_2^{(i)} + h_2)$$

14. Вычисляются значения частных производных первого столбца матрицы Якоби:

$$\frac{\partial f_1}{\partial p_2}(p_1^{(i)}, p_2^{(i)}) \approx \frac{\tilde{f}_1^{(i)} - f_1^{(i)}}{h_2}, \quad \frac{\partial f_2}{\partial p_2}(p_1^{(i)}, p_2^{(i)}) \approx \frac{\tilde{f}_2^{(i)} - f_2^{(i)}}{h_2}$$

15. Проверяем на условия сходимости:

$$\|f_j\| < \varepsilon, j=1,2.$$

$$\|\delta_j^{(i)}\| = \|p_j^{(i+1)} - p_j^{(i)}\| \leq \varepsilon, \text{ при } \|p_j^{(i+1)}\| \leq 1 \text{ или}$$

$$\frac{\|\delta_j^{(i)}\|}{\|p_j^n\|} = \frac{\|p_j^{(i+1)} - p_j^{(i)}\|}{\|p_j^{(i+1)}\|} \leq \varepsilon, \text{ при } \|p_j^{(i+1)}\| > 1$$

16. Если условия выполняются, то конец расчёта. Если нет, то решается систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial f_1}{\partial p_1}(p_1^{(i)}, p_2^{(i)}) \cdot \delta_1^{(i)} + \frac{\partial f_1}{\partial p_2}(p_1^{(i)}, p_2^{(i)}) \cdot \delta_2^{(i)} = -f_1(p_1^{(i)}, p_2^{(i)}) \\ \frac{\partial f_2}{\partial p_1}(p_1^{(i)}, p_2^{(i)}) \cdot \delta_1^{(i)} + \frac{\partial f_2}{\partial p_2}(p_1^{(i)}, p_2^{(i)}) \cdot \delta_2^{(i)} = -f_2(p_1^{(i)}, p_2^{(i)}) \end{cases}$$

17. Вычисляется последовательное приближение $(i+1)$ -го шага:

$$\begin{cases} p_1^{(i+1)} = p_1^{(i)} + \delta_1^{(i)} \\ p_2^{(i+1)} = p_2^{(i)} + \delta_2^{(i)} \end{cases}$$

18. Возврат на шаг 4.

Описанный алгоритм представлен в блок-схеме на рисунке 3.2.

3.1.5. Оптимальное управление ЭМТ.

Описанный в 3.1.4 алгоритм реализован в среде Visual Basic 2010 и представляет собой программу расчёта переходного процесса простейшей ЭЭС с установленным на валу генерирующего агрегата ЭМТ.

Если дополнить описанную систему обыкновенных дифференциальных уравнений (3.21) условием инерционности действия системы регулирования ЭМТ, а также ограничением по мощности устройства и учётом его однополярного действия, получается система из шести уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = b - a \cdot \sin(x_1) - u \\ \dot{p}_2 = -p_1 + 2k(x_2 - x_{2F}) \\ \dot{p}_1 = p_2 \cdot a \cdot \sin x_1 + 2(x_1 - x_{1F}) \\ \dot{u} = \frac{1}{T_{\text{ЭМТ}}} \left(-\frac{p_2}{2k_u} - u \right) \\ 0 \leq u \leq u_{\text{max}} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} x_1(0) = x_{10} \\ x_2(0) = x_{20} \\ p_1(T) = 0 \\ p_2(T) = 0 \end{array} \right.$$

В соответствие с примером, приведённом в главе 2:

$T_J = 8,1$ сек; $a = 35,82$; $b = 26,32$; $P_1(0) = -9.54$; $P_2(0) = -7.18$; $\omega_F = 0$; $\delta_F = 0.77$.

Постоянная времени ЭМТ принималась равной $T_{\text{магн}} = 0,1$ с.

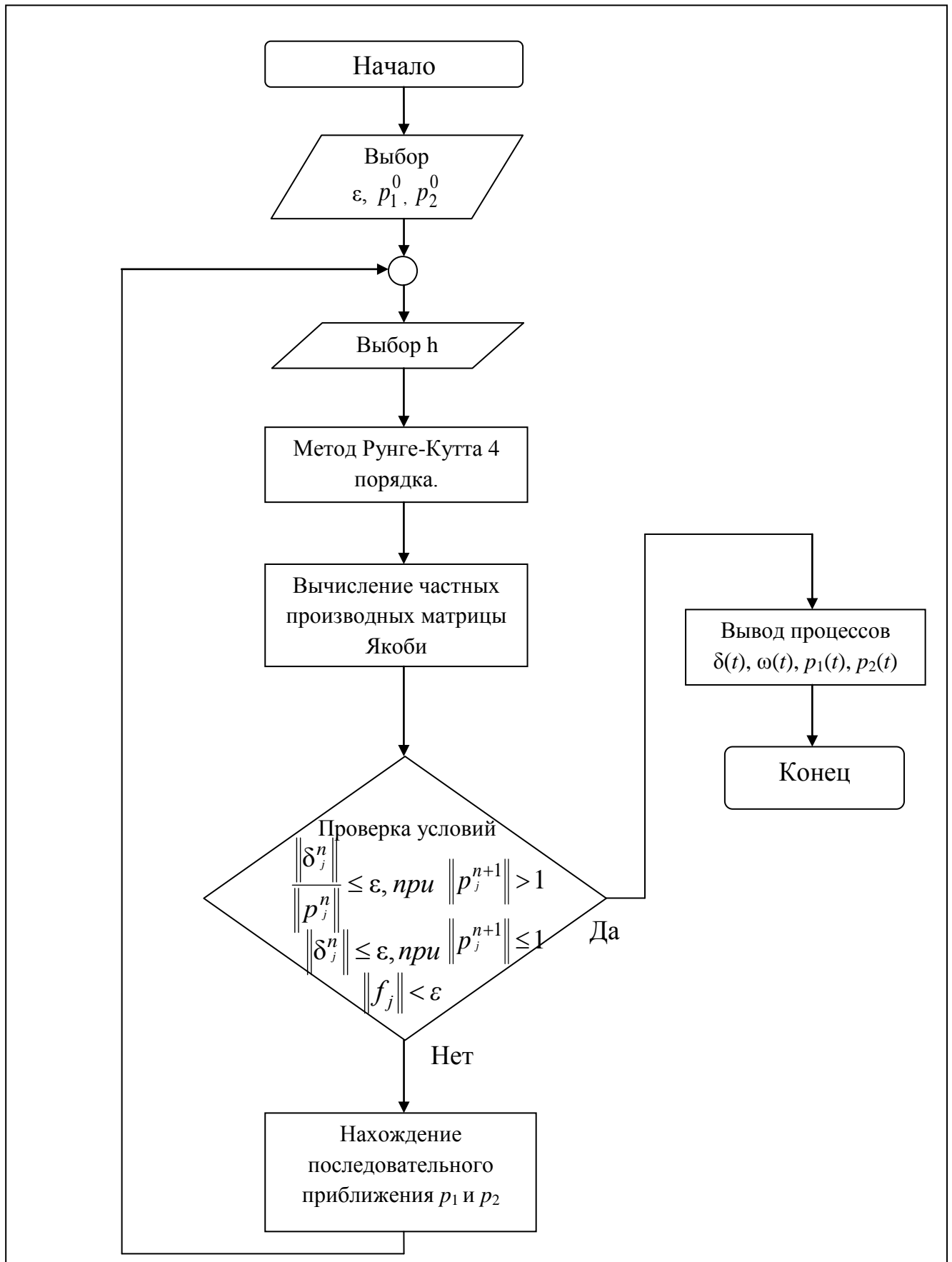


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритма решения двухточечной краевой задачи

Результатом расчётов являются оптимальные траектории для заданного критерия качества регулирования переходного процесса (рисунок 3.3). Представлены траектории при оптимальном управлении ЭМТ – $u(t)$, $\delta(t)$, $\omega(t)$, $p_1(t)$, $p_2(t)$, а также сходимость итерационного процесса. Анализ результатов показывает, что в момент отключения короткого замыкания ЭМТ не работает с максимальной мощностью. Это объясняется наличием постоянной времени системы регулирования ЭМТ $T_{ЭМТ}$. Кроме того, включение ЭМТ происходит при возрастании угла ротора δ или при угловой скорости вращения ротора $\omega > 0$. Остальные циклы работы ЭМТ меньше максимальной мощности и пропорциональны отклонению электрической мощности от значения в послеаварийном установившемся режиме. Работа ЭМТ прекращается при достижении установившегося послеаварийного режима.

Важным параметром, влияющим на результаты вычислений, является весовой коэффициент k_u , который определяет максимальную мощность торможения и время работы ЭМТ. Чем меньше этот коэффициент, тем мощность ЭМТ больше и соответственно время затухания переходного процесса меньше. Результаты расчётов для различных значений k_u приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Расчёт оптимального управления ЭМТ для различных параметров k_u .

№	1	2	3
k_u	0,5	0,1	0,01
Рисунок	Рисунок 3.3	Рисунок 3.4	Рисунок 3.5

При малых значениях k_u ЭМТ работает с большей мощностью торможения и достигает потолочных значений (достигает значения номинальной мощности торможения ЭМТ).

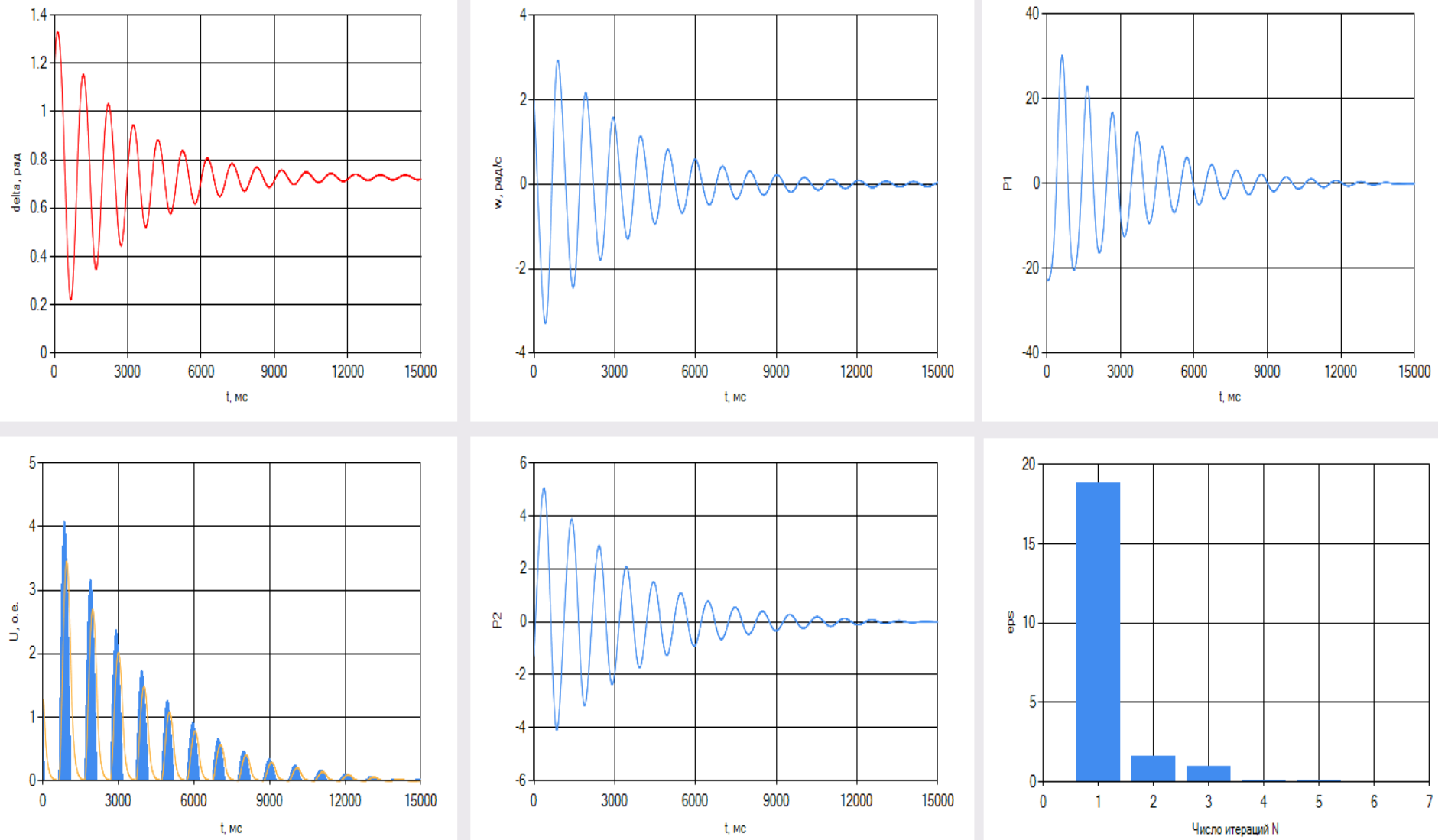


Рисунок 3.3 – Результаты расчётов переходного процесса в простейшей ЭЭС с ЭМТ на валу генерирующего агрегата. $k_H=0,5$

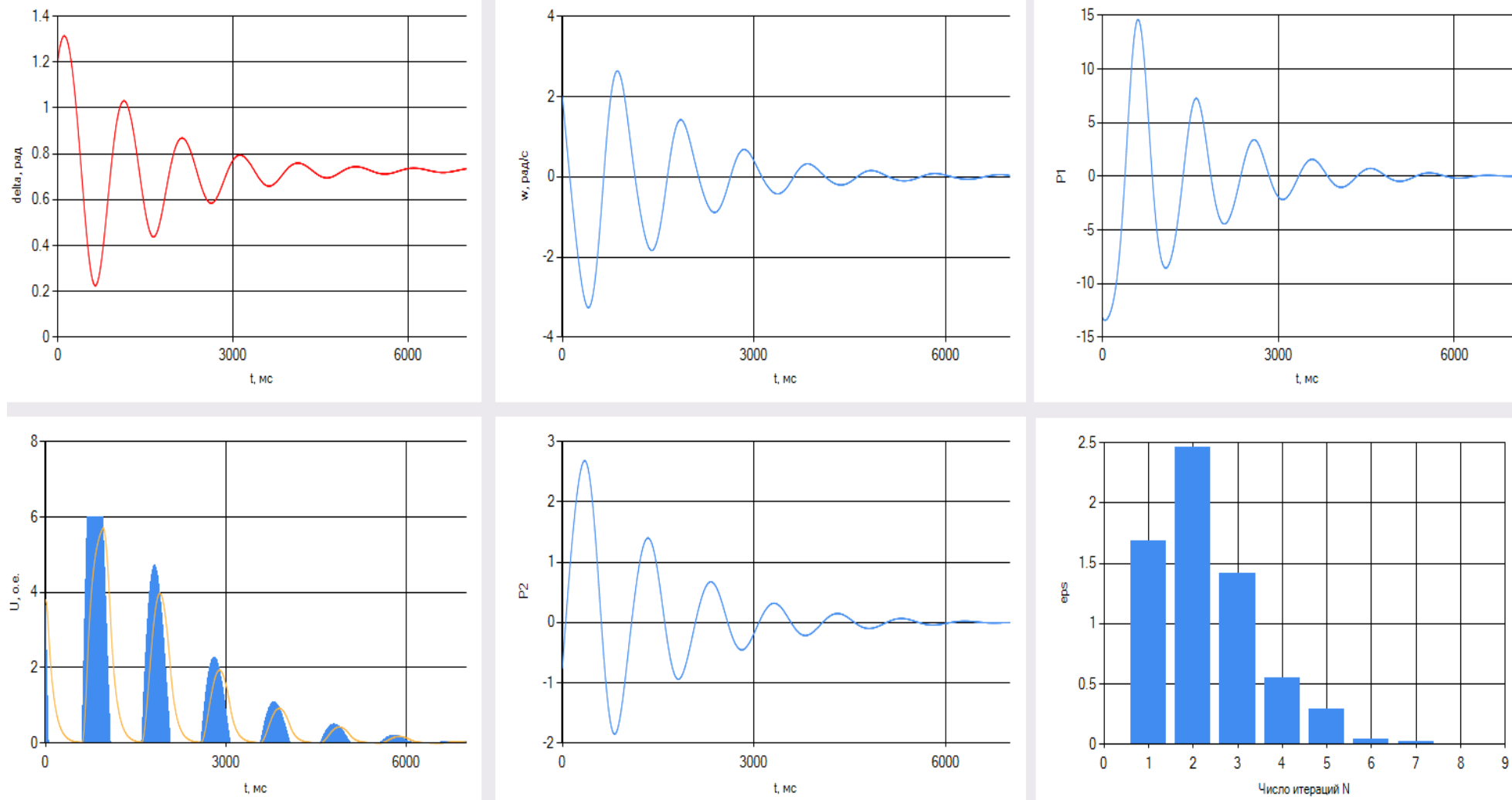


Рисунок 3.4 – Результаты расчётов переходного процесса в простейшей ЭЭС с ЭМТ на валу генерирующего агрегата. $k_{II}=0,1$

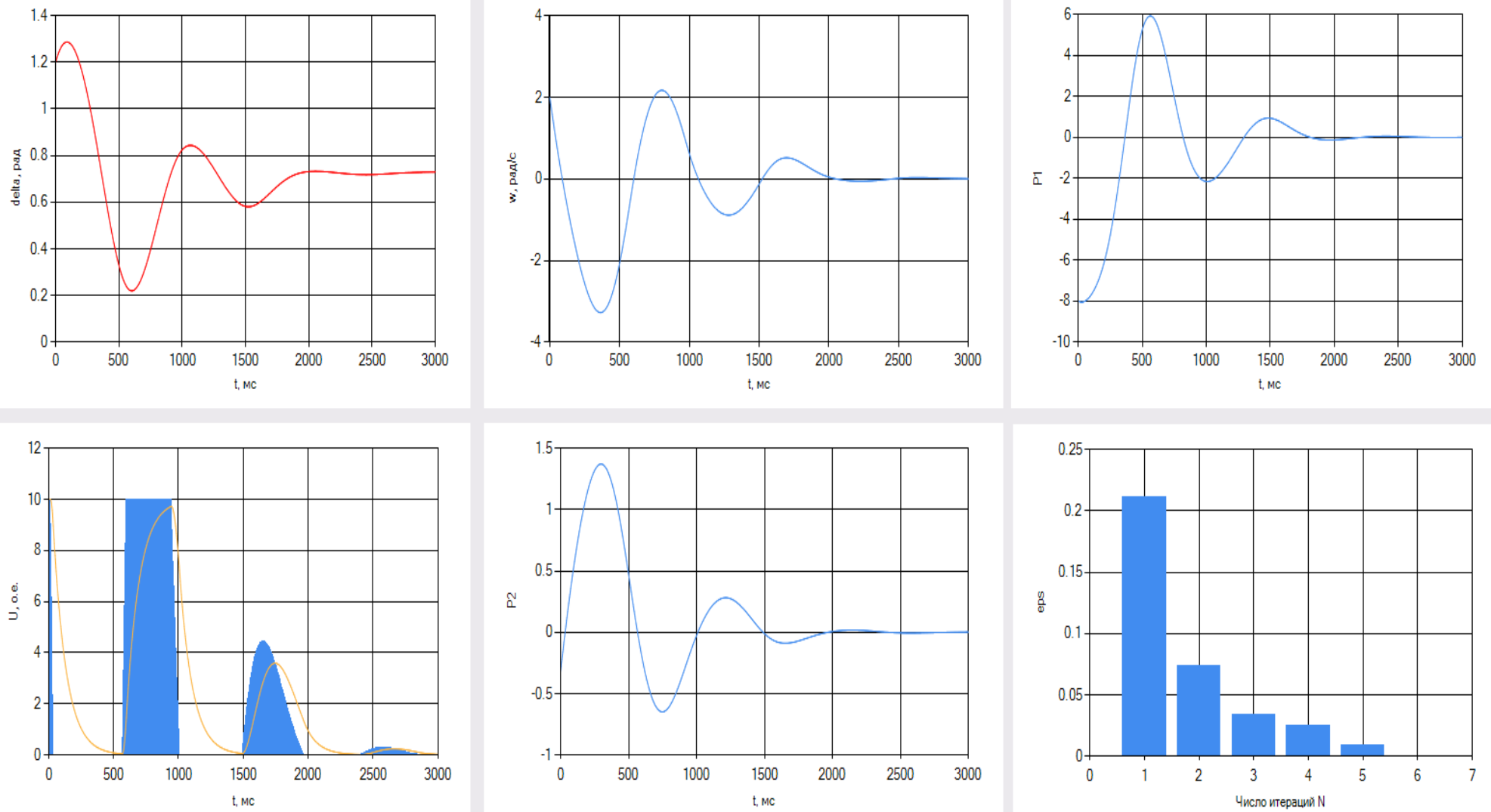


Рисунок 3.5 – Результаты расчётов переходного процесса в простейшей ЭЭС с ЭМТ на валу генерирующего агрегата. $k_{ii}=0,01$

Рассмотрим оптимальное управление ЭМТ при учёте действия АРВ СД генератора. АРВ имеет схему, представленную на рисунке 3.6.

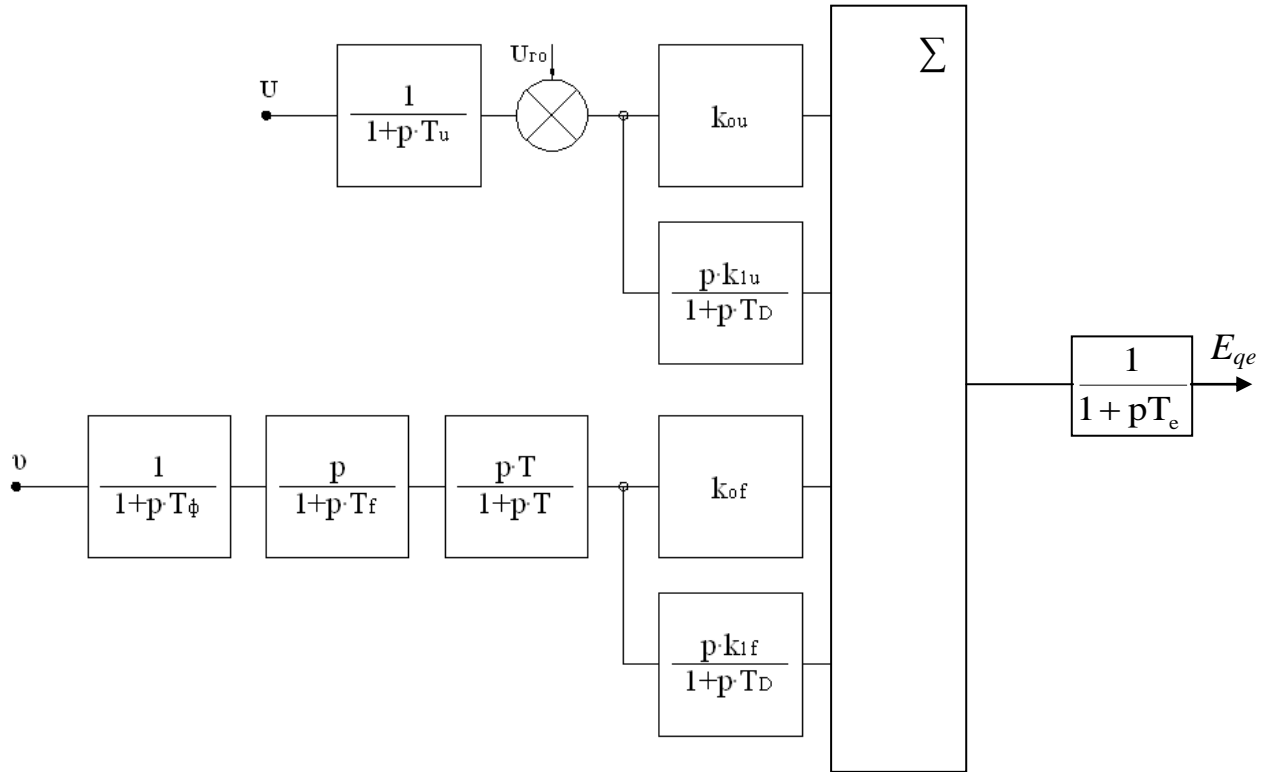


Рисунок 3.6 – Модель АРВ СД генерирующего агрегата в простейшей ЭЭС.

Система дифференциальных уравнений (3.20) дополнится уравнением переходного процесса в обмотке возбуждения и АРВ СД:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{d\delta}{dt} = s \\
\frac{ds}{dt} = \frac{\omega_{НОМ}}{T_J} P_T - \frac{\omega_{НОМ}}{T_J} P_m(E_q, \delta) - \frac{\omega_{НОМ}}{T_J} P_{ЭМТ} \\
T_{d0} \frac{d}{dt} E'_q(E_q, \delta) + E_q = E_{qe} \\
\frac{dE_{qe}}{dt} = \frac{1}{T_e} \cdot (x_3 + x_4 + x_8 + x_9 + U_{P\Phi} - E_{qe}) \\
\frac{dx_3}{dt} = \frac{1}{T_U} \cdot [k_{0U} \cdot (U_{\Gamma 0} - U) - x_3] \\
\frac{dx_4}{dt} = \frac{1}{T_D} \cdot \left\{ \frac{k_{1U}}{T_U} \cdot \left((U_{\Gamma 0} - U) - \frac{x_3}{k_{0U}} \right) - x_4 \right\} \\
\frac{dx_5}{dt} = \frac{1}{T_\Phi} \cdot (v - x_5) \\
\frac{dx_6}{dt} = \frac{1}{T_f} \cdot \left[\frac{1}{T_\Phi} \cdot (v - x_5) - x_6 \right] \\
\frac{dx_8}{dt} = \frac{k_{0f}}{T_f} \cdot \left[\frac{1}{T_\Phi} \cdot (v - x_5) - x_6 \right] - \frac{x_8}{T} \\
\frac{dx_9}{dt} = \frac{1}{T_D} \cdot \left\{ \frac{k_{1f}}{T_f} \cdot \left[\frac{1}{T_\Phi} \cdot (v - x_5) - x_6 \right] - \frac{k_{1f}}{k_{0f} \cdot T} \cdot x_8 - x_9 \right\}
\end{array} \right. \quad (3.21)$$

Система (4.23) дополняется уравнениями взаимосвязи параметров режима:

$$\left\{ \begin{array}{l}
P_{эл} = E_q U_c y_{lc} \sin \delta = a \cdot \sin \delta \\
E_q = E'_q - U_c y_{lc} (x_d - x'_d) \cos \delta
\end{array} \right. \quad (3.22)$$

Таким образом, учёт АРВ СД приводит к увеличению исходной системы обыкновенных дифференциальных уравнений до 17-ти. Результат расчёта оптимального управления в простейшей ЭЭС с учётом АРВ СД представлен на рисунке 3.7. Показаны оптимальные траектории при оптимальном управлении ЭМТ – $u(t)$, $\delta(t)$, $\omega(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$, а также $u_r(t)$, где u_r -напряжение на зажимах генератора. Анализ результатов показывает, что АРВ СД улучшает условия электромеханического переходного процесса, а также уменьшает время работы

ЭМТ в первом цикле качаний за счёт увеличения электромагнитной мощности генератора.

Важно отметить, что уже в простейшей ЭЭС расчёт оптимального управления приводит к определённым трудностям: сильная зависимость сходимости процесса решения от значений весовых коэффициентов, большое количество дифференциальных уравнений в системе. Решением задачи оптимального управления являются оптимальные траектории переходного процесса, которые зависят непосредственно от вида и места приложения возмущения. При применении теории оптимального управления к сложной энергосистеме нахождение оптимального управления в «темпе процесса» не представляется возможным. Однако полученные оптимальные траектории могут использоваться как эталон при выборе «квазиоптимальных» регуляторов и законов управления, в частности законов управления ЭМТ.

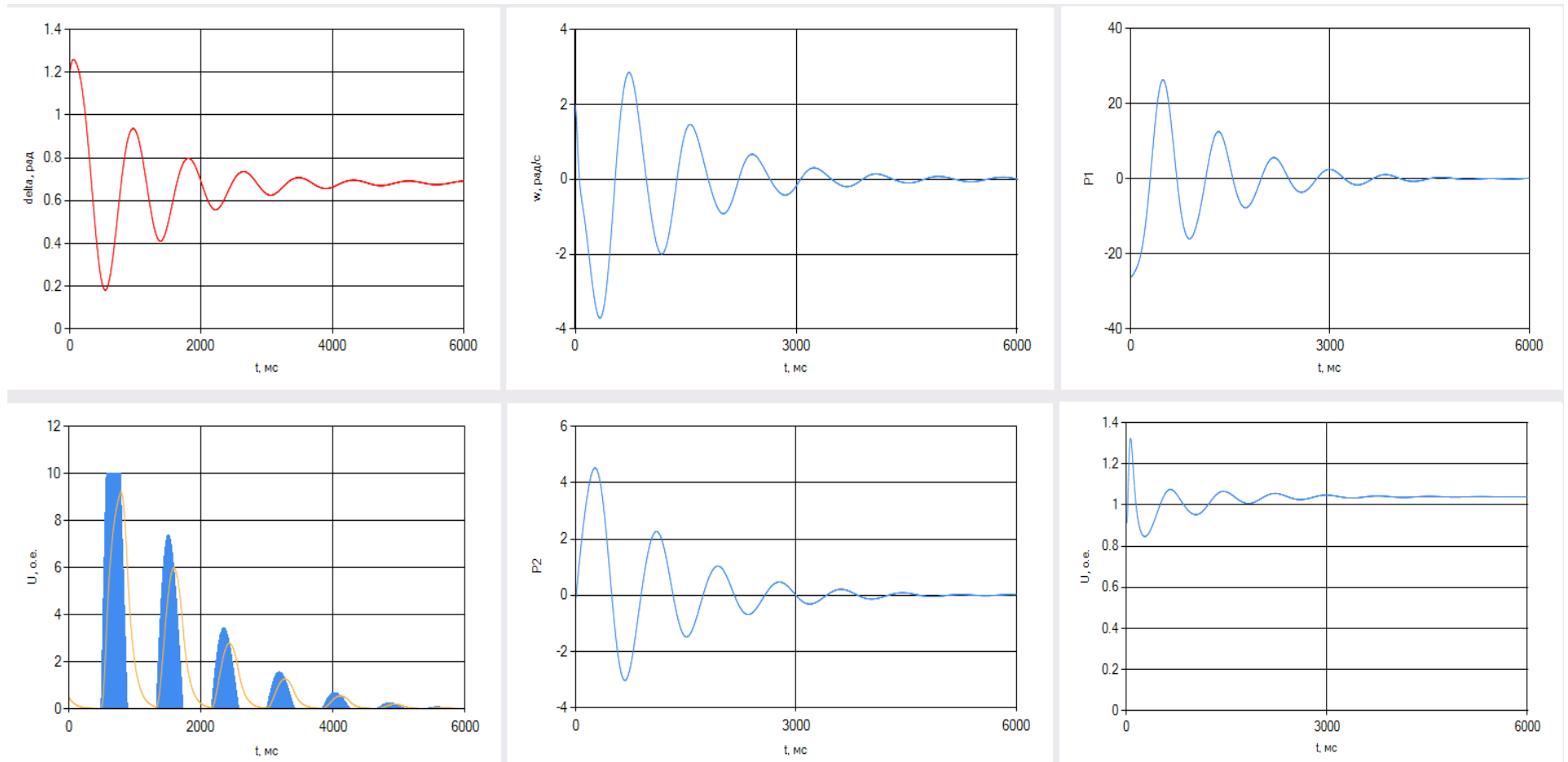


Рисунок 3.7 – Результаты расчётов переходного процесса в простейшей ЭЭС с ЭМТ на валу генерирующего агрегата с учётом АРВ СД.

3.2. Синтез закона управления с применением метода «обратного решения»

Для синтеза закона управления ЭМТ выбран метод «обратного решения» [58]. Метод «обратного решения» – это процедура, в которой совмещены задачи нахождения функции Ляпунова и соответствующего закона управления [90]. Метод «обратного решения» позволяет получить закон управления объектом, основываясь на ограничительной функции Ляпунова, описывающей необходимый характер затухания переходного процесса. Алгоритм «обратного решения» заключается в том, чтобы сделать каждое дифференциальное уравнение, описывающее поведение объекта, устойчивым, путём добавления обратной связи, вычисленной по данному алгоритму.

Для простейшей энергосистемы (рисунок 2.1) выполнен синтез закона управления электромагнитным тормозом, учитывая его электромагнитную инерционность. Тогда система уравнений запишется в виде

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_{ном}}{T_J} P_T - \frac{\omega_{ном}}{T_J} P_m \sin\delta - \frac{\omega_{ном}}{T_J} P_{ЭМТ}, \\ \frac{dP_{ЭМТ}}{dt} = \frac{1}{T_{ЭМТ}} (U - P_{ЭМТ}) \end{cases} \quad (3.23)$$

где U – параметрическое управление ЭМТ.

С учётом замен переменных: $\delta = x_1$; $\Delta\omega = x_2$; $\frac{\omega_{ном}}{T_J} P_T = c$; $\frac{\omega_{ном}}{T_J} P_m = a$;

$\frac{\omega_{ном}}{T_J} P_{ЭМТ} = x_3$, система (3.23) перепишется в виде:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = c - a \cdot \sin \delta - x_3 \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{1}{T_{ЭМТ}} \left(\frac{\omega_{ном}}{T_J} U - x_3 \right) \end{cases}, \quad (3.24)$$

Шаг 1. Рассматривается первое уравнение системы (3.24).

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2 \quad (3.25)$$

Для уравнения (3.25) управляемой переменной будет переменная x_2 . Пусть переменная x_{2d} – желаемое значение переменной, причем $x_{2d} = \alpha_1(x)$. В этом случае, x_2 называется виртуальное управление, функция $\alpha_1(x)$ – стабилизирующая функция;

По методу «обратного решения» выбирается функция Ляпунова, которая будет равна $V_1 = \frac{1}{2}(x_1 - \delta_0)^2$. Производная функции Ляпунова в данном случае запишется как

$$\frac{dV_1}{dt} = (x_1 - \delta_0) \frac{dx_1}{dt} = (x_1 - \delta_0) \cdot \alpha_1(x) \quad (3.26)$$

По теореме Ляпунова [58], для обеспечения устойчивости системы необходимо, чтобы производная функции Ляпунова была отрицательно полуопределённой. То есть $(x_1 - \delta_0) \cdot \alpha_1(x) \leq -W$, где W – некоторая положительная функция, которая принимает значения 0 в точке равновесия. В качестве функции удобно выбрать $W = k_I(x_1 - \delta_0)^2$, $k_I > 0$. Таким образом $(x_1 - \delta_0) \cdot \alpha_1(x) \leq -k_I(x_1 - \delta_0)^2 \Rightarrow \alpha_1(x) = -k_I(x_1 - \delta_0)$. Данное виртуальное управление будет стабилизировать первое уравнение системы (3.24).

Шаг 2. Пусть переменная z_2 - ошибка состояния x_2 от $\alpha_1(x)$:
 $z_2 = x_2 - x_{2d} = x_2 - \alpha_1(x) = x_2 + k_1(x_1 - \delta_0)$. К уравнению (3.25) с использованием ошибки состояния добавляется следующее уравнение системы (3.24) и система запишется в виде:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = z_2 + x_{2d} \\ \frac{dz_2}{dt} = \dot{x}_2 + k_1 \dot{x}_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = z_2 + x_{2d} \\ \frac{dz_2}{dt} = c - a \sin x_1 - x_3 + k_1 x_2 \end{cases} \quad (3.27)$$

Управляемой переменной для системы (3.27) является $x_3 = \alpha_2(x)$. Для удобства система (3.27) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = z_2 - k_1(x_1 - \delta_0) \\ \frac{dz_2}{dt} = -\alpha_2(x) + \varphi_1(x_1, x_2) \end{cases},$$

где $\varphi_1(x_1, x_2) = c - a \sin x_1 + k_1(z_2 - k_1(x_1 - \delta_0))$.

С учётом дополнительного уравнения функция Ляпунова запишется:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 = \frac{1}{2} x_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2. \text{ Производная функции Ляпунова примет вид:}$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_2}{dt} &= (x_1 - \delta_0) \dot{x}_1 + z_2 \dot{z}_2 = (x_1 - \delta_0)(z_2 - k_1(x_1 - \delta_0)) + z_2(-\alpha_2(x) + \varphi_1(x_1, x_2)) = \\ &= -k_1 x_1^2 + z_2(-\alpha_2(x) + \varphi_1(x_1, x_2)) \end{aligned} \quad (3.28)$$

Пусть $\frac{dV_2}{dt} \leq -W_2 = -k_1 x_1^2 - k_2 z_2^2$. Тогда с учётом всех замен переменных:

$$\alpha_2(x) = k_2 z_2 + \varphi_1(x_1, x_2) = k_2(x_2 + k_1(x_1 - \delta_0)) + c - a \sin x_1 + k_1 x_2 = \varphi_2(x_1, x_2)$$

Тогда ошибка состояния при найденном виртуальном управлении примет вид: $\dot{z}_2 = -k_2(x_2 + k_1(x_1 - \delta_0))$. Второе уравнение системы (3.24) стабилизировано.

Шаг 3. Пусть переменная z_3 - ошибка состояния x_3 от $\alpha_2(x)$:
 $z_3 = x_3 - x_{3d} = x_3 - \alpha_2(x) = x_3 - (k_2(x_2 + k_1(x_1 - \delta_0)) + c - a \sin x_1 + k_1 x_2)$

К уравнению (3.25) с использованием ошибки состояния добавляется следующее уравнение системы (3.24) и система запишется в виде:

$$\begin{cases} \frac{dx_2}{dt} = \varphi_1(x_1, x_2) - k_1 x_2 - z_3 + \varphi_2(x_1, x_2) \\ \frac{dz_3}{dt} = \frac{dx_3}{dt} - \dot{\alpha}_2(x) \end{cases},$$

где $\dot{\alpha}_2(x) = (k_1 k_2 - a \cos x_1)x_2 + (k_2 + k_1)(c - a \sin x_1 - x_3)$

Пусть $\varphi_3(x_1, x_2) = \frac{1}{T_{ЭМТ}} x_3 + \dot{\alpha}_2(x)$. С учётом дополнительного уравнения

функция Ляпунова примет вид:

$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} z_3^2 = \frac{1}{2} x_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2} z_3^2$. Тогда производная функции Ляпунова:

$$\begin{aligned} \frac{dV_3}{dt} &= (x_1 - \delta_0)\dot{x}_1 + z_2\dot{z}_2 + z_3\dot{z}_3 = x_1(z_2 - k_1 x_1) + z_2(-\alpha_2(x) + \varphi_1(x_1, x_2)) + \\ &+ z_3 \left(-\varphi_3(x_1, x_2) + \frac{1}{T_{ЭМТ}} \frac{\omega_{ном}}{T_J} U \right) \end{aligned} \quad (3.29)$$

Пусть $\frac{dV_3}{dt} \leq -W_3 = -k_1 x_1^2 - k_2 z_2^2 - k_3 z_3^2$. Тогда с учётом всех замен

переменных:

$$\begin{aligned} U &= T_{ЭМТ}(\varphi_3(x_1, x_2) - k_3 z_3) = \\ &= T_{ЭМТ} \frac{T_J}{\omega_{ном}} \left(\frac{1}{T_{ЭМТ}} x_3 + (k_1 k_2 - a \cos x_1)x_2 + (k_2 + k_1)(c - a \sin x_1 - x_3) - \right. \\ &\quad \left. - k_3(x_3 - (k_2(x_2 + k_1(x_1 - \delta_0)) + c - a \sin x_1 + k_1 x_2)) \right) \end{aligned}$$

С учётом перегруппировки синтезированный закон управления:

$$U = T_{ЭМТ} \frac{T_J}{\omega_{ном}} \left(\frac{1}{T_{ЭМТ}} x_3 + (k_1 k_2 + k_3 k_2 + k_1 k_3 - a \cos x_1)x_2 + \right. \\ \left. + (k_1 + k_2 + k_3)(c - a \sin x_1 - x_3) + k_1 k_2 k_3 (x_1 - \delta_0) \right) \quad (3.30)$$

Третье уравнение системы стабилизировано. Уравнение (3.30) является синтезированным законом управления ЭМТ, которое учитывает нелинейность рассматриваемого объекта и зависит от всего вектора состояния.

Весовые коэффициенты k_1, k_2, k_3 определяют время регулирования и величину управляющего сигнала: чем больше коэффициенты k_1, k_2, k_3 , тем меньше время переходного процесса и тем больше значение управляющего сигнала и соответственно мощности торможения.

Анализ (3.30) показывает, что закон управления симметричен относительно весовых коэффициентов: перестановка выбранных значений k_1, k_2, k_3 между собой будет давать один и тот же результат управления. Таким образом, для удобства выбора весовых коэффициентов следует выполнить замену переменных:

$$\begin{cases} k_1 k_2 + k_3 k_2 + k_1 k_3 = l \\ k_1 + k_2 + k_3 = m \\ k_1 k_2 k_3 = n \end{cases} \quad (3.31)$$

Выбор коэффициентов l, m, n определяет систему (3.31) из трёх уравнений, решение которой определяет значения весовых коэффициентов k_1, k_2, k_3 . При этом решение системы уравнений не единственно. Таким образом, синтезированный закон управления мощностью ЭМТ запишется в виде:

$$U = T_{\text{ЭМТ}} \frac{T_J}{\omega_{\text{ном}}} \left(\frac{1}{T_{\text{ЭМТ}}} x_3 + (l - a \cos x_1) x_2 + m(c - a \sin x_1 - x_3) + n(x_1 - \delta_0) \right)$$

Варьируя коэффициенты l, m, n можно добиваться необходимого качества переходного процесса, при этом изменяя величины первых производных выбранной функции Ляпунова.

Переходный процесс при выбранном законе управления для различных коэффициентов l, m, n показан на рисунке 3.8. Из рисунка видно, что лучшие показатели качества затухания переходного процесса показывают коэффициенты с большими значениями. Результаты показывают, что варьируя коэффициенты

l, m, n можно добиваться необходимого качества переходного процесса, при этом изменяя величины первых производных выбранной функции Ляпунова.

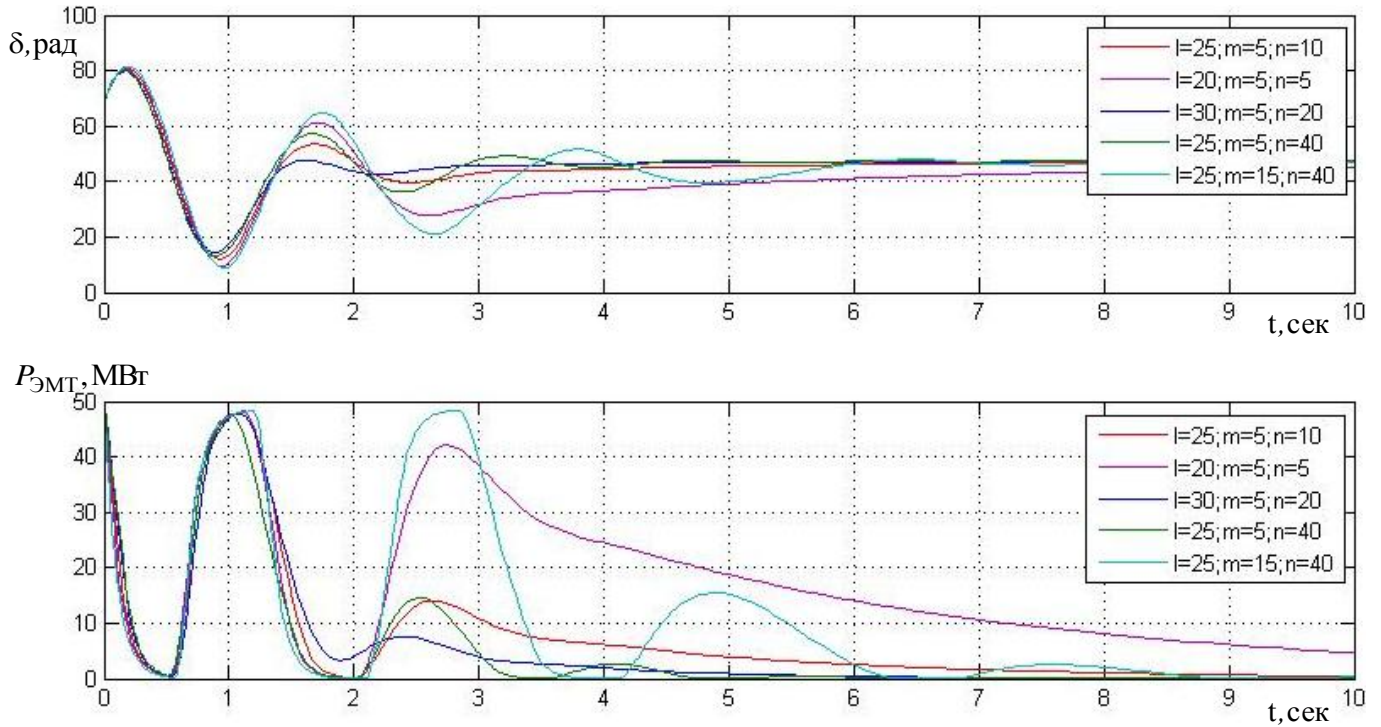


Рисунок 3.8 – Выбор коэффициентов синтезированного закона управления ЭМТ.

Для более сложных энергосистем, описываемых системой сложных дифференциальных уравнений алгоритм синтеза закона управления ЭМТ методом «обратного решения» сведётся к следующему. Пусть имеется система дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2, \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_n = f_n(x_n, \dots, x_n) + g_1(x_1, \dots, x_n)u \end{cases}, \quad (3.32)$$

где u - искомый закон управления.

Ожидается, что выходной сигнал $y = x_l$ должен стремиться к некоторому желаемому значению переменной $x_d(t)$ (стабилизационная функция). Алгоритм

«обратного решения» представляет собой итерационный процесс, начиная с $i = 1$ и заканчивая $i = n$.

1. Для дифференциального уравнения i определяется ошибка регулирования $z_i = x_i - x_{id}$.

2. Дифференциальное уравнение i переписывается с использованием переменной ошибки регулирования z_i (То есть записывается дифференциальное уравнение вида $\dot{z}_i = \dot{x}_i - \dot{x}_{id}$, а также x_i заменяется на $x_i = z_i + x_{id}$)

3. Переменная x_{i+1} рассматривается как сигнал управления (или виртуальное управление)

4. Вводится функция Ляпунова для рассматриваемой системы уравнений, состоящих из i уравнений (начиная с дифференциального уравнения 1 и заканчивая уравнением i). Выражение функции Ляпунова может выглядеть как

$$V_i = \frac{1}{2} z_1^2 + \dots + \frac{1}{2} z_i^2$$

Данная функция Ляпунова используется для нахождения стабилизационной функции $x_{i+1,d}$ для виртуального управления x_{i+1} . Необходимо отметить, что для дифференциального уравнения n в качестве сигнала управления выбирается переменная u вместо x_{n+1} .

5. Процесс повторяется для следующего дифференциального уравнения $i = i + 1$. Переход на п.1.

6. После нахождения искомого управления происходит процесс выбора коэффициентов усиления для достижения необходимого качества переходных процессов.

Следует отметить, что метод «обратного решения» позволяет избежать линеаризации системы дифференциальных уравнений и увеличить скорость синтеза управления. Данный метод позволяет синтезировать управление, однако его вид имеет достаточно сложную структуру и с увеличением порядка системы

представляет громоздкое выражение, которое достаточно сложно реализовать. Увеличение порядка системы дифференциальных уравнений пропорционально увеличивают количество весовых коэффициентов, что осложняет применение результатов синтеза и настройки коэффициентов такого закона управления. Кроме того, постоянные неизбежные изменения в системе приводят взаимно и к изменению самого закона управления. Данный метод можно использовать в простых системах, а также как некоторую отправную точку в разработке законов управления, способных обеспечить необходимое качество затухания переходных процессов в электроэнергетической системе. Для разработки более простых и в тоже время обладающих необходимыми показателями законов управления можно воспользоваться инженерным подходом к синтезу законов управления.

3.3. Инженерный подход в синтезе закона управления ЭМТ

При выборе закона управления ЭМТ необходимо решить, в каком случае должен включаться ЭМТ. Это может быть противоаварийная автоматика, и тогда критерием качества становятся быстродействие. Также ЭМТ может работать как стабилизатор – то есть способствовать возвращению генерирующего агрегата в установившийся режим работы. В таком случае, важными становятся минимизация потребления ЭЭ при работе ЭМТ и точность регулирования.

«Инженерный» подход позволяет получить простые регуляторы, из которых необходимо выбрать близкий к оптимальному или «квазиоптимальный» закон управления. Для выбора закона управления ЭМТ, прежде всего, необходимо из параметров электрического режима выбрать те, которые позволят добиться желаемого качества переходного процесса. В качестве каналов регулирования для ЭМТ могут выступать различные электрические характеристики – электрическая мощность, угол ротора генератора, угловая скорость вращения ротора, ток статора, напряжение на зажимах генератора. Общий вид структуры ЭМТ и системы автоматического регулирования (САР) представлен на рисунке 3.9.

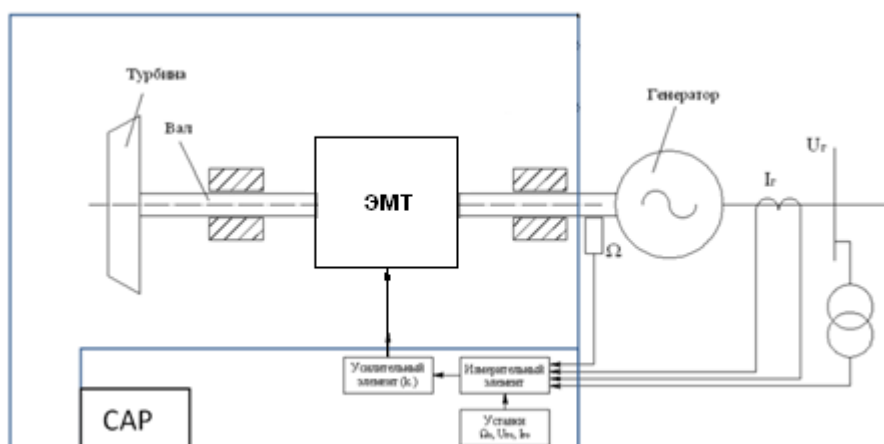


Рисунок 3.9 – Общий вид электромагнитного тормоза и САР.

Во время различного рода возмущений (например, короткие замыкания вблизи шин генерирующих агрегатов) при изменении параметров системы в первую очередь изменяются электромагнитный момент и электрическая мощность, определяя небаланс моментов на валу генерирующего агрегата. Действие ЭМТ входит в баланс моментов в уравнении движения ротора (3.33):

$$\frac{T_J}{\omega_{ном}} \cdot \frac{d(\omega - \omega_0)}{dt} = M_T - M_{ЭЛ} - M_{ЭМТ} \quad (3.33)$$

Таким образом, величиной тормозного момента можно управлять по разности значений измеренной электромагнитной мощности генератора и значения электромагнитной мощности до приложения возмущения. Отключение ЭМТ предполагается при достижении равенства измеряемой текущей электрической мощности и электрической мощности до приложения возмущения. Вносимый в уравнение (3.33) тормозной момент будет компенсировать возникающий небаланс на валу генерирующего агрегата.

Возникающий небаланс мощности между электрической и механической мощностями (моментами) приводит к ускорению ротора [1]. Таким образом, управляя мощностью ЭМТ по разности скорости вращения ротора генератора после приложения возмущения и до приложения возмущения, можно стабилизировать изменение скорости вращения, тем самым приводя систему в установившееся положение.

В данном параграфе рассматриваются возможные варианты законов управления мощностью ЭМТ и из них выбирается закон, отвечающий наилучшему качеству управления переходным процессом. Показателями качества являются:

- отклонение угла ротора от установившегося значения: $J_1 = \int_0^T (\Delta\delta)^2 dt$, рад²·с;
- отклонение электромагнитной мощности от установившегося значения: $J_2 = \int_0^T (\Delta P_{эл})^2 dt$, МВт²·с;
- скольжение ротора генератора: $J_3 = \int_0^T (s)^2 dt$, о.е.²·с;
- суммарное количество энергии, потребляемое ЭМТ: $J_4 = \int_0^T (\Delta P) dt$, кВт·с;

Сравнение выбираемых законов регулирования проводилось в схеме простейшей ЭЭС, используемой во второй главе.

Расчеты проводились в программном вычислительном комплексе *DIgSILENT Power Factory 15.0*. Моделировалось проходящее трёхфазное короткое замыкание на ВЛ вблизи шин станции. Результаты расчёта переходного процесса без учёта работы ЭМТ представлены на рисунке 3.10. На графиках представлены зависимости углов роторов генерирующих агрегатов от времени, а также мощность ЭМТ от времени.

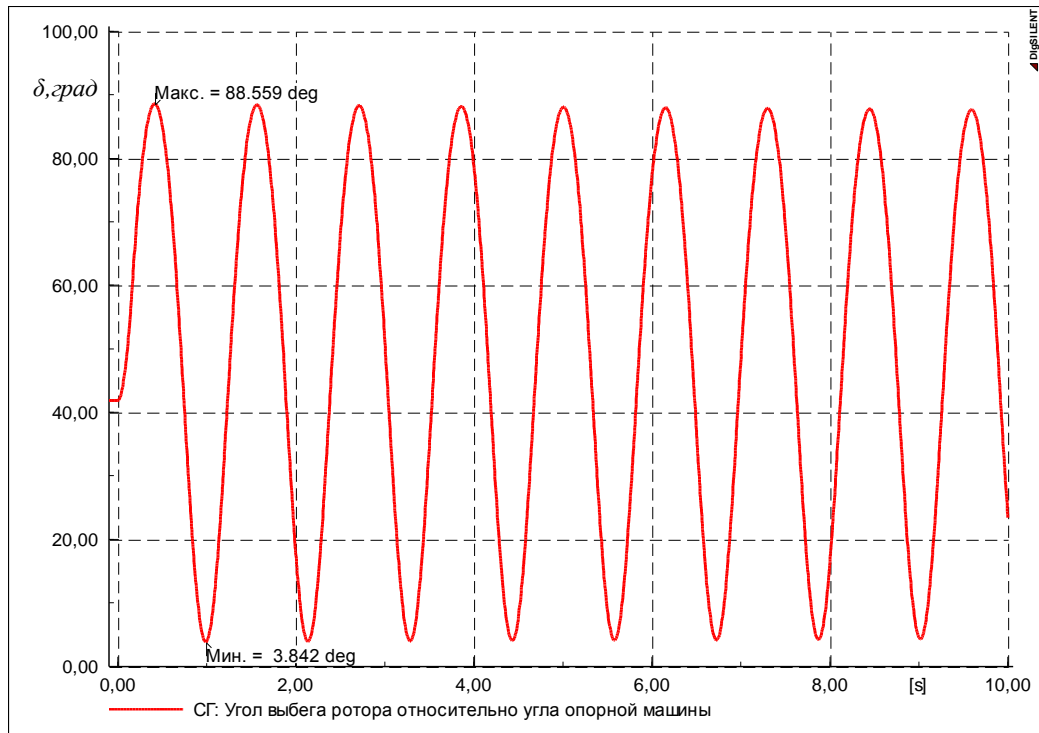


Рисунок 3.10 – Переходный процесс без установки ЭМТ.

1. Регулирование мощности ЭМТ по небалансу мощности на валу генерирующего агрегата. По измеряемым напряжению на зажимах генератора и току статора генератора определяется электромагнитная мощность. Полученное значение электромагнитной мощности сравнивают со значением электромагнитной мощности до приложения возмущения. В случае, если величина сравнения превышает заданное значение, формируется сигнал на включение электромагнитного тормоза. Величина тормозного момента определяется пропорционально величине отклонения электромагнитной мощности от значения до приложения возмущения. Закон управления показан на рисунке 3.11.

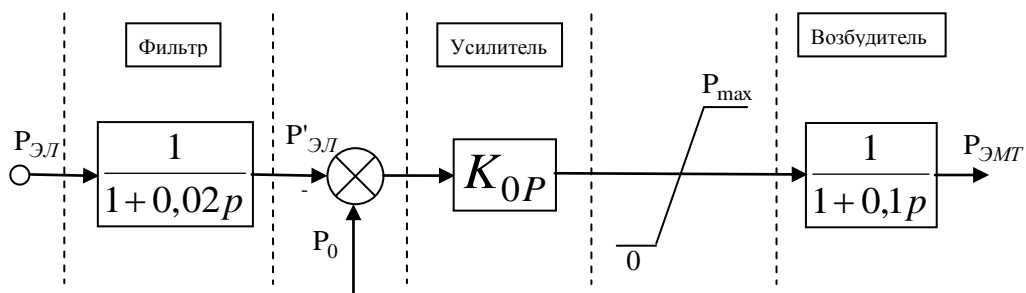


Рисунок 3.11 – Структурная схема регулятора возбуждения ЭМТ с каналом регулирования по отклонению электрической мощности.

Уравнения, описывающие закон управления:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_{\text{ЭМТ}}}{dt} = \frac{1}{T_{\text{магн}}} \cdot (K_{0P} \cdot (P_0 - P'_{\text{ЭЛ}}) - P_{\text{ЭМТ}}) \\ \frac{dP'_{\text{ЭЛ}}}{dt} = \frac{1}{T_{\Phi}} \cdot (P_{\text{ЭЛ}} - P'_{\text{ЭЛ}}) \\ 0 \leq P_{\text{ЭМТ}} \leq P_{\text{max}} \end{array} \right. \quad (3.34)$$

Переходный процесс при таком законе управления представлен на рисунке 3.12. ЭМТ позволяет эффективно демпфировать возникающие в результате возмущения колебания. Кроме того, работа ЭМТ позволила существенно снизить величину максимального и минимального угла выбега генератора. К положительным эффектам данного закона управления можно отнести относительно быстрое реагирование на возмущение, а также возможность демпфирования колебаний электрической мощности. Однако, такой закон регулирования обладает существенными недостатками: во-первых, ЭМТ отключается раньше, чем это необходимо, тем самым уменьшая площадку торможения «В» (рисунок 3.13), а значит, максимальный вылет угла ротора увеличивается; во-вторых, при уменьшении угла ротора δ ЭМТ включается в момент, когда электрическая мощность становится меньше мощности турбины, тем самым уменьшая площадку ускорения «С» и, соответственно, уменьшая минимальный угол отклонения. Для устранения недостатков первого закона управления предлагается ввести ограничение на включение ЭМТ с контролем по знаку скольжения.

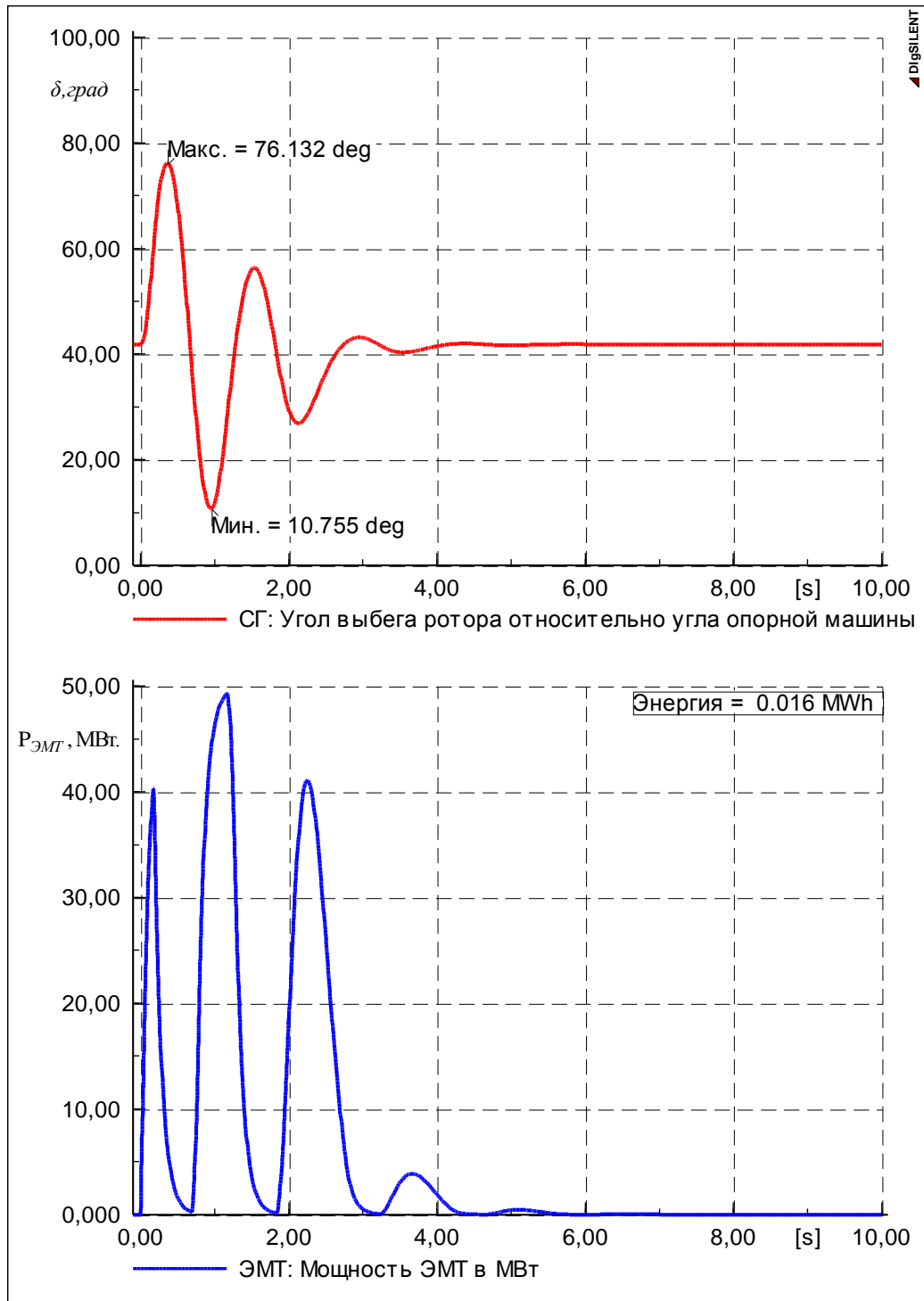


Рисунок 3.12 – Переходный процесс с установкой ЭМТ, управление по отклонению электрической мощности.

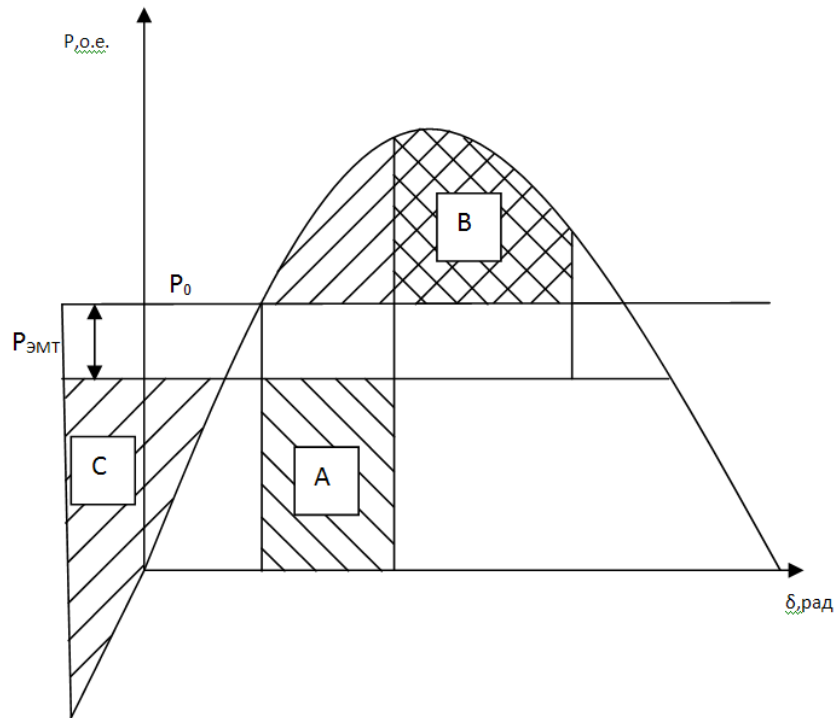


Рисунок 3.13 – Процесс управления включением ЭМТ. Управление по отклонению электрической мощности генератора.

Для оценки влияния настройки регулятора возбуждения ЭМТ на качество переходного процесса, проведена серия расчётов для различных коэффициентов усиления ЭМТ. Результаты приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Сравнение критериев качества переходного процесса при различных коэффициентах усиления закона управления устройством ЭМТ по небалансу мощности на валу генерирующего агрегата.

Критерий	Без ЭМТ	$K_{OP}=0,1$	$K_{OP}=0,3$	$K_{OP}=0,5$	$K_{OP}=0,7$	$K_{OP}=0,9$	$K_{OP}=1$	$K_{OP}=1$ с выд.
$P_{эл}$	3,292	0,704	0,308	0,245	0,241	0,250	0,485	0,315
$\delta_{рот}$	5,601	0,957	0,350	0,254	0,243	0,251	0,516	0,330
$\omega_{рот}$	1,622	0,290	0,101	0,068	0,061	0,061	0,061	0,077
$\mathcal{E}_{ЭМТ}$	0	9,792	14,007	15,490	16,090	24,339	160,049	38,463

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что для каждого критерия качества существует характерный минимум, связанный малым влиянием на переходный процесс с одной стороны и перерегулированием с другой стороны. Наилучшее затухание переходного процесса в рассматриваемой схеме достигается при $K_{OP}=0,7$, если не учитывать потраченную энергию.

Наименьшее значение энергии достигается при наименьшем коэффициенте усиления $K_{OP}=0,1$. Кроме того следует отметить, что, начиная со значения коэффициента усиления $K_{OP}=1$, происходит перерегулирование и в послеаварийном установившемся режиме ЭМТ включён постоянно, что может привести к его перегреву и повреждению (рисунок 3.14).

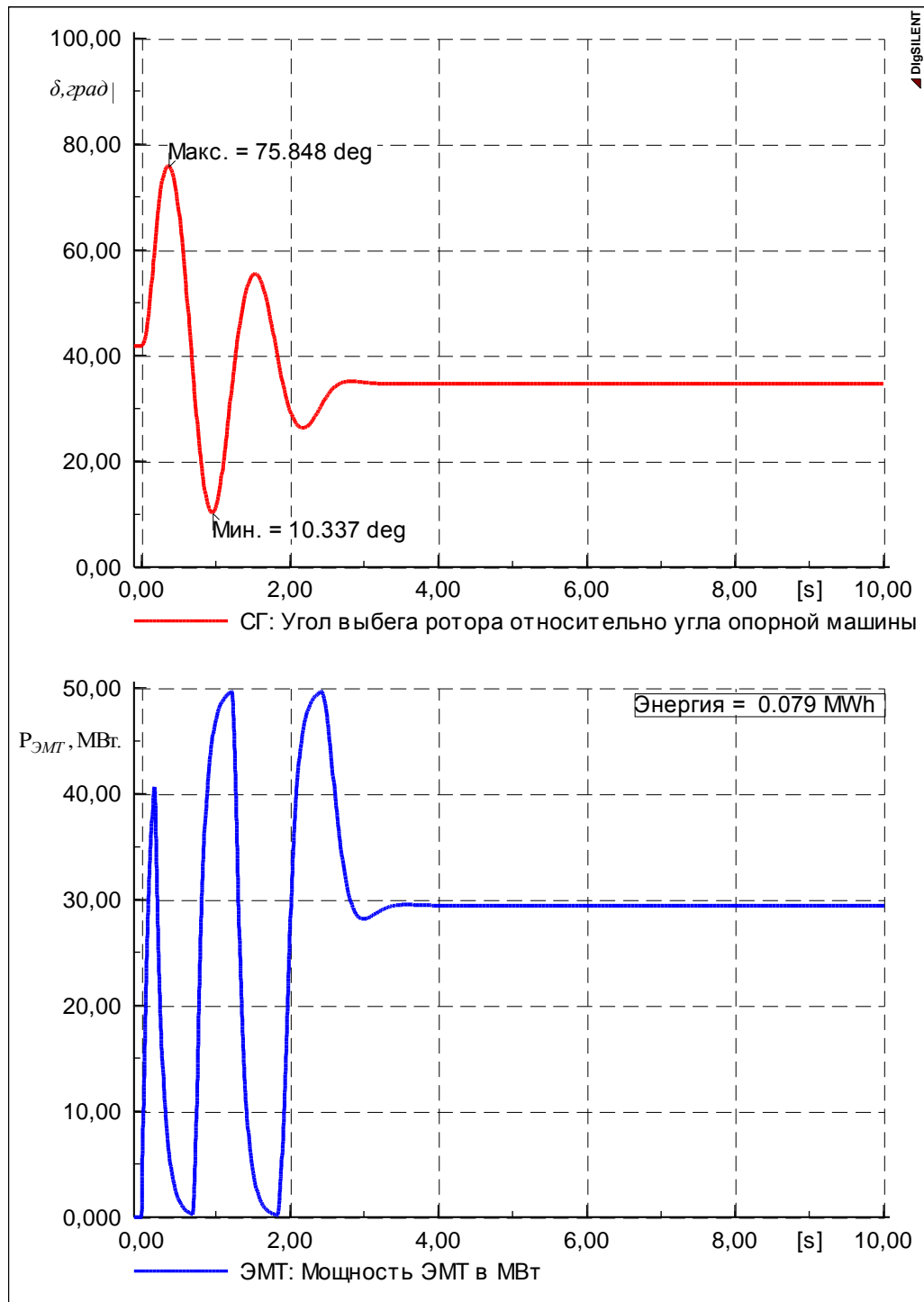


Рисунок 3.14 – Пример процесса перерегулирования устройства ЭМТ с большим коэффициентом усиления.

Для устранения данного недостатка предлагается вводить ограничение на время работы устройства ЭМТ. Таким образом, устройство ЭМТ будет работать некоторое время, достаточное для сохранения динамической устойчивости системы, а также позволяющее избежать излишнего перерегулирования и нагрева устройства (рисунок 3.15).

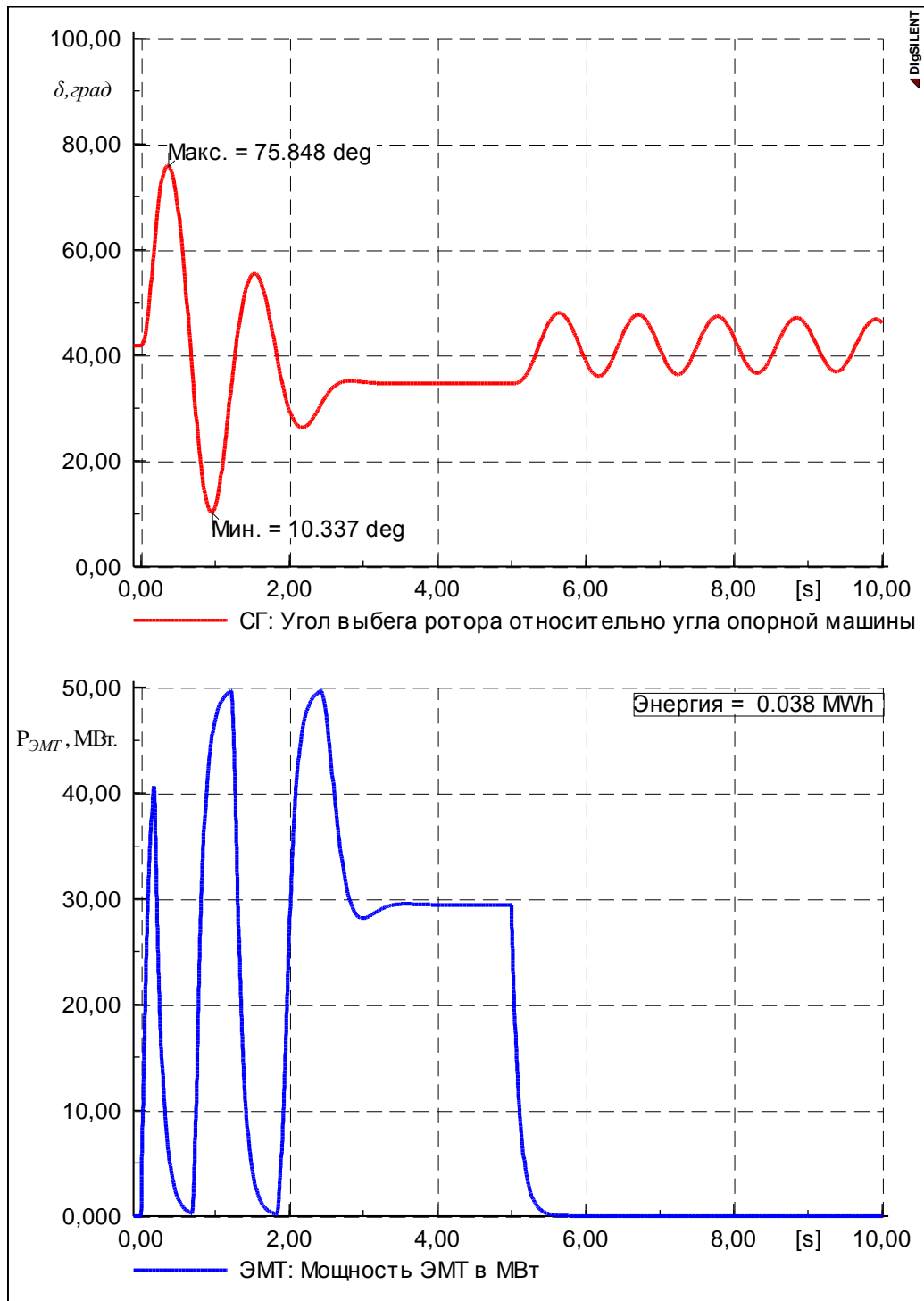


Рисунок 3.15 – Пример процесса перерегулирования устройства ЭМТ с большим коэффициентом усиления и ограничением по времени работы ЭМТ.

2. Регулирование по небалансу мощности на валу генерирующего агрегата с контролем по знаку скольжения. При $\Delta\omega < 0$ подаётся сигнал, блокирующий сигнал от канала регулирования по отклонению электрической мощности. При данном законе регулирования устраняется негативный эффект при уменьшении угла ротора генератора после возникновения возмущений, описанный в пункте 3.3.1 – при уменьшении угла ротора генератора отсутствует сигнал на включение ЭМТ (рисунок 3.16). Элемент $\boxed{\text{O}}$ вводится для контроля знака скольжения и отклонения мощности.

На рисунке, кроме описанных уже выше звеньев, необходимо ввести так называемый фильтр «постоянной составляющей» – передаточная функция $\frac{pT}{(1+pT)}$. В соответствии с [33-34] величина постоянной времени $T=2$ с. Его назначение состоит в формировании сигнала, близкого к отклонению угловой скорости вращения ($\Delta\omega$). Формирование отклонения ($\Delta\omega$) аналогично пункту 3.3.1 невозможно, поскольку угловая скорость вращения различна в различных установившихся режимах.

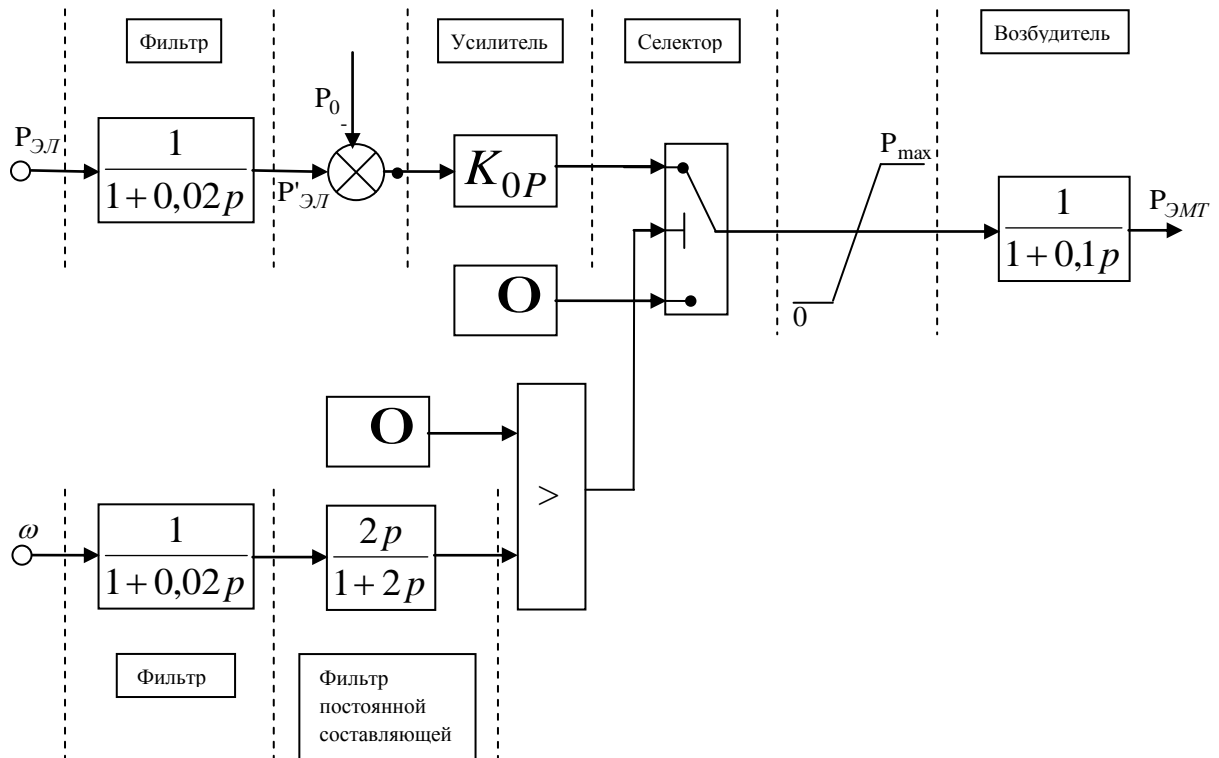


Рисунок 3.16 – Структурная схема регулятора возбуждения ЭМТ с каналом регулирования по отклонению электрической мощности и контролем по знаку скольжения.

Переходный процесс при таком законе регулирования приведён на рисунке 3.17. Сравнительные результаты по критериям качества регулирования при различных коэффициентах усиления приведены в таблице 3.3.

Анализ результатов показывает существенное улучшение качества переходного процесса по сравнению с 1-м законом регулирования, кроме того такой закон регулирования позволяет снизить время работы ЭМТ и энергию, выделяемую при торможении. Также наблюдается уменьшение минимального угла выбега генератора в первом цикле качаний.

Таблица 3.3. Сравнение критериев качества переходного процесса при различных коэффициентах усиления закона управления устройством ЭМТ по небалансу мощности на валу генерирующего агрегата с контролем по знаку скольжения.

Критерий	Без ЭМТ	$K_{OP}=0,1$	$K_{OP}=0,3$	$K_{OP}=0,5$	$K_{OP}=0,7$	$K_{OP}=0,9$	$K_{OP}=1$	$K_{OP}=1.2$	$K_{OP}=1.2$
$P_{эл}$	3,292	0,720	0,307	0,229	0,208	0,201	0,200	0,199	0,202
$\delta_{рот}$	5,601	0,995	0,363	0,249	0,219	0,210	0,208	0,207	0,210
$\omega_{рот}$	1,622	0,306	0,112	0,076	0,066	0,063	0,062	0,061	0,061
$\mathcal{E}_{ЭМТ}$	0	13,443	8,549	9,115	9,365	9,537	9,877	10,486	17,662

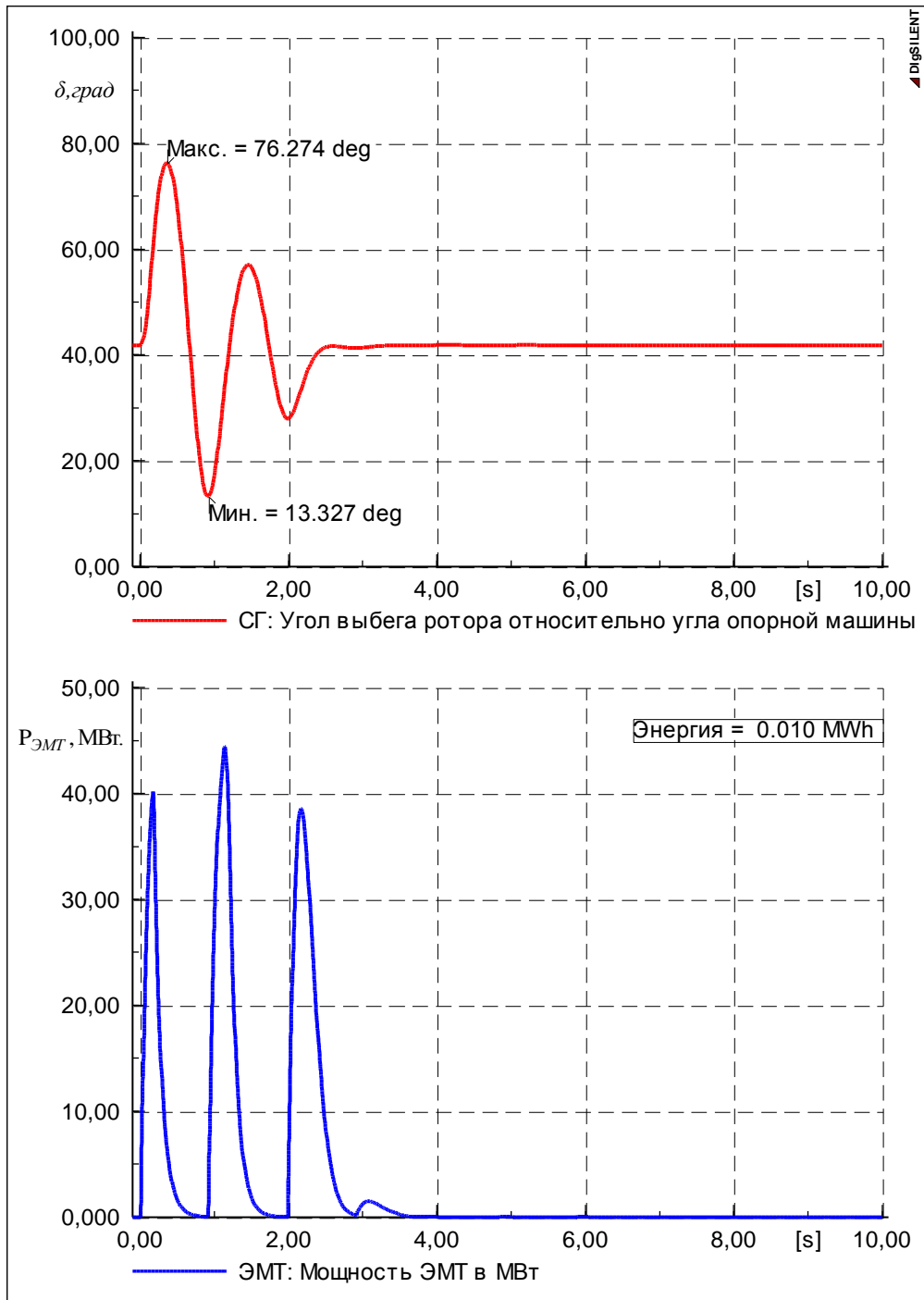


Рисунок 3.17 – Переходный процесс с установкой ЭМТ, управление по отклонению электрической мощности с контролем по знаку скольжения.

Следует отметить, что при реализации закона управления мощностью ЭМТ (рисунок 3.16) устраняется только один недостаток, описанный в пункте 3.3.1. Недорегулирование при $\Delta\omega > 0$ сохраняется ввиду преждевременного отключения ЭМТ и, соответственно, уменьшения площадки возможного торможения.

3. Регулирование по отклонению электрической мощности с контролем по знаку скольжения и зоной нечувствительности. В ЭЭС непрерывно происходят колебания, связанные с изменением нагрузки. Если принято решение устройство ЭМТ использовать только при резких аварийных возмущениях установившегося режима, то необходимо отстроиться от таких колебаний введением зоны нечувствительности устройства. При колебаниях контролируемых параметров режима, не выходящих за пределы зоны нечувствительности, устройство ЭМТ не включается. Результаты расчётов переходного процесса при регулировании мощностью ЭМТ с учётом зоны нечувствительности показаны на рисунке 3.18.

Результаты сравнения критериев качества затухания переходного процесса при изменении ширины зоны нечувствительности показаны в таблице 3.4. Наблюдается уменьшение времени работы устройства ЭМТ, что означает снижение потребления энергии за счёт своевременного отключения устройства. Наилучшие показатели критериев качества затухания переходного процесса достигаются при величине зоны нечувствительности равной 0.1. Сравнение результатов таблицы 3.3 и 3.4 показало, что выбранные настройки регуляторов пунктов 3.2.2 и 3.2.3 показывают сопоставимые значения критериев качества, однако при втором законе управления значение потребления энергии меньше. Кроме того наблюдается уменьшение минимального угла выбега генератора в первом цикле качаний. Это объясняется более ранним отключением устройства при вхождении в зону нечувствительности. Тем самым устраняется негативный эффект перерегулирования, связанный с инерционностью работы ЭМТ.

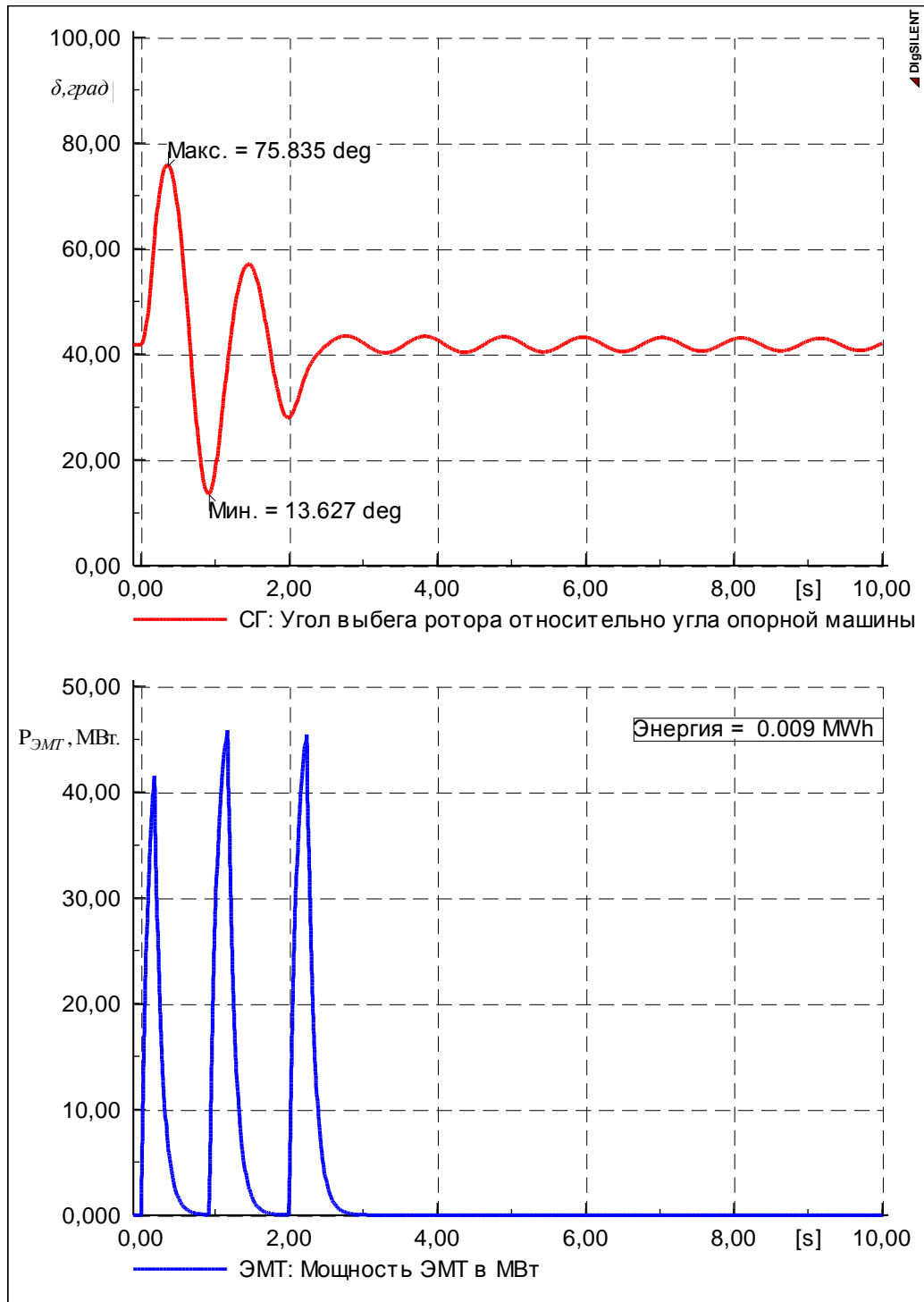


Рисунок 3.18 – Переходный процесс с установкой ЭМТ, управление по отклонению угловой скорости вращения с учётом зоны нечувствительности.

Таблица 3.4. Сравнение критериев качества переходного процесса при различной ширине зоны нечувствительности закона управления устройством ЭМТ по небалансу мощности на валу генерирующего агрегата с контролем по знаку скольжения и зоной нечувствительности.

Критерий	Без ЭМТ	$C=0,05$	$C=0,1$	$C=0,15$	$C=0,2$	$C=0,3$	$C=0,5$
$P_{эл}$	3,292	0,361	0,199	0,234	0,286	0,463	0,925
$\delta_{рот}$	5,601	0,390	0,207	0,253	0,320	0,557	1,222
$\omega_{рот}$	1,622	0,062	0,062	0,077	0,101	0,180	0,396
$\mathcal{E}_{ЭМТ}$	0	125,788	9,261	8,240	7,364	5,655	2,896

При введении зоны нечувствительности достигаются близкие значения по критериям качества регулирования, однако время работы ЭМТ, а соответственно и потребляемая энергия становится меньше, за счёт своевременного отключения устройства ЭМТ при попадании в зону нечувствительности.

4. Регулирование по отклонению угловой скорости генерирующего агрегата. Измеренное значение скорости вращения сравнивают со значением скорости вращения до приложения возмущения. В случае, если величина сравнения превышает заданное значение, формируется сигнал на включение электромагнитного тормоза. Величина тормозного момента определяется пропорционально величине отклонения электромагнитной мощности. Таким образом, ЭМТ работает при скорости вращения, превышающей скорость вращения ротора генератора до возникновения возмущения. Описанный закон управления представлен на рисунке 3.19.

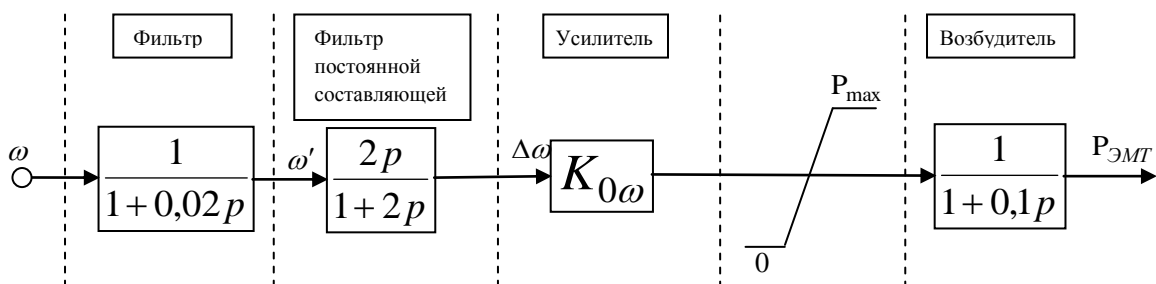


Рисунок 3.19 – Структурная схема регулятора возбуждения ЭМТ с каналом регулирования по отклонению угловой скорости вращения.

Уравнения, описывающие закон управления:

$$\begin{cases} \frac{dP_{ЭМТ}}{dt} = \frac{1}{T_{ЭМТ}} \cdot (K_{0\omega} \cdot (\omega_0 - \omega') - P_{ЭМТ}) \\ \frac{d\omega'}{dt} = \frac{1}{T_{\Phi}} \cdot (\omega - \omega') \\ \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{T} \cdot \left(T \left(\frac{1}{T_{\Phi}} \cdot (\omega - \omega') \right) - \Delta\omega \right) \\ 0 \leq P_{ЭМТ} \leq P_{\max} \end{cases} \quad (3.35)$$

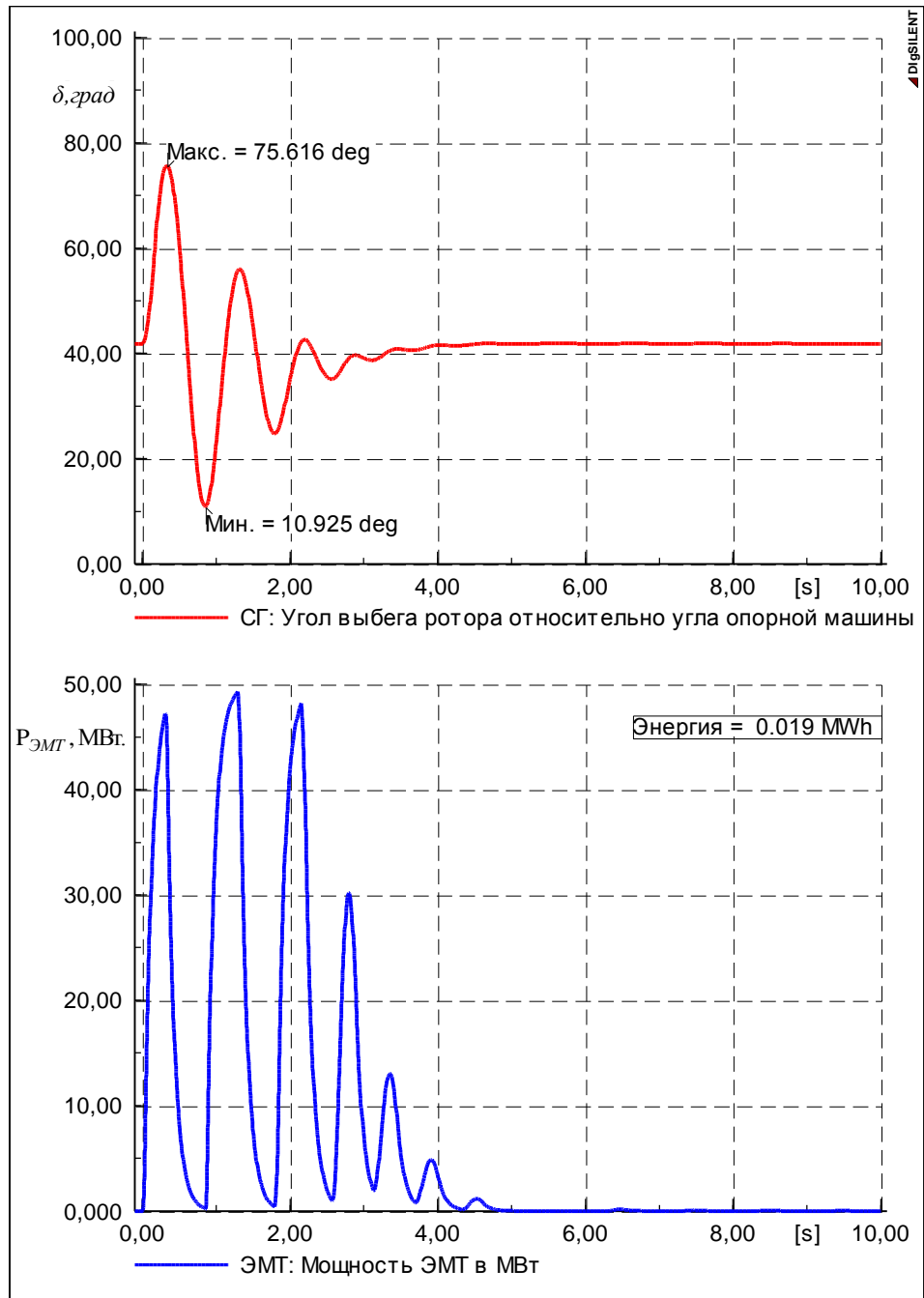


Рисунок 3.20 – Переходный процесс с установкой ЭМТ, управление по отклонению угловой скорости вращения.

Переходный процесс при таком законе управления представлен на рисунке 3.20. Работа ЭМТ при описанном законе управления позволила снизить величину максимального угла выбега генератора. Плюсами такого закона регулирования является более эффективное влияние на качество переходного процесса за счёт длительного торможения (рисунок 3.21, площадка «Е»). Кроме того, в процессе уменьшения угла ЭМТ не включается (площадка «G»), тем самым уменьшая минимальное отклонение угла ротора (рисунок 3.21). Однако такой закон

регулирования обладает меньшим быстродействием, так как скорость генератора возрастает не скачком, а непрерывно и зависит от постоянной инерции конкретного генерирующего агрегата. Представленный закон управления показывает некоторое уменьшение значения критерия качества по углу ротора и увеличение остальных критериев. Кроме того значение энергии нагрева ЭМТ при данном законе управления наибольшее.

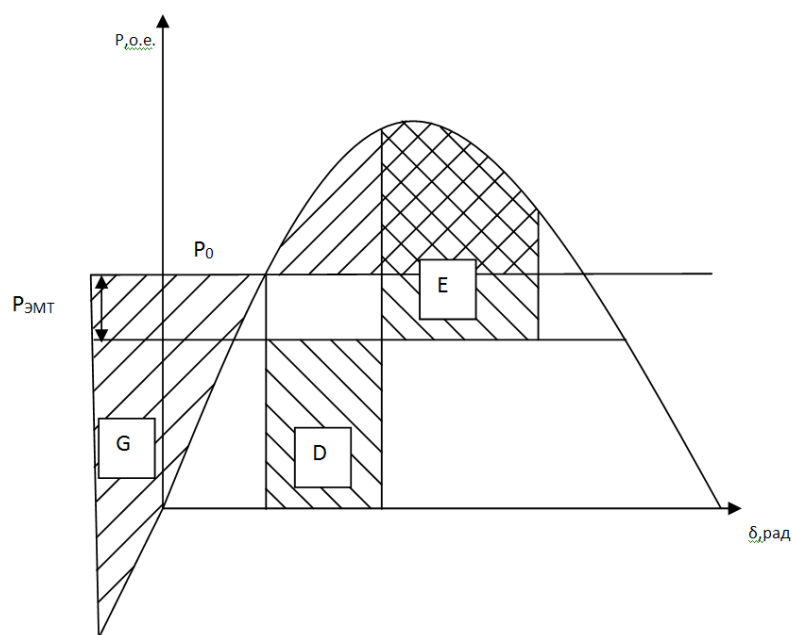


Рисунок 3.21 – Процесс управления включением ЭМТ. Управление по отклонению электрической мощности генератора.

Для того, чтобы понять как влияет коэффициент усиления управляющего сигнала на качество переходного процесса, проведена серия вариантных расчетов. Результаты приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5. Сравнение критериев качества переходного процесса при различных значениях коэффициента усиления закона управления устройством ЭМТ по угловой скорости вращения ротора генерирующего агрегата.

Критерий	Без ЭМТ	$K_{0\omega}=20$	$K_{0\omega}=40$	$K_{0\omega}=60$	$K_{0\omega}=80$	$K_{0\omega}=100$	$K_{0\omega}=150$	$K_{0\omega}=200$	$K_{0\omega}=300$
$P_{эл}$	3,292	0,269	0,222	0,215	0,213	0,213	0,213	0,214	0,221
$\delta_{рот}$	5,601	0,305	0,229	0,216	0,211	0,208	0,206	0,206	0,213
$\omega_{рот}$	1,622	0,105	0,081	0,077	0,075	0,074	0,072	0,071	0,073
$\mathcal{E}_{ЭМТ}$	0	13,145	14,893	16,118	17,163	18,127	19,559	23,274	34,828

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что для каждого критерия качества существует характерный минимум, связанный малым

влиянием на переходный процесс с одной стороны и перерегулированием с другой стороны. Наилучшее затухание переходного процесса в рассматриваемой схеме достигается при $K=200$.

5. Регулирование по отклонению угловой скорости генерирующего агрегата с зоной нечувствительности. Аналогично пункту 3.3.3 результаты расчётов переходного процесса при регулировании мощности ЭМТ с учётом зоны нечувствительности показаны на рисунке 3.22.

Регулируя ширину зоны нечувствительности можно добиваться различного качества регулирования, а также времени работы ЭМТ. Изменение времени работы ЭМТ – важный параметр не только с точки зрения предотвращения перегрева ЭМТ, но также с экономической точки зрения – чем меньше работа ЭМТ, тем меньше потребление энергии ЭМТ в течение аварийного режима.

Результаты расчётов при изменении ширины зоны нечувствительности сведены в таблицу 3.6. Анализ результатов показывает, что качество регулирования при данном законе управления оказывается ниже закона управления без учёта зоны нечувствительности. Это связано с задержкой включения ЭМТ при работе в зоне нечувствительности.

Таблица 3.6. Сравнение критериев качества переходного процесса при различной ширине зоны нечувствительности закона управления устройством ЭМТ по угловой скорости вращения ротора генерирующего агрегата.

Критерий	Без ЭМТ	C=0,0005	C=0,001	C=0,0015	C=0,002	C=0,003	C=0,005
$P_{эл}$	3,292	0,220	0,221	0,218	0,254	0,268	0,367
$\delta_{рот}$	5,601	0,213	0,218	0,218	0,267	0,292	0,432
$\omega_{рот}$	1,622	0,073	0,077	0,078	0,095	0,103	0,148
$\mathcal{E}_{эмт}$	0	29,622	17,058	15,682	13,349	11,724	8,847

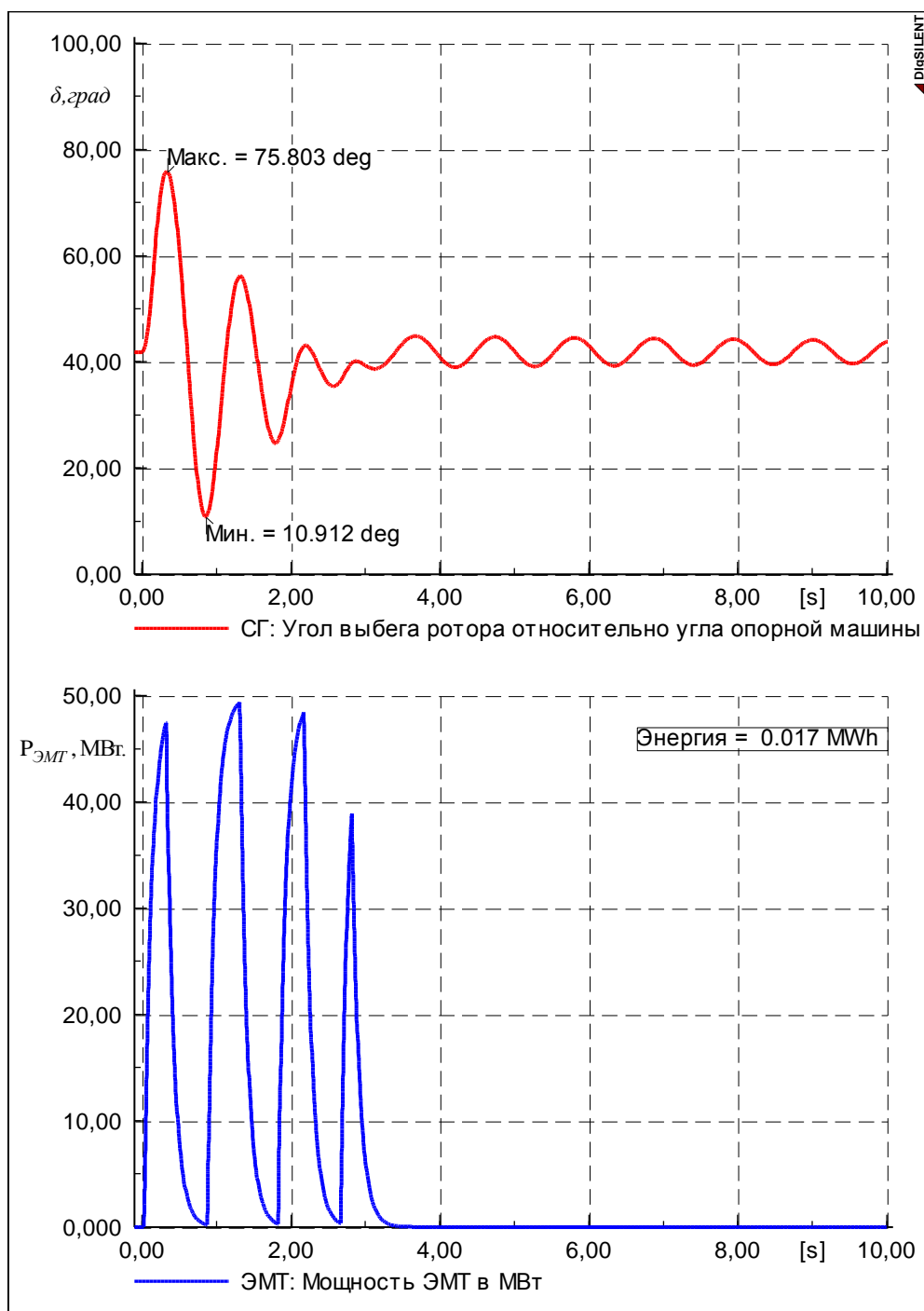


Рисунок 3.22 – Переходный процесс с установкой ЭМТ, управление по отклонению угловой скорости вращения с учётом зоны нечувствительности.

6. Регулирование по максимально допустимому отклонению электрической мощности с контролем по знаку скольжения. Является аналогом закона регулирования в пункте 3.3.2, однако включение ЭМТ происходит в момент превышения отклонения электромагнитной мощности некоторого значения, при этом подаётся сигнал сразу на выдачу максимальной мощности торможения ЭМТ (рисунок 3.23). Такой закон управления обладает

высоким быстродействием, однако нет возможности регулирования мощности ЭМТ и, соответственно, при таком регулировании ЭМТ должен работать только в короткое время после возникновения возмущения при условии превышения уставки срабатывания. При таком законе регулирования существует возможность перерегулирования, так как ЭМТ работает с максимальной мощностью при любом отклонении, большем заданного значения. Константа C определяет значение срабатывания и отключения форсировки ЭМТ. Поэтому для устранения недостатка необходимо вводить ограничение по времени работы устройства ЭМТ во избежание перегрева и излишней работы устройства.

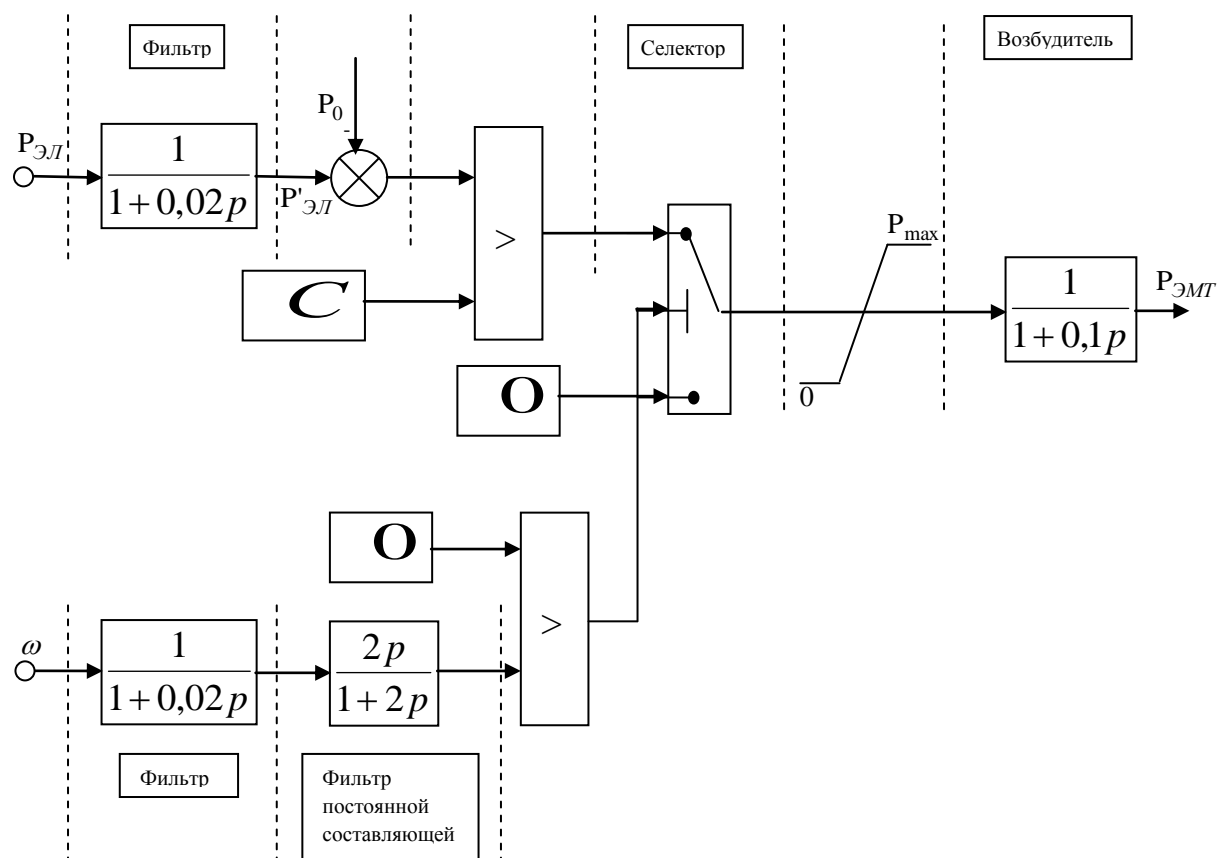


Рисунок 3.23 – Структурная схема регулятора возбуждения ЭМТ с каналом регулирования по максимально допустимому отклонению электрической мощности и контролем по знаку скольжения.

Переходный процесс при таком законе регулирования приведён на рисунке 3.24. Результаты по критериям качества с различной величиной срабатывания устройства представлены в таблице 3.7. Анализ результатов показывает снижение качества переходного процесса, однако такой закон регулирования позволяет

существенно снизить время работы ЭМТ, при этом в первые циклы качаний ЭМТ будет работать с максимальной мощностью, препятствуя нарушению динамической устойчивости. Кроме того стоит отметить опасность возникновения перерегулирования в таком законе управления – при малых значениях переменной C существует возможность перейти на новый послеаварийный установившийся режим с постоянно работающим ЭМТ. Таким образом, необходимо вводить ограничение на время работы ЭМТ. Такой канал регулирования выгодно использовать в качестве быстрого возрастания тока возбуждения ЭМТ при больших возмущениях. Действие канала приводит к быстрому достижению ЭМТ максимальной мощности торможения.

Таблица 3.7. Сравнение критериев качества переходного процесса при различных значениях срабатывания закона управления устройством ЭМТ по максимально допустимому отклонению электрической мощности с контролем по знаку скольжения.

Критерий	Без ЭМТ	$C=0,1$	$C=0,15$	$C=0,2$	$C=0,3$	$C=0,4$	$C=0,5$
$P_{эл}$	3,292	0,956	0,291	0,291	0,529	0,670	0,851
$\delta_{рот}$	5,601	0,996	0,309	0,315	0,635	0,837	1,107
$\omega_{рот}$	1,622	0,069	0,084	0,091	0,203	0,271	0,359
$\mathcal{E}_{ЭМТ}$	0	258,344	16,866	11,990	7,075	5,449	3,875

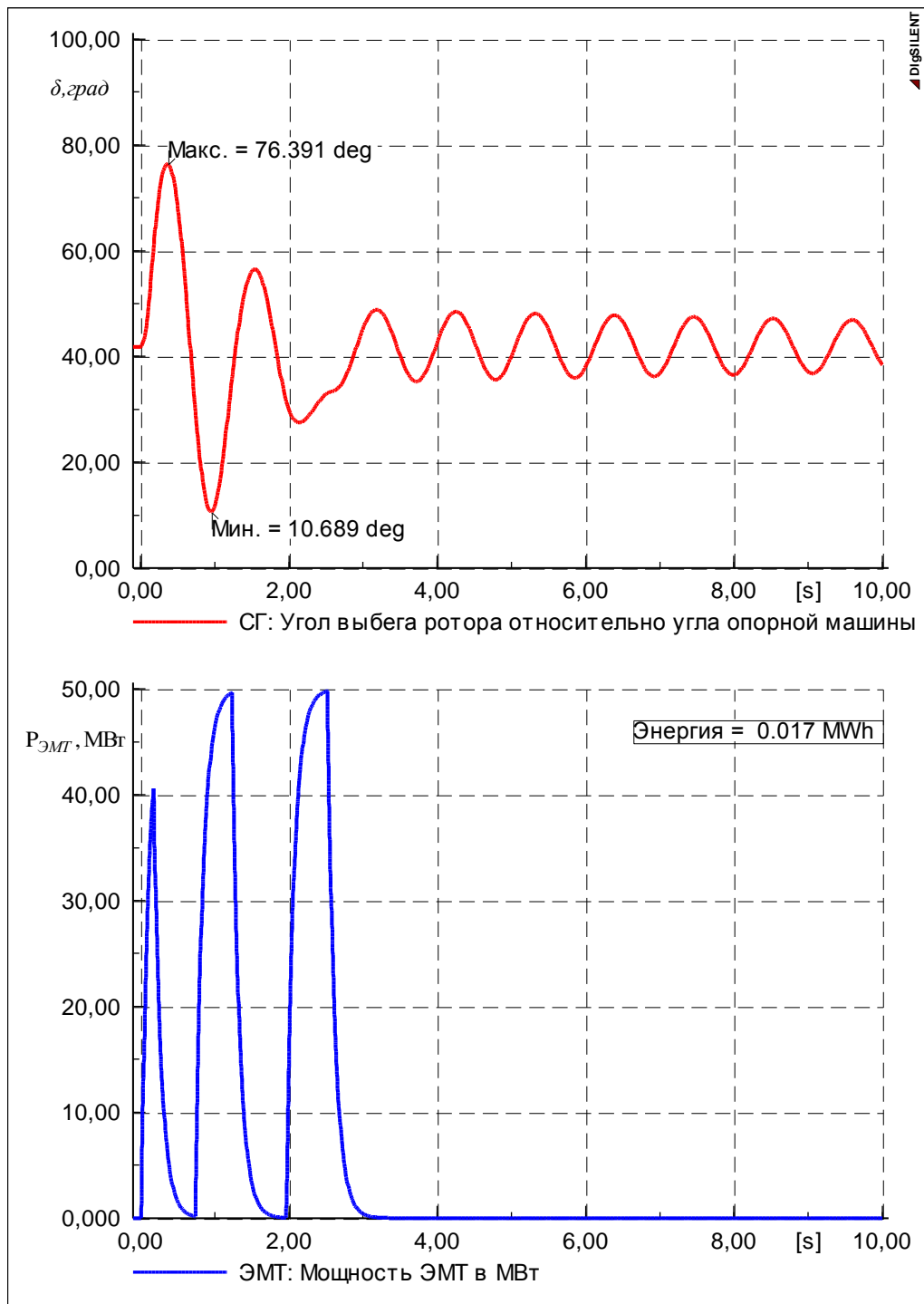


Рисунок 3.24 – Переходный процесс с установкой ЭМТ, управление по максимально допустимому отклонению электрической мощности.

7. Регулирование по максимально допустимому отклонению скорости вращения ротора генератора. Является аналогом закону управления в пункте 3.3.4, однако включение ЭМТ происходит в момент превышения отклонения скорости вращения ротора генератора некоторого значения, при этом подаётся сигнал сразу на выдачу максимальной мощности торможения ЭМТ (рисунок

3.25). Такой способ регулирования имеет более быстрое реагирование на аварийное событие, однако нет возможности регулирования мощности ЭМТ и, соответственно, при таком регулировании ЭМТ работает только короткое время после возникновения возмущения при условии превышения уставки срабатывания.

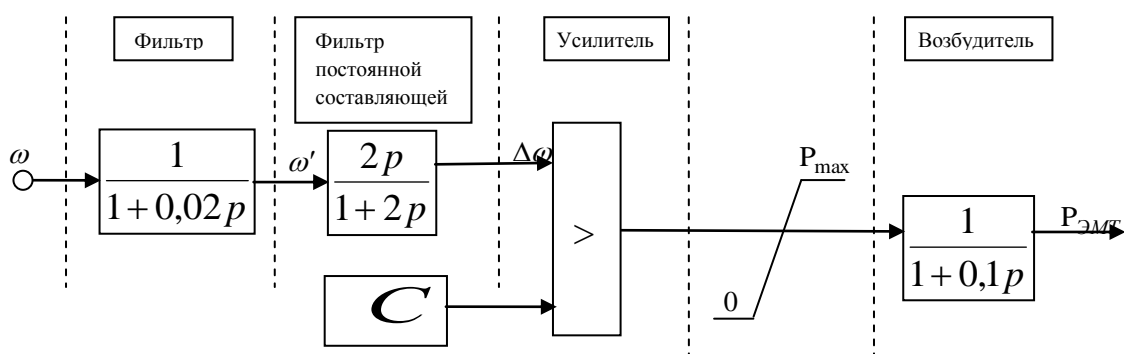


Рисунок 3.25 – Структурная схема регулятора возбуждения ЭМТ с каналом регулирования по максимально допустимому отклонению угловой скорости вращения.

Переходный процесс при таком законе регулирования приведён на рисунке 3.26. Результаты по критериям качества с различной величиной срабатывания устройства представлены в таблице 3.8. Анализ результатов показывает снижение качества переходного процесса, однако такой закон регулирования позволяет снизить время работы ЭМТ, при этом в первые циклы качаний ЭМТ будет работать с максимальной мощностью, препятствуя нарушению динамической устойчивости.

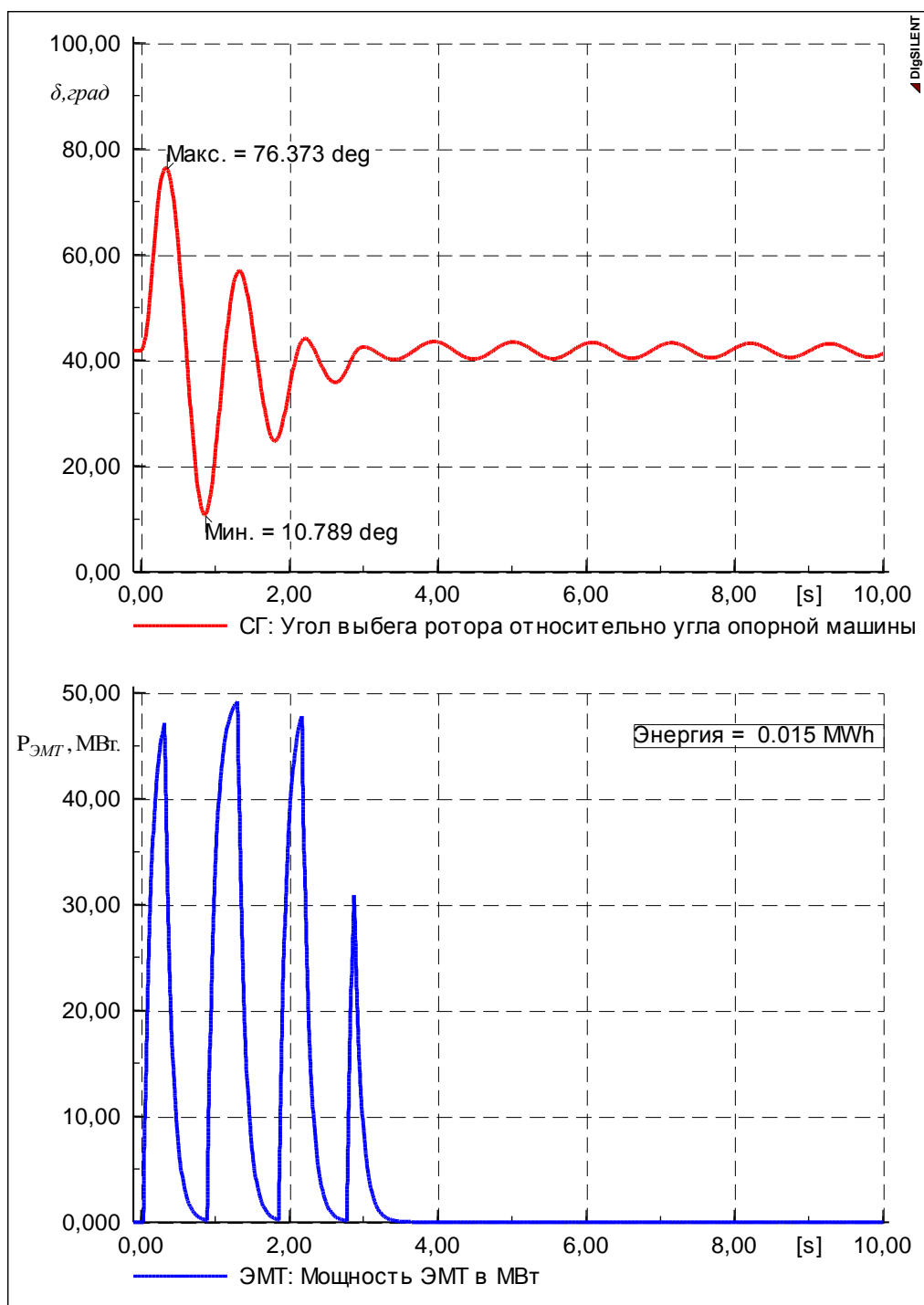


Рисунок 3.26 – Переходный процесс с установкой ЭМТ, управление по максимально допустимому отклонению угловой скорости вращения.

Таблица 3.8. Сравнение критериев качества переходного процесса при различных значениях срабатывания закона управления устройством ЭМТ по угловой скорости вращения ротора генерирующего агрегата.

Критерий	Без ЭМТ	$C=0,0005$	$C=0,001$	$C=0,0015$	$C=0,002$	$C=0,003$	$C=0,004$	$C=0,005$
$P_{эл}$	3,292	0,219	0,223	0,217	0,254	0,267	0,306	0,370
$\delta_{рот}$	5,601	0,211	0,220	0,215	0,265	0,289	0,344	0,434
$\omega_{рот}$	1,622	0,072	0,078	0,077	0,094	0,101	0,120	0,150
$\mathcal{E}_{ЭМТ}$	0,000	31,611	17,466	15,340	13,508	11,759	10,383	9,008

Такой канал регулирования возможно использовать для форсировки возбуждения ЭМТ при больших возмущениях.

8. Регулирование по отклонению электрической мощности с контролем по знаку скольжения и по отклонению частоты вращения ротора генератора. Является комбинацией законов регулирования пунктов 3.3.1 и 3.3.4. Коэффициенты усиления необходимо выбирать таким образом, чтобы сигнал на включение ЭМТ подавался только в необходимое время при скорости вращения ротора генератора большей скорости вращения ротора до возникновения возмущения. Такой регулятор обеспечивает высокое быстродействие системы при возникновении возмущения, а также позволит быстро включать ЭМТ на номинальную или близкую к этому значению мощность в необходимые моменты времени (рисунок 3.27).

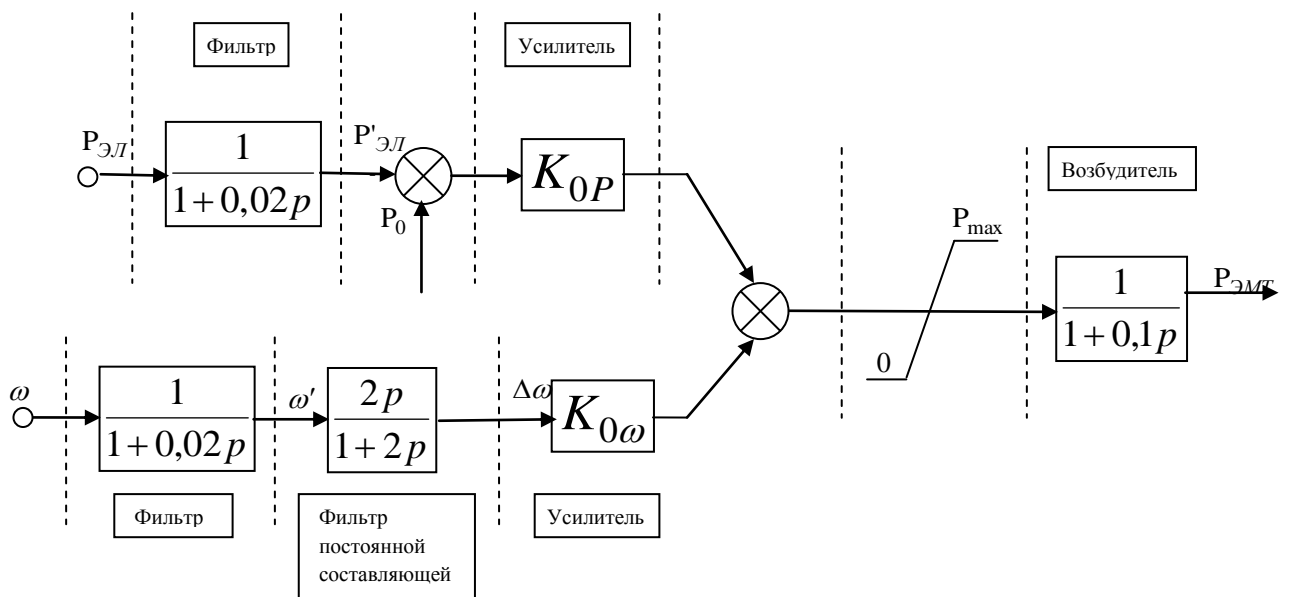


Рисунок 3.27 – Структурная схема регулятора возбуждения ЭМТ с каналом регулирования по отклонению электрической мощности с контролем по знаку скольжения и по отклонению частоты вращения ротора генератора.

Результаты расчётов показателей качества затухания переходного процесса при различных коэффициентах усиления по различным каналам регулирования показаны в таблицах 3.9-3.12.

Таблица 3.9. Сравнение критериев качества переходного процесса при различных значениях коэффициентов закона управления ЭМТ

$P_{эл}$	$K_p=20$	$K_p=40$	$K_p=60$	$K_p=80$	$K_p=100$	$K_p=120$	$K_p=150$	$K_p=200$	$K_p=300$
$K_\omega=0,1$	0,227	0,204	0,204	0,204	0,206	0,207	0,209	0,212	0,222
$K_\omega=0,3$	0,190	0,185	0,189	0,193	0,196	0,198	0,202	0,207	0,225
$K_\omega=0,5$	0,187	0,181	0,184	0,189	0,192	0,195	0,199	0,205	0,239
$K_\omega=0,7$	0,192	0,183	0,186	0,191	0,195	0,197	0,202	0,209	0,308
$K_\omega=0,9$	0,209	0,202	0,213	0,228	0,237	0,242	0,246	0,259	0,352

Таблица 3.10. Сравнение критериев качества переходного процесса при различных значениях коэффициентов закона управления ЭМТ

$\delta_{рот}$	$K_p=20$	$K_p=40$	$K_p=60$	$K_p=80$	$K_p=100$	$K_p=120$	$K_p=150$	$K_p=200$	$K_p=300$
$K_\omega=0,1$	0,245	0,203	0,199	0,199	0,198	0,199	0,199	0,202	0,213
$K_\omega=0,3$	0,191	0,178	0,179	0,183	0,185	0,187	0,191	0,196	0,217
$K_\omega=0,5$	0,185	0,172	0,174	0,177	0,180	0,183	0,187	0,193	0,232
$K_\omega=0,7$	0,189	0,176	0,176	0,180	0,183	0,186	0,190	0,197	0,311
$K_\omega=0,9$	0,207	0,197	0,208	0,223	0,231	0,237	0,241	0,255	0,361

Таблица 3.11. Сравнение критериев качества переходного процесса при различных значениях коэффициентов закона управления ЭМТ

$\omega_{рот}$	$K_p=20$	$K_p=40$	$K_p=60$	$K_p=80$	$K_p=100$	$K_p=120$	$K_p=150$	$K_p=200$	$K_p=300$
$K_\omega=0,1$	0,082	0,071	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069
$K_\omega=0,3$	0,059	0,058	0,060	0,062	0,063	0,064	0,065	0,066	0,067
$K_\omega=0,5$	0,054	0,053	0,055	0,057	0,059	0,060	0,061	0,063	0,065
$K_\omega=0,7$	0,053	0,051	0,053	0,054	0,056	0,057	0,059	0,061	0,065
$K_\omega=0,9$	0,052	0,051	0,051	0,052	0,054	0,055	0,057	0,059	0,064

Таблица 3.12. Сравнение критериев качества переходного процесса при различных значениях коэффициентов закона управления ЭМТ

$\mathcal{E}_{ЭМТ}$	$K_p=20$	$K_p=40$	$K_p=60$	$K_p=80$	$K_p=100$	$K_p=120$	$K_p=150$	$K_p=200$	$K_p=300$
$K_\omega=0,1$	11,735	13,921	15,461	15,461	17,888	18,939	20,554	23,655	37,122
$K_\omega=0,3$	11,013	12,896	14,945	16,546	17,876	19,104	20,986	24,542	44,239
$K_\omega=0,5$	27,817	13,493	16,330	18,220	19,530	20,815	22,768	26,771	62,794
$K_\omega=0,7$	14,249	16,572	20,425	23,515	25,180	26,376	28,786	32,774	112,416
$K_\omega=0,9$	27,358	31,830	41,253	49,422	54,127	57,627	60,840	68,286	131,115

Переходный процесс при таком законе управления приведён на рисунке 3.28. Анализ результатов показывает, что варьированием параметров закона управления можно добиться наилучшего качества регулирования по сравнению с описанными ранее законами управления ЭМТ. Канал регулирования по отклонению электрической мощности позволяет добиться высокого быстродействия. В то же время канал регулирования по угловой скорости вращения позволяет устранить недостатки недорегулирования при ускорении

ротора и перерегулирования при торможении. Кроме того, работа ЭМТ при описанном законе управления позволила снизить величину максимального и минимального угла выбега генератора.

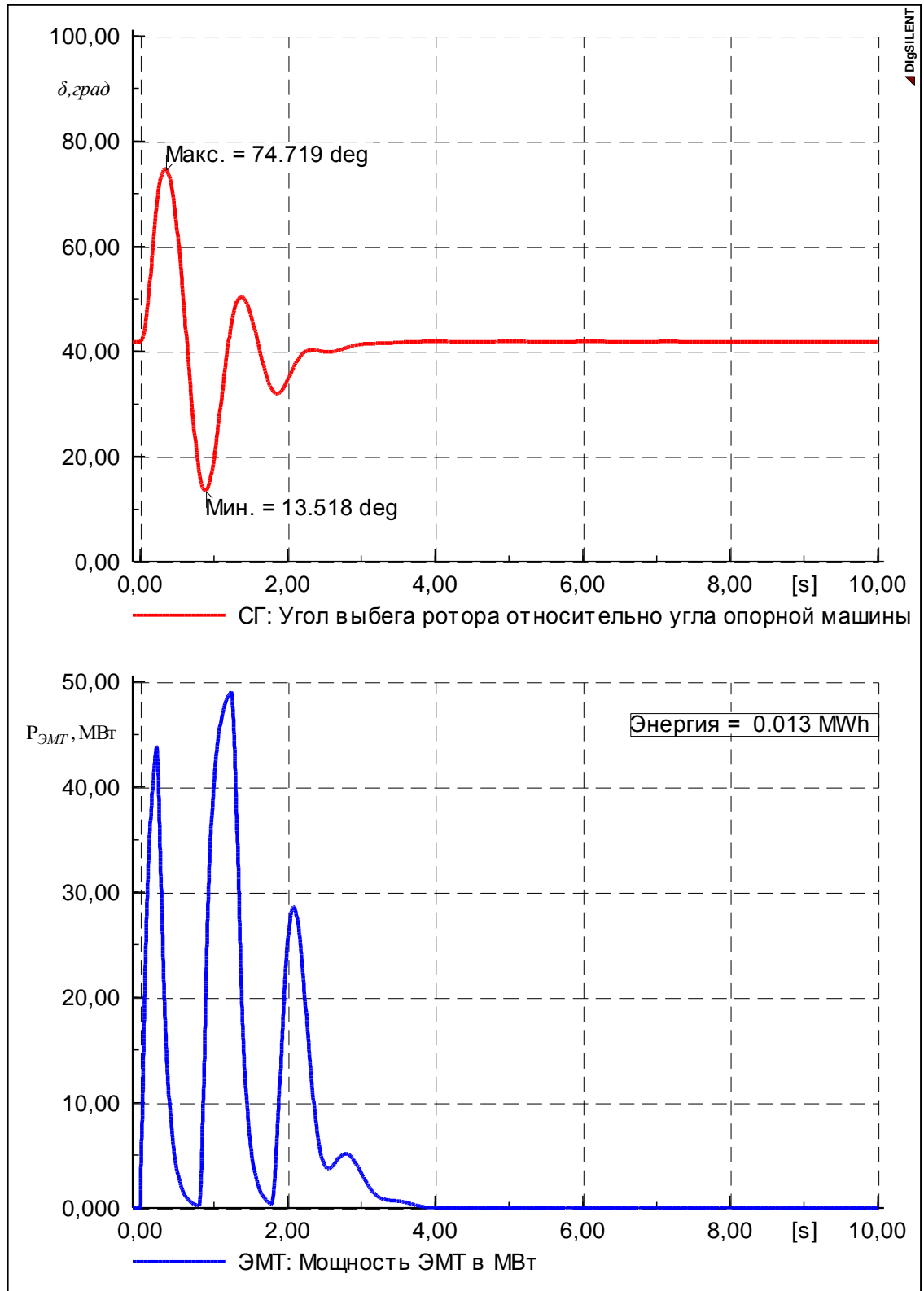


Рисунок 3.28 – Переходный процесс с установкой ЭМТ, управление по отклонению электрической мощности с контролем по знаку скольжения и по отклонению частоты вращения ротора генератора.

9. Регулирование по отклонению частоты вращения ротора генератора на основе ПИД-регулятора с каналом регулирования по отклонению электрической мощности. При рассмотрении описанных выше видов регулирования отметим, что ввиду инерционности звеньев, при отключении ЭМТ в момент перехода скольжения ротора генератора в область отрицательных значений, возможно перерегулирование для канала регулирования по отклонению электрической мощности. Поэтому, чтобы не допустить перерегулирования, предлагается ввести коррекцию на включение ЭМТ при положительных скольжениях. Ввиду того, что ЭМТ может также эффективно демпфировать колебания, предлагается ввести ПИД-регулятор по отклонению скорости вращения ротора генератора. Канал производной отклонения частоты вращения будет позволять максимально быстро реагировать на возмущение, а канал интегрирования будет накапливать ошибку и возвращать режим к установившемуся значению послеаварийного режима. Кроме того, учитывая недостатки и достоинства канала регулирования по отклонению электрической мощности, выберем данный канал в качестве форсировки. Таким образом будет достигаться мгновенное срабатывание ЭМТ при возникновении возмущения. Закон управления представлен на рисунке 3.29. Представленный закон управления обладает широким набором настроечных параметров, тем самым обеспечивая гибкость управления. Варьируя коэффициенты усиления, а также уставку срабатывания форсировки можно добиться необходимого качества переходного процесса. Постоянные времени дифференцирующего и интегрирующего звеньев приняты в соответствии с аналогичными звеньями АРВ-3М [33-34].

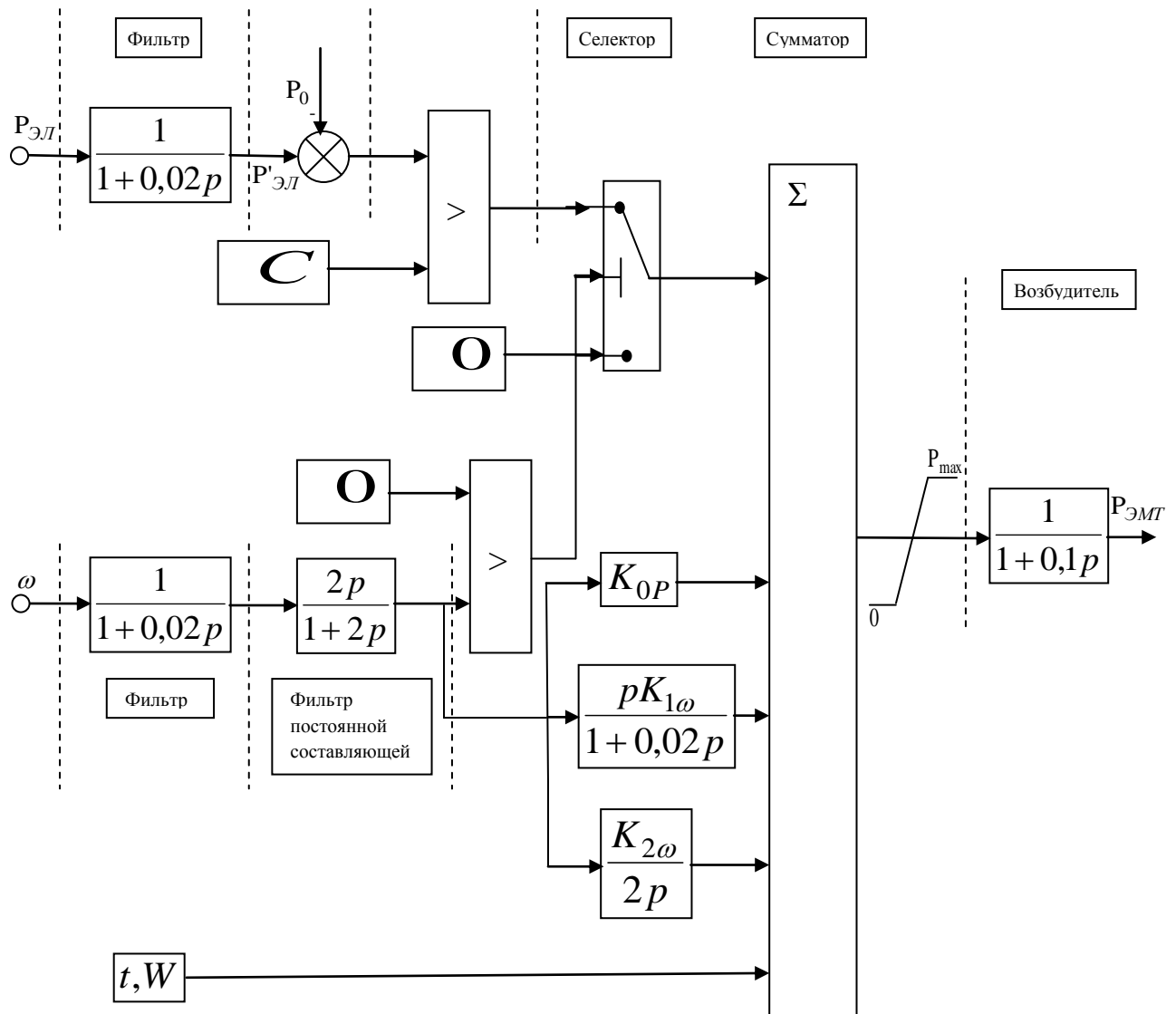


Рисунок 3.29 – Структурная схема регулятора возбуждения ЭМТ с каналом регулирования по отклонению частоты вращения ротора генератора на основе ПИД-регулятора и форсировкой

Результаты по критериям качества для выбранного закона управления: $J_1=0,175$; $J_2=0,164$; $J_3=0,053$; $J_4=11,542$. Анализ результатов показывает значительное улучшение качества переходного процесса по сравнению с предшествующими законами регулирования. Также наблюдается уменьшение максимального угла выбега генератора в первом цикле качаний, что связано с более быстрым срабатыванием устройства ЭМТ.

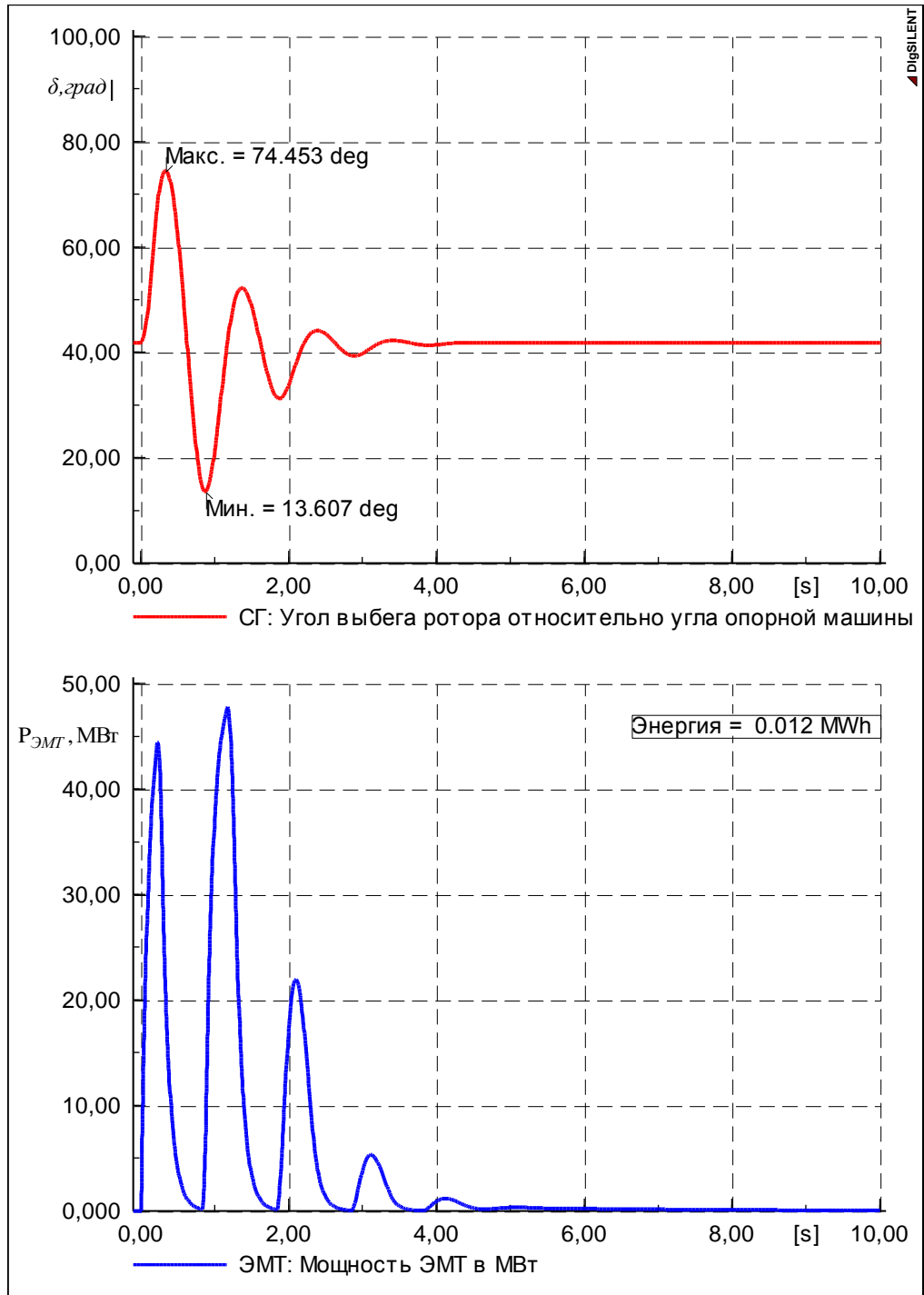


Рисунок 3.30 – Переходный процесс с установкой ЭМТ, управление по отклонению частоты вращения ротора генератора на основе ПИД-регулятора с форсировкой

Сравнительная таблица значений критериев качества затухания переходного процесса описанных законов управления представлена в таблице 3.13. Анализ таблицы показывает, что наименьшие показатели критериев качества достигаются при законе управления по отклонению частоты вращения ротора генератора на

основе ПИД-регулятора с форсировкой. Таким образом, данный закон управления ЭМТ – наиболее вероятный кандидат на «квазиоптимальность».

Таблица 3.13. Сравнительная таблица значений критериев качества затухания переходного процесса выбранных законов регулирования.

№ вар-та	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{эл}$	0,241	0,199	0,199	0,213	0,218	0,291	0,217	0,181	0,175
$\delta_{рот}$	0,243	0,207	0,207	0,206	0,218	0,309	0,215	0,172	0,164
$\omega_{рот}$	0,062	0,061	0,062	0,072	0,078	0,084	0,077	0,053	0,053
$\Theta_{ЭМТ}$	17,09	12,486	9,261	20,559	15,682	16,866	15,340	13,493	11,542

3.4. Сопоставление синтезированных законов управления с оптимальным

Сопоставим результаты расчётов оптимального управления (параграф 3.1), синтезированного закона управления, а также выбранного инженерным способом закона регулирования (рисунки 3.31-3.32). Анализ показывает, что из двух законов регулирования выбранный инженерным способом закон регулирования наиболее близок к оптимальному и может быть выбран в качестве «квазиоптимального» закона управления. Различие объясняется особенностью расчёта оптимального закона регулирования: в начальный момент времени после отключения короткого замыкания ЭМТ работает на номинальную мощность, тогда как при выбранном законе регулирования ЭМТ ввиду инерционности не успевает набрать полную мощность.

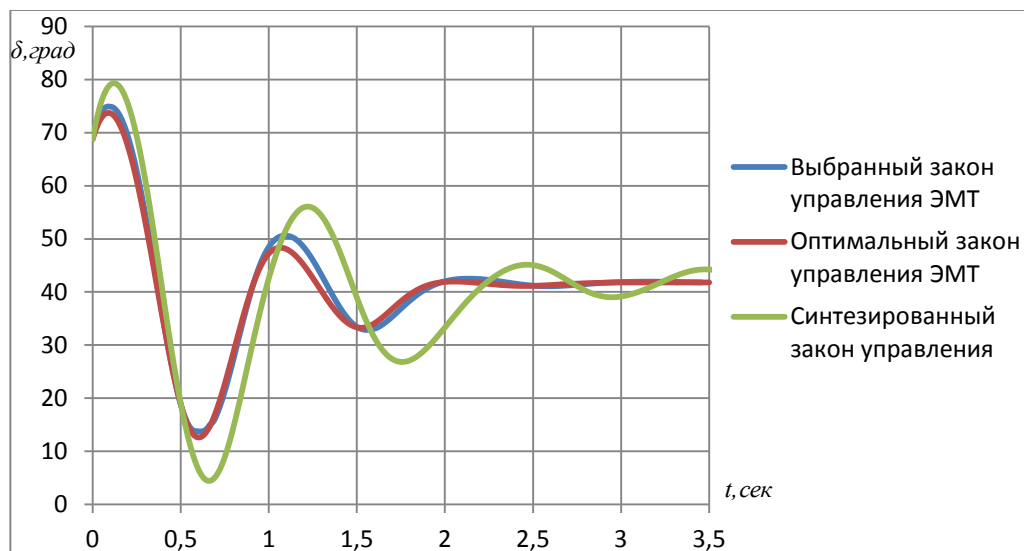
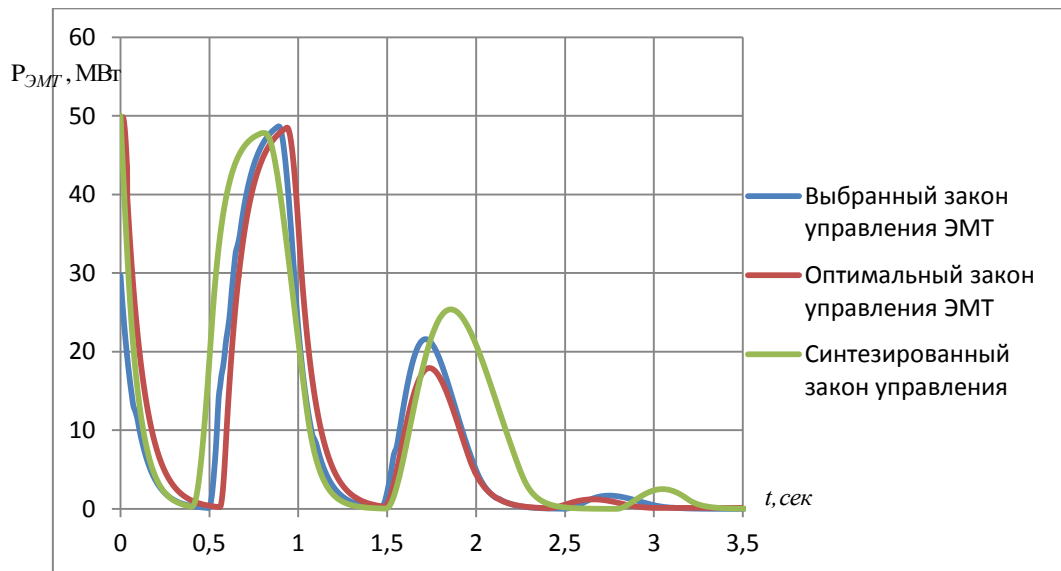


Рисунок 3.31 – Изменение угла ротора генератора в град.



Следует отметить, что энергия, выделяемая в ЭМТ и необходимая для улучшения условий динамической устойчивости, соответствует значению, равному 11 кВт·ч при суммарной выдаче мощности станции равной 300 МВт. Таким образом, ЭМТ позволяет посредством незначительных потерь электроэнергии обеспечить значительное улучшение условий динамической устойчивости и качества переходных процессов, возникающих в ЭЭС.

Выводы:

1. Нелинейность функции мощности (момента) торможения ЭМТ не даёт возможности определения оптимального управления аналитическими методами. Принцип максимума Понтрягина позволяет решать задачи оптимального управления в условиях резкой нелинейности.
2. Рассчитанные по разработанной методике оптимальные траектории управления мощностью ЭМТ для различных значений весовых коэффициентов критерия оптимальности могут использоваться как эталон при выборе «квазиоптимальных» регуляторов и законов управления.
3. Важным параметром, влияющим на результаты вычислений, является весовой коэффициент k_u , который определяет максимальную мощность торможения и время работы ЭМТ. От выбора k_u сильно зависит сходимость итерационного процесса при нахождении оптимальных траекторий работы ЭМТ.
4. Управление с каналом регулирования по отклонению электрической мощности обладает существенным недостатком – перерегулирование в течение переходного процесса, для устранения которого необходимо вводить контроль по знаку скольжения.
5. При сравнении выбранных законов регулирования можно выделить регулирование на основе ПИД-регулятора по отклонению скорости вращения ротора генератора и форсировкой возбуждения по сигналу отклонения электрической мощности. Такой регулятор в рассмотренной тестовой схеме имеет наилучшие показатели качества регулирования, а также наиболее близок к рассмотренному в главе оптимальному управлению мощностью ЭМТ и может быть принят в качестве квазиоптимального.
6. Так как в ЭЭС постоянно происходят непрерывные колебания, связанные с непрерывным изменением нагрузки, то необходимо отстроиться от этих

изменений во избежание ложного срабатывания устройства ЭМТ и ввести ограничение по величине отклонения. Также отстройка даст положительный эффект с учётом того, что ввиду инерционности звеньев, при отключении ЭМТ в момент перехода скольжения ротора генератора в область отрицательных значений, возможно перерегулирование для канала регулирования по отклонению электрической мощности.

7. Регулируя ширину зоны нечувствительности срабатывания ЭМТ, можно изменять потребление ЭЭ устройством ЭМТ и точность поддержания электроэнергетического режима.
8. Необходимо вводить каналы с контролем по времени работы и потребляемой энергии ЭМТ, чтобы избежать перерегулирования и нагрева устройства. Таким образом, устройство ЭМТ будет работать некоторое время, достаточное для сохранения динамической устойчивости системы, а также позволяющее избежать излишнего перерегулирования и нагрева устройства
9. ЭМТ обеспечивает значительное улучшение условий динамической устойчивости и качества переходных процессов, возникающих в ЭЭС при малом расходе электроэнергии.

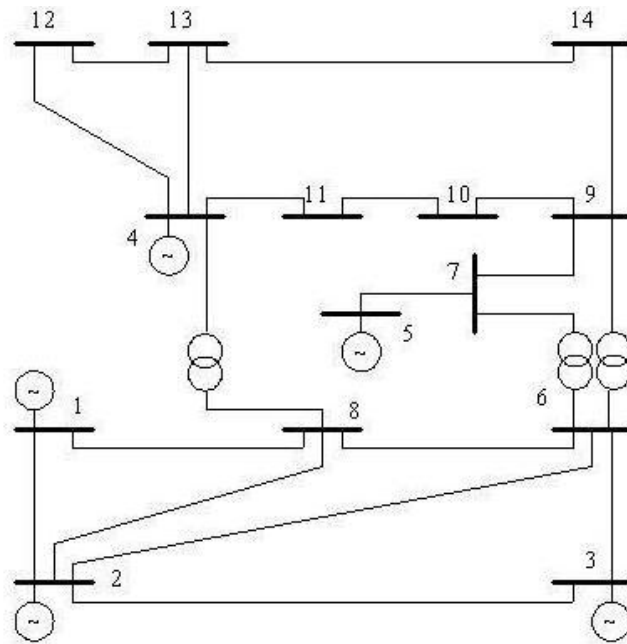
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЭМТ В МНОГОМАШИННЫХ СХЕМАХ.

В данной главе проводилось исследование эффективности применения выбранного «квазиоптимального» закона управления ЭМТ для улучшения условий динамической устойчивости в сложных ЭЭС.

4.1. Исследование в схеме IEEE

Исследование проводилось на тестовой 14-узловой 5-и генераторной схеме IEEE (рисунок 4.1). Параметры схемы замещения показаны в Приложении Б.

Базисным балансирующим узлом выбран узел №1. Для установки ЭМТ выбран генератор №3. Для простоты расчётов действие регуляторов скорости вращения генераторов не учитывается. Генерирующие агрегаты принимались с различными постоянными инерции: генератор 5 принимается с характерной для газопоршневых агрегатов постоянной инерции (2,6 с); генератор 4 – для дизельных генераторов (4 с); генераторы 3 и 2 – для ТЭЦ (6-8 с). На всех генерирующих агрегатах тестовой схемы установлены автоматические регуляторы возбуждения сильного действия с каналами регулирования по отклонению напряжения, частоты, а также их первых производных (рисунок 3.6), где k_{0u} , k_{1u} , k_{0f} , k_{1f} , T_u , T_ϕ , T_D , T_f , T – коэффициенты усиления и постоянные времени соответствующих каналов регулирования. ЭМТ представлен «квазиоптимальным» законом управления, выбранным в третьей главе.

Рисунок 4.1 – 14-ти узловая тестовая схема *IEEE*

На различных шинах схемы проводились возмущения – трёхфазные короткие замыкания длительностью 0,2 сек. Составляющие схему генерирующие агрегаты проверялись на динамическую устойчивость. Результаты сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1. Исследование динамической устойчивости тестовой энергосистемы.

Возмущение в узле	Устойчивость генераторов	Выпавшие генераторы
2	Устойчиво	—
3	Не устойчиво	Г-3,5(рисунок 4.2)
4	Устойчиво	—
5	Не устойчиво	Г-5(рисунок 4.3)
6	Устойчиво	—
7	Не устойчиво	Г-5
8	Устойчиво	—
9	Устойчиво	—
10	Устойчиво	—
11	Устойчиво	—
12	Устойчиво	—
13	Устойчиво	—
14	Устойчиво	—

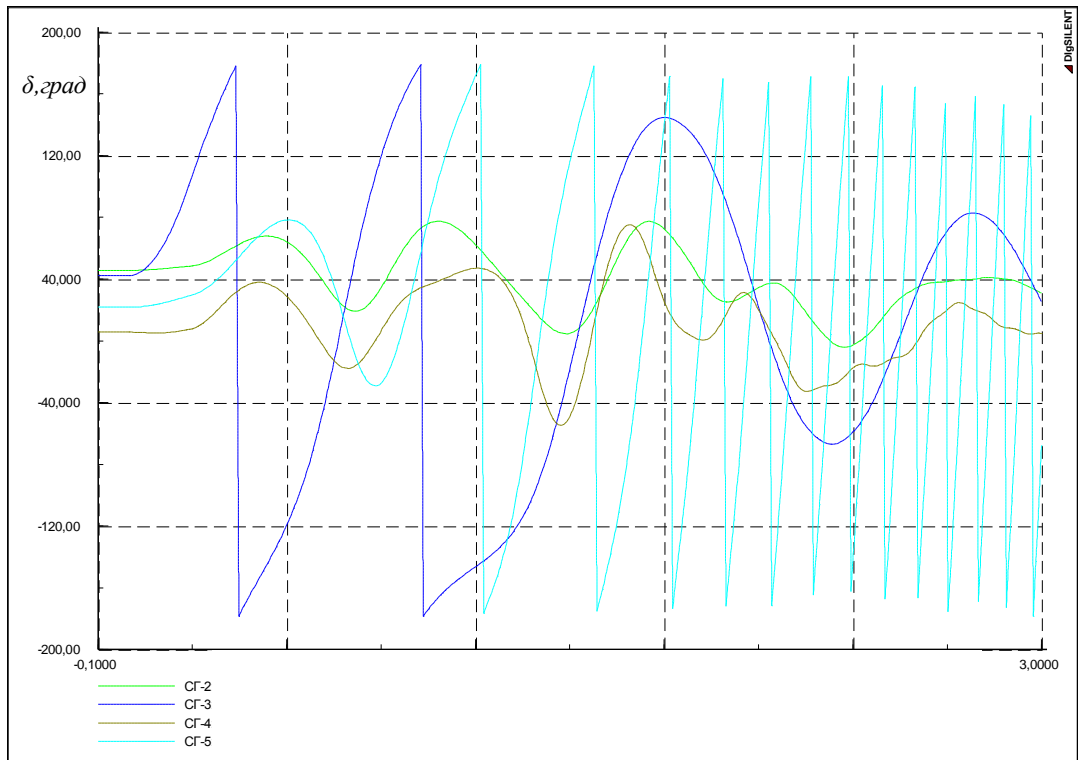


Рисунок 4.2 – Трёхфазное короткое замыкание в узле 3. Углы ротора генераторов по отношению к углу опорной машины в град.

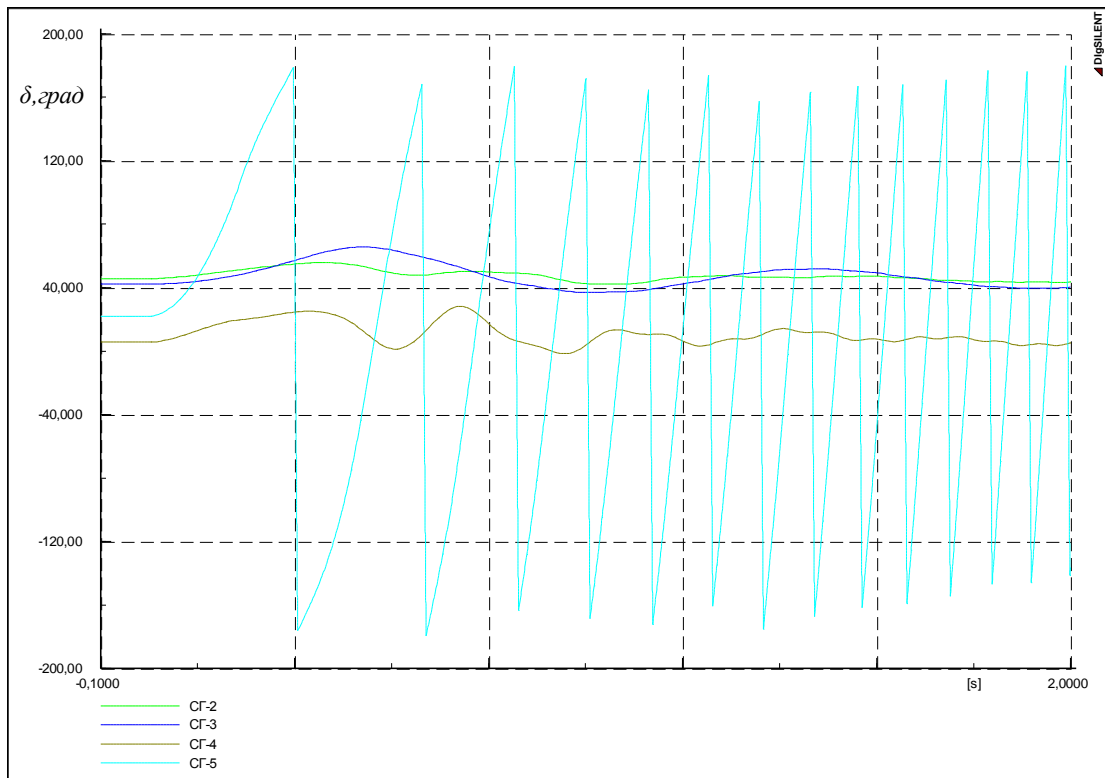


Рисунок 4.3 – Трёхфазное короткое замыкание в узле 5. Углы ротора генераторов по отношению к углу опорной машины в град.

Как видно, из всего состава генерирующего оборудования выпадают из синхронизма генераторы 3 и 5. При этом вероятность выпадения генератора 5

наиболее высока. Это связано, прежде всего, с малой постоянной инерции самого агрегата. Для устранения нарушения устойчивости генератора 5 была смоделирована установка ЭМТ с законом управления, выбранным в третьей главе. На рисунке 4.4-4.5 изображен переходный процесс с учётом работы ЭМТ. ЭМТ предотвращает нарушение устойчивости «легкого» агрегата и нарушения устойчивости в узле 5 не наблюдается.

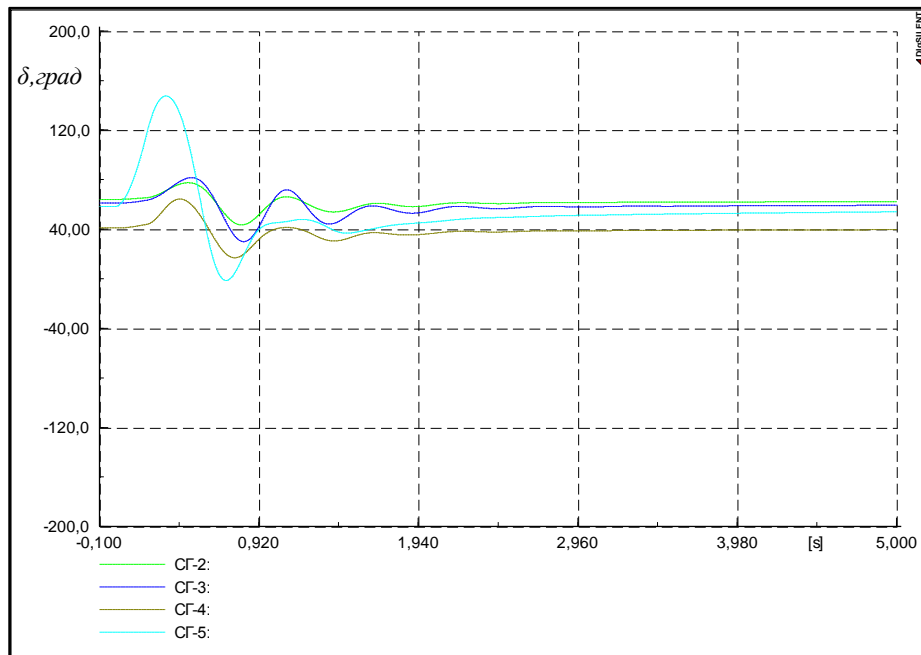


Рисунок 4.4 – Трёхфазное короткое замыкание в узле 5. ЭМТ в узле 5 включен. Углы ротора генераторов по отношению к углу опорной машины в град.

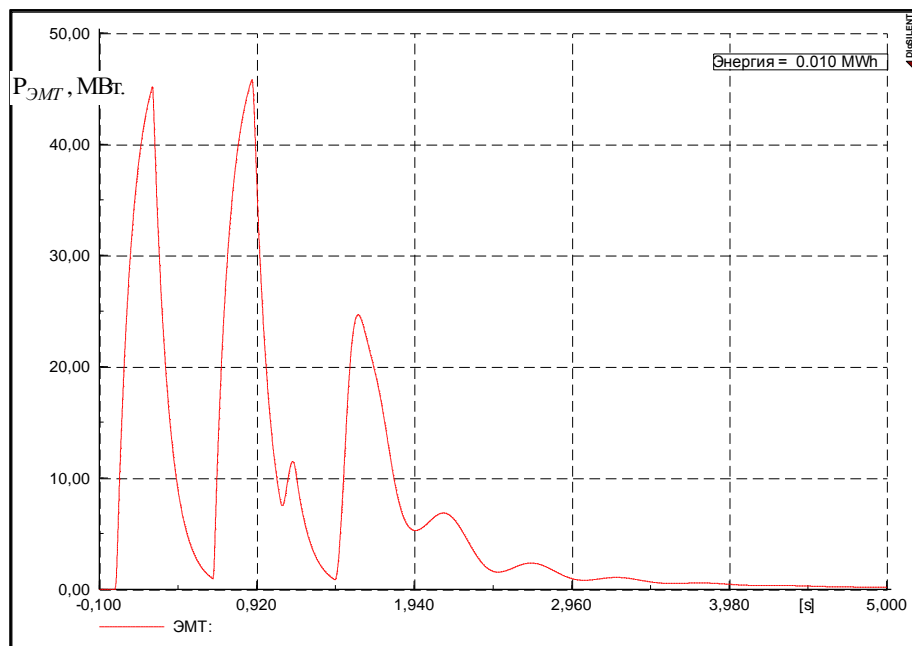


Рисунок 4.5 – Трёхфазное короткое замыкание в узле 5. ЭМТ в узле 5 включен. Мощность ЭМТ в МВт.

Из результатов расчёта видно, что нарушения динамической устойчивости не наблюдается. Для демпфирования колебаний и возвращению работы энергосистемы к установившемуся режиму работы потребовалось 10 кВт*ч потраченной энергии торможения.

Как видно из результатов, ЭМТ не достигает своей номинальной мощности, что связано прежде всего с малой постоянной инерции генерирующего агрегата, а также наличием постоянной времени обмотки возбуждения ЭМТ. Для более быстрого реагирования и полного использования возможностей ЭМТ, как было показано в главе 2, можно увеличить скорость возрастания тока возбуждения в обмотке возбуждения ЭМТ. Покажем, как повлияет на устойчивость ЭМТ, установленный на третий генератор. Результаты приведены на рисунках 4.6-4.7.

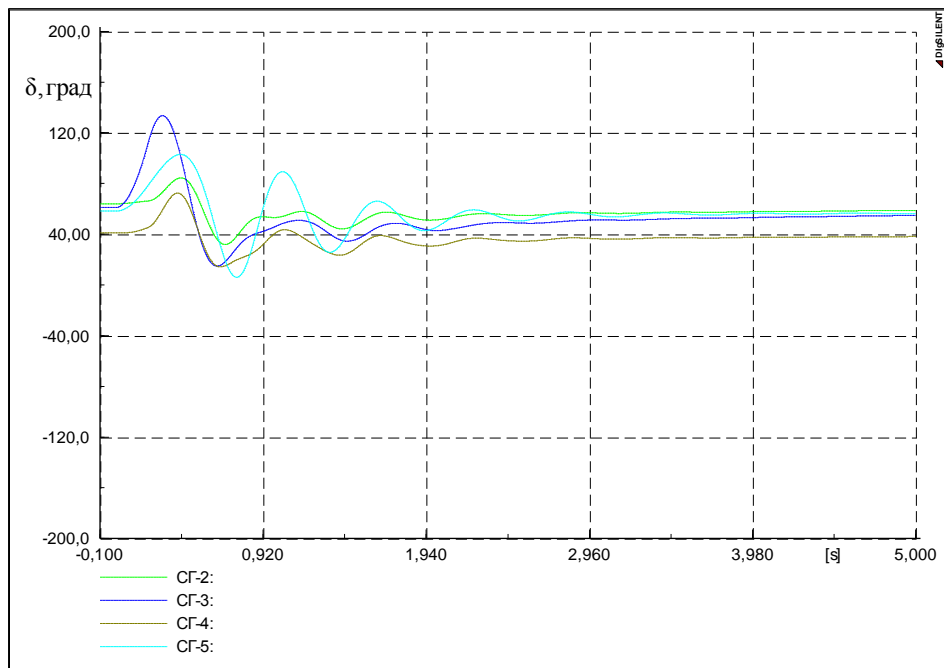


Рисунок 4.6 -Трёхфазное короткое замыкание в узле 3. ЭМТ в узле 3 включен. Углы ротора генераторов по отношению к углу опорной машины в град.

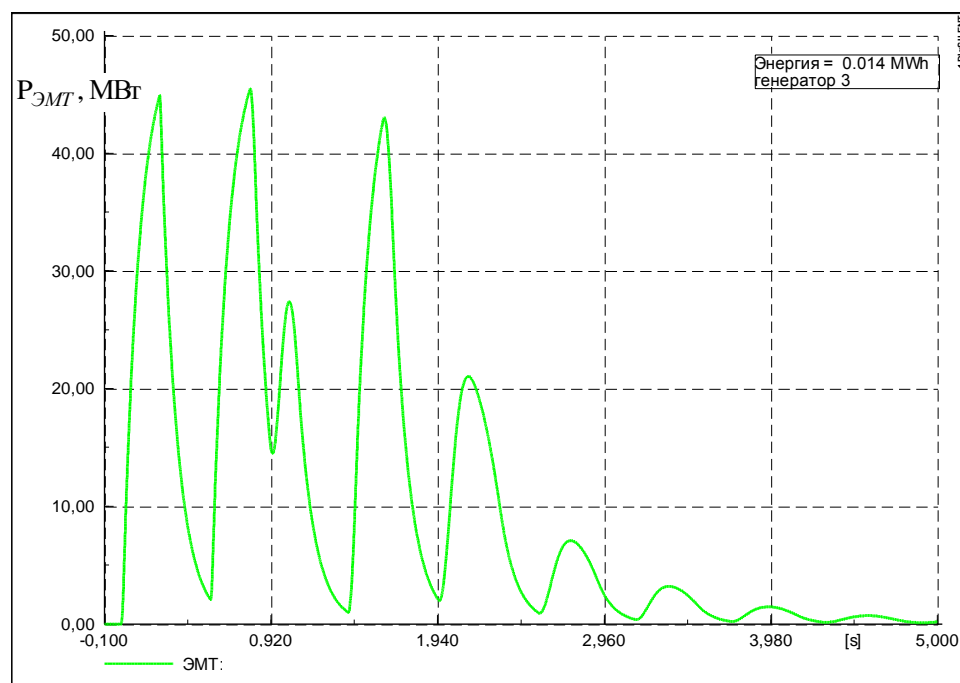


Рисунок 4.7 -Трёхфазное короткое замыкание в узле 3. ЭМТ в узле 3 включен.
Мощность ЭМТ В МВт

Из результатов расчёта видно, что нарушения динамической устойчивости генераторов 3 и 5 не наблюдается. Потребление ЭМТ в течение переходного процесса при этом составило 14 кВт·ч.

Таким образом, установка ЭМТ на генераторы тестовой схемы ЭМТ не только предотвращает нарушение динамической устойчивости, но также способствует быстрейшему затуханию переходного процесса.

4.2. Исследование возможностей ЭМТ на примере Тюменской энергосистемы

Проведём исследование способности ЭМТ улучшать условия динамической устойчивости на примере Тюменской энергосистемы. Энергосистема выбрана, прежде всего, в связи с различным составом генерирующего оборудования: от крупных электростанций (Рефтинская ГРЭС, Сургутская ГРЭС-1,2 и др.) до станций малой генерации (ГТЭС Надым, ПЛЭС Морошка и др.)

Исследования проводились на цифровой динамической модели с учетом влияния ОЭС Центра, ОЭС Северо-Запада, ОЭС Средней Волги, ОЭС Сибири и ЕЭС Казахстана, сформированной с помощью программного комплекса DIgSILENT PowerFactory 15.0 на базе моделей сети 2012 года. Для анализа

переходных процессов все генераторы в расчётной схеме представлены подробной математической моделью с системами возбуждения, АРВ и регуляторами турбин. В качестве расчетных в работе рассмотрены режимы соответствующие уровню нагрузок зимнего максимума 2012 года.

Вся отсутствующая и недостающая информация о динамических свойствах и параметрах моделей генераторов, турбин и блоков автоматики исследуемой энергосистемы принималась на основании экспертных оценок.

Состав и параметры генерирующего оборудования Тюменской энергосистемы представлен в Приложении В. Типы систем возбуждения и АРВ генераторов, учтённых в цифровой модели Тюменской энергосистемы представлены в Приложении Г.

Количественный состав расчетной схемы на 2012 год приведен в таблице 4.2. Схема содержит 1038 узлов, из которых 235 – узлы генерации, 1795 ветвей, в том числе 1299 линий электропередачи и 496 трансформаторов и автотрансформаторов. В качестве базисного и балансирующего (б. у.) приняты шины 500 кВ Жигулевской ГЭС.

В исследованиях динамической устойчивости нагрузка подстанций рассматриваемого района смоделирована неизменной мощностью.

Таблица 4.2. Количественные характеристики расчетной схемы 2012 года.

Состав	Всего	Отключено
Узлы	1038	-
В том числе:		
Генераторные узлы	235+1 б.у.	4
Ветви (всего)	1795	69
В том числе:		
Линии электропередачи	1299	64
Трансформаторы	496	5

В расчётной схеме было выделено контролируемое сечение между Тюменской энергосистемой и ОЭС Урала, представленное в таблице 4.3 и на


рисунке 4.8. Основными источниками электроэнергии в рассматриваемой схеме являются крупные электростанции, такие как: Рефтинская ГРЭС, Сургутская ГРЭС-1, Сургутская ГРЭС-2, Тобольская ТЭЦ, Няганская ГРЭС, Нижневартовская ГРЭС.

Таблица 4.3. Перечень линий, входящих в состав контролируемых сечений
Тюменская энергосистема – ОЭС Урала.

№ п.п.	Класс напряжения	Название линии
1	500 кВ	Нелым-Тюмень
2	500 кВ	Иртыш-Беркут
3	500 кВ	Тюмень-Луговая

В работе проводилась серия расчётов для возмущений в различных точках рассматриваемой энергосистемы (рисунок 4.8):

1. Трёхфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Уренгойская ГРЭС – Уренгой (вблизи шин станции Уренгойская ГРЭС).
2. Трёхфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Уренгойская ГРЭС – Тарко-Сале (вблизи шин станции Уренгойская ГРЭС) с успешным АПВ.
3. Трёхфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Кирьяновская – Сибирская (вблизи шин станции Нижневартовская ГРЭС).
4. Трёхфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Няганская ГРЭС – КГП3220 (вблизи шин станции Няганская ГРЭС) с неуспешным АПВ.
5. Двухфазное короткое замыкание на землю на ВЛ 500 кВ Тюмень – Луговая (на одной из ВЛ, принадлежащей межсистемной связи) с успешным АПВ.

 Точки приложения возмущений в рассматриваемой энергосистеме

A Контролируемое сечение

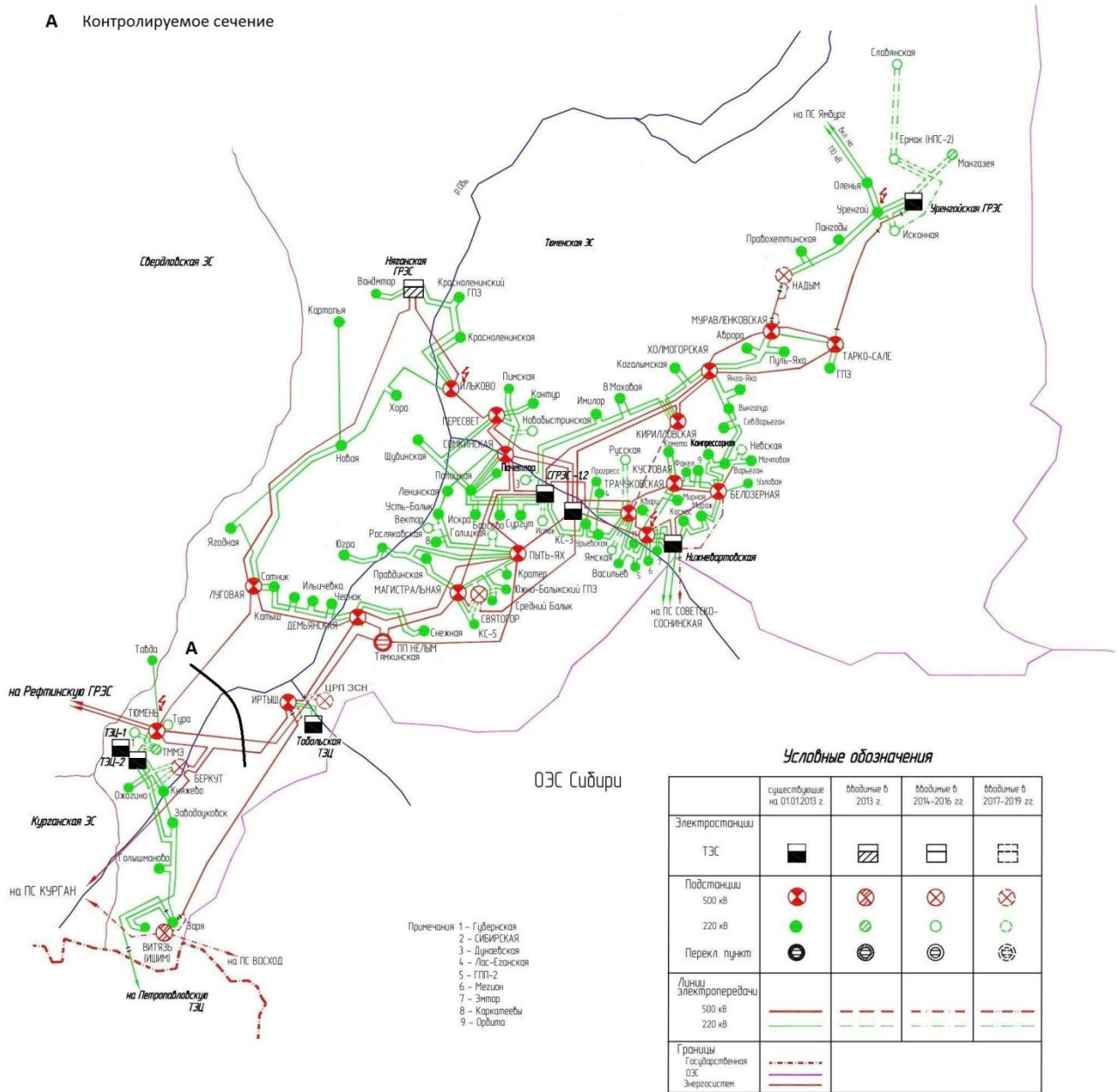


Рисунок 4.8 – Карта-схема Тюменской энергосистемы. Состав контролируемого сечения Тюменская энергосистема-ОЭС Урала

Возмущения выбирались вблизи шин различных электростанций, обладающих различным составом оборудования, различными массогабаритными показателями. На рисунках представлены результаты расчётов переходных процессов – зависимости углов ротора генераторов по отношению к углу опорной машины.

1.Трёхфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Уренгойская ГРЭС – Уренгой (вблизи шин станции Уренгойская ГРЭС). Установленная мощность энергоблока Уренгойской ГРЭС составляет 500 МВт. Энергоблок состоит из одной ПГУ и двух ГТУ. Состав и параметры оборудования представлены в Приложении В. Результаты расчётов показывают, что для такого возмущения характерны слабозатухающие низкочастотные колебания (рисунок 4.9).

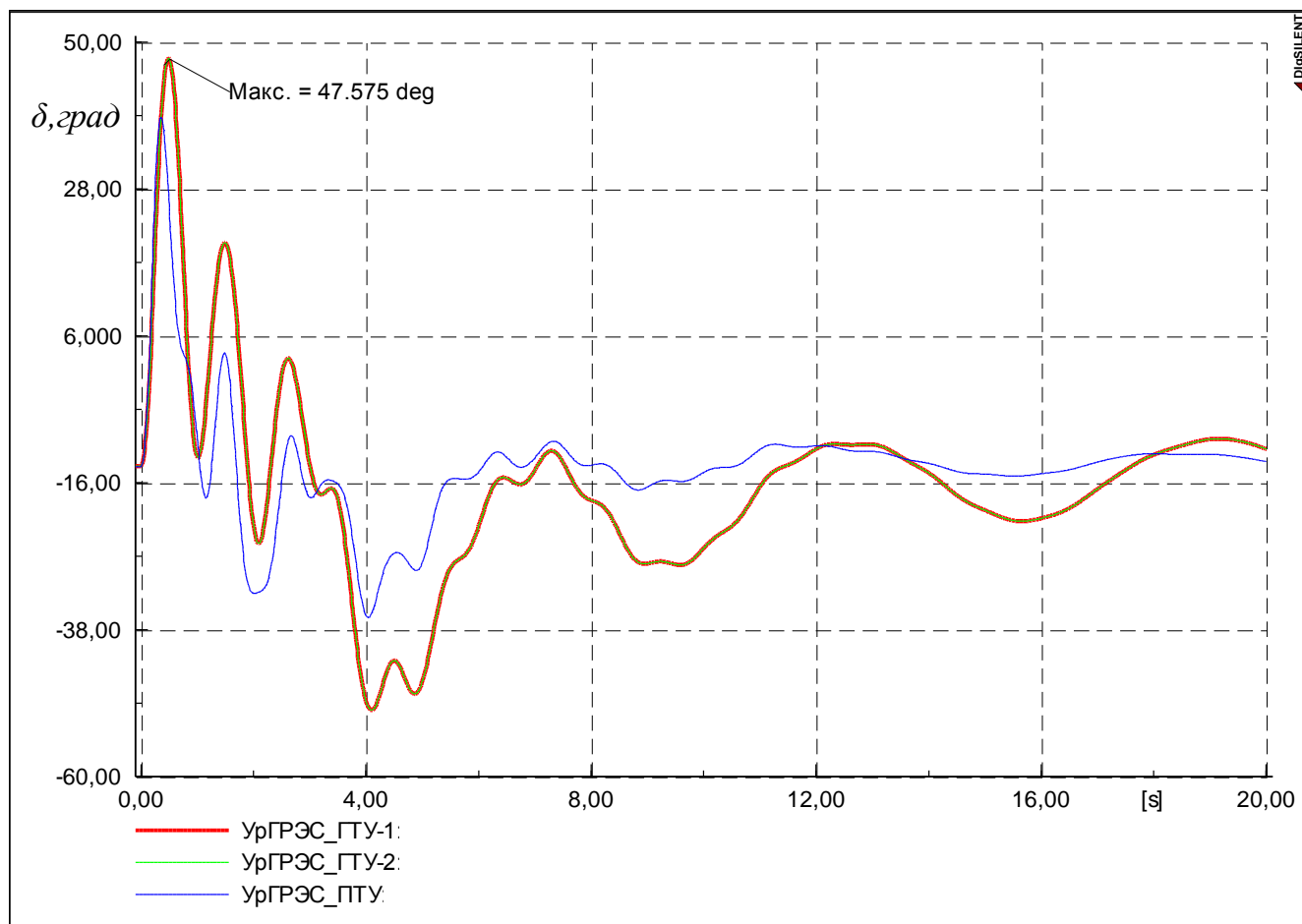


Рисунок 4.9 – Трёхфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Уренгойская ГРЭС – Уренгой (вблизи шин станции Уренгойская ГРЭС). ЭМТ отключены. Углы ротора генераторов по отношению к углу опорной машины в град.

Результаты переходного процесса при включении ЭМТ с выбранным законом регулирования на генераторах ГТУ Уренгойской ГРЭС показаны на рисунке 4.10. Как видно, ЭМТ позволил эффективно демпфировать такие слабозатухающие колебания. Кроме того заметно снизился уровень максимального отклонения углов ротора генерирующих агрегатов. Суммарные

потери электрической энергии на торможение в течение переходного процесса составили 32 кВт*ч.

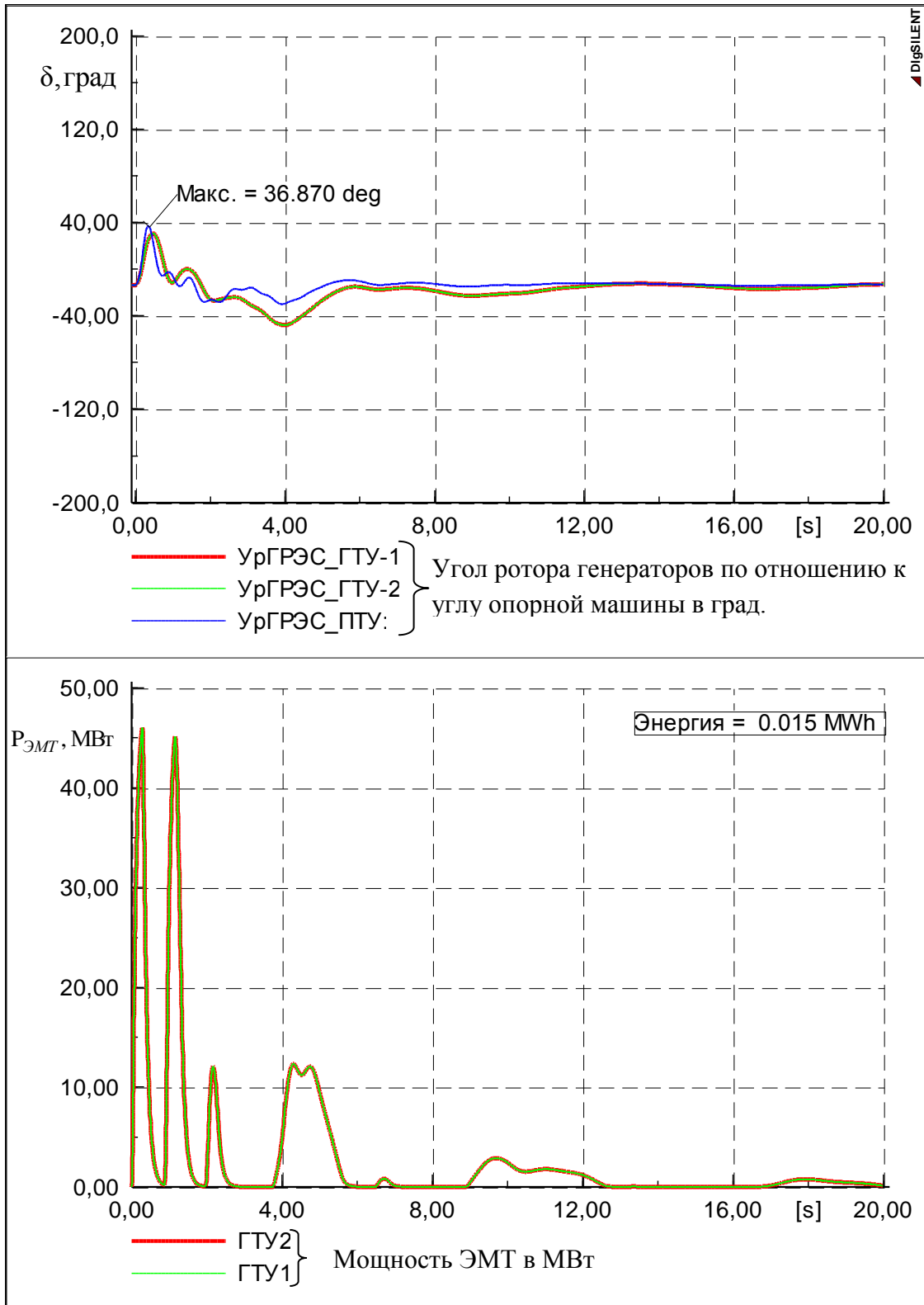


Рисунок 4.10 – Трёхфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Уренгойская ГРЭС – Уренгой (вблизи шин станции Уренгойская ГРЭС). ЭМТ включены.

Следует отметить, что качество демпфирования переходного процесса можно улучшить, увеличив мощность ЭМТ, а также изменив значения коэффициентов усиления регулятора возбуждения ЭМТ. В работе выбиралась мощность ЭМТ, равная 50 МВт, что составляет 25 % номинальной мощности ГТУ. Такой мощности достаточно, чтобы предотвратить выпадение из синхронизма при возмущении 2.

2. Трёхфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Уренгойская ГРЭС – Тарко-Сале (вблизи шин станции Уренгойская ГРЭС) с успешным АПВ. Результаты расчётов показывают, что при таком возмущении генераторы энергоблока Уренгойской ГРЭС выпадают из синхронизма (рисунок 4.11).

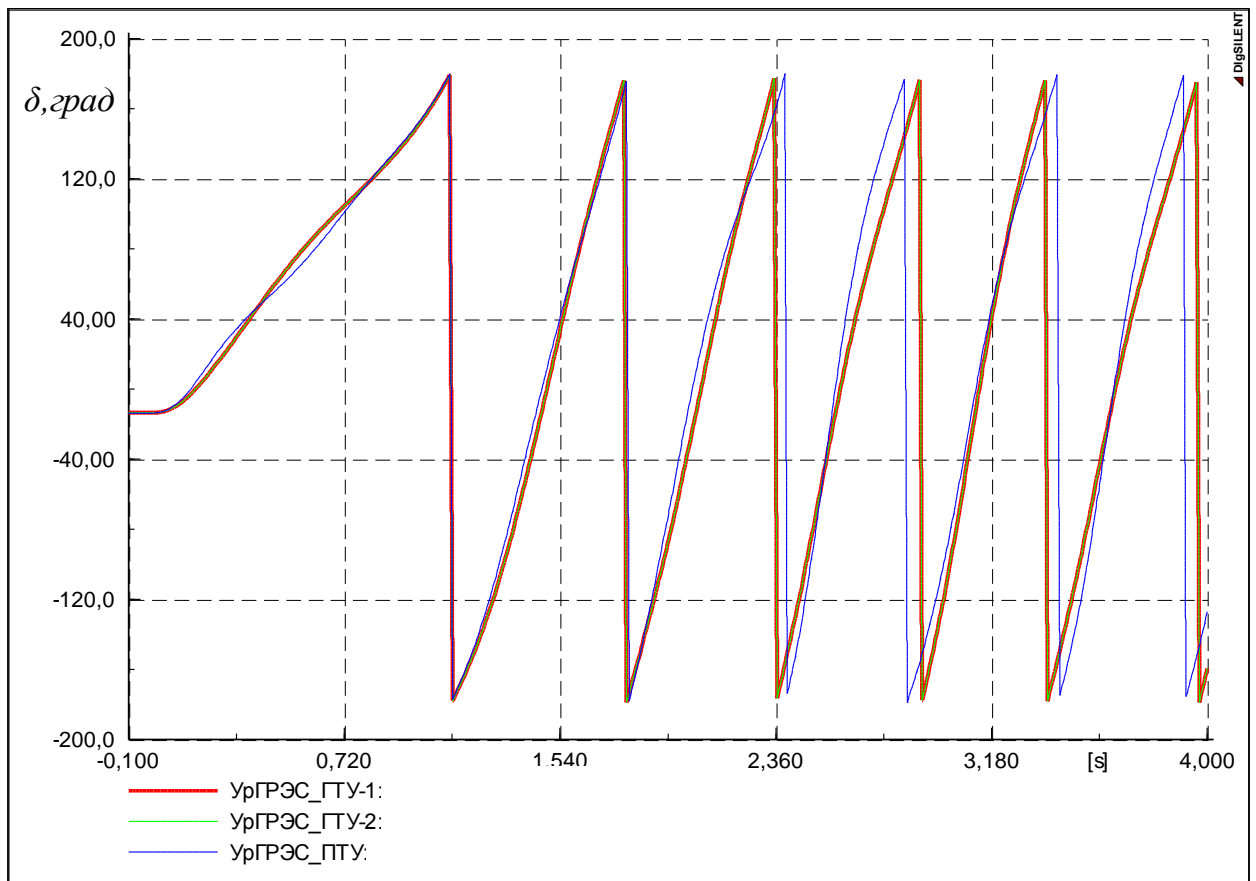


Рисунок 4.11 – Трёхфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Уренгойская ГРЭС – Тарко-Сале (вблизи шин станции Уренгойская ГРЭС) с успешным АПВ. ЭМТ отключены.

Углы ротора генераторов по отношению к углу опорной машины в град.

Результаты расчёта переходного процесса при включении ЭМТ с выбранным законом регулирования на генераторах ГТУ Уренгойской ГРЭС показаны на рисунке 4.12. Как видно, включение ЭМТ в работу позволило не

допустить выпадение из синхронизма генераторов станции, а также эффективно демпфировать переходный процесс. Рост угла ротора генерирующих агрегатов в первом цикле качаний не превышает 73° . Суммарные потери электрической энергии на торможение в течение переходного процесса составили $48 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

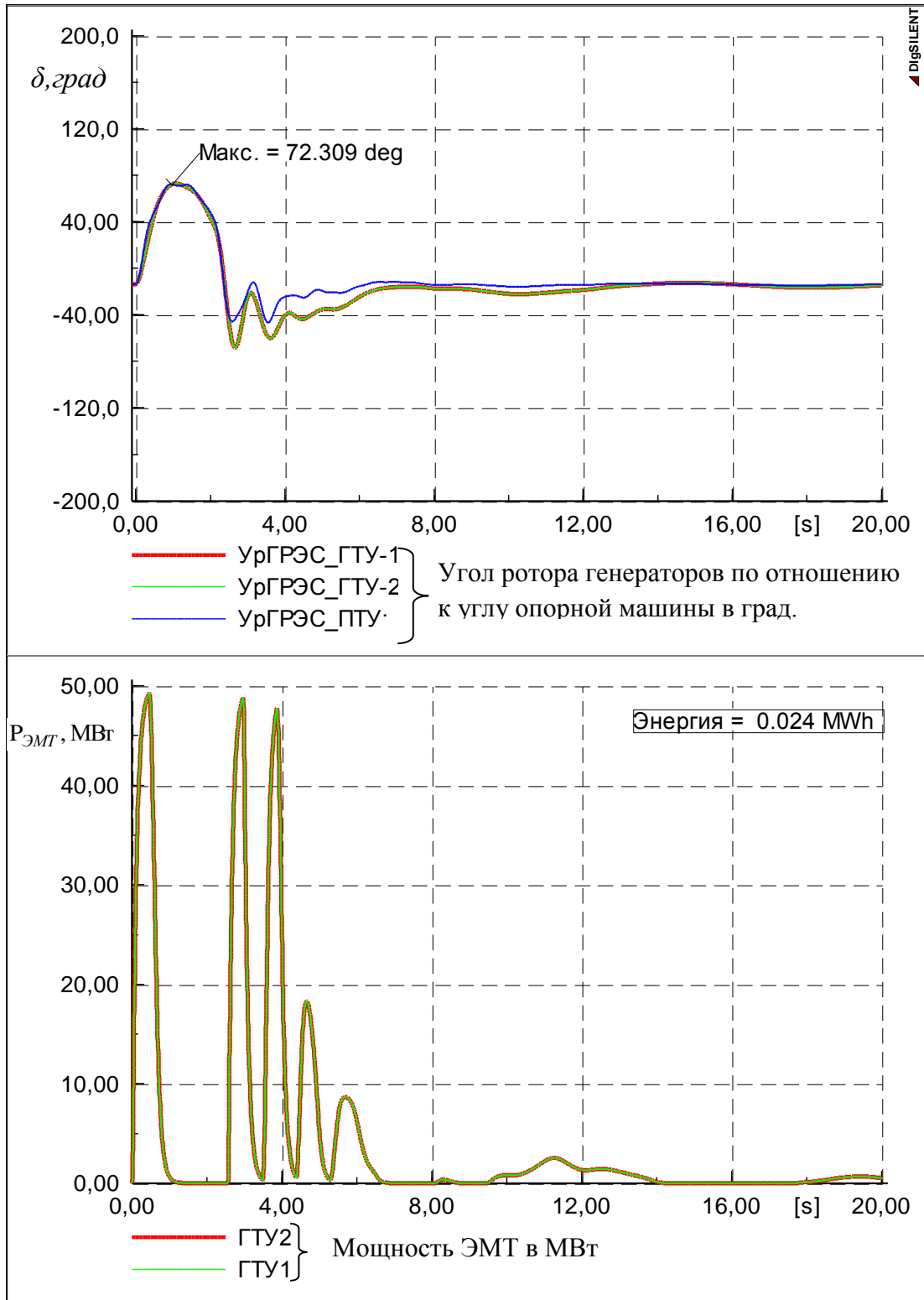


Рисунок 4.12 – Трёхфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Уренгойская ГРЭС – Тарко-Сале (вблизи шин станции Уренгойская ГРЭС) с успешным АПВ. ЭМТ включены.

3. **Трёхфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Кирьяновская – Сибирская (вблизи шин станции Нижневартовская ГРЭС).** Установленная мощность Нижневартовской ГРЭС составляет 1600 МВт. ГРЭС состоит из двух энергоблоков установленной мощностью 800 МВт. Состав и параметры оборудования представлены в Приложении В. Результаты расчётов переходного процесса без работы ЭМТ показаны на рисунке 4.13. Как видно, нарушения динамической устойчивости не происходит. При включении ЭМТ на генераторах станции (рисунок 4.14) происходит более быстрое демпфирование переходного процесса, кроме того значительно уменьшается максимальный угол выбега генерирующих агрегатов. Суммарные потери электрической энергии на торможение в течение переходного процесса составили 51 кВт*ч.

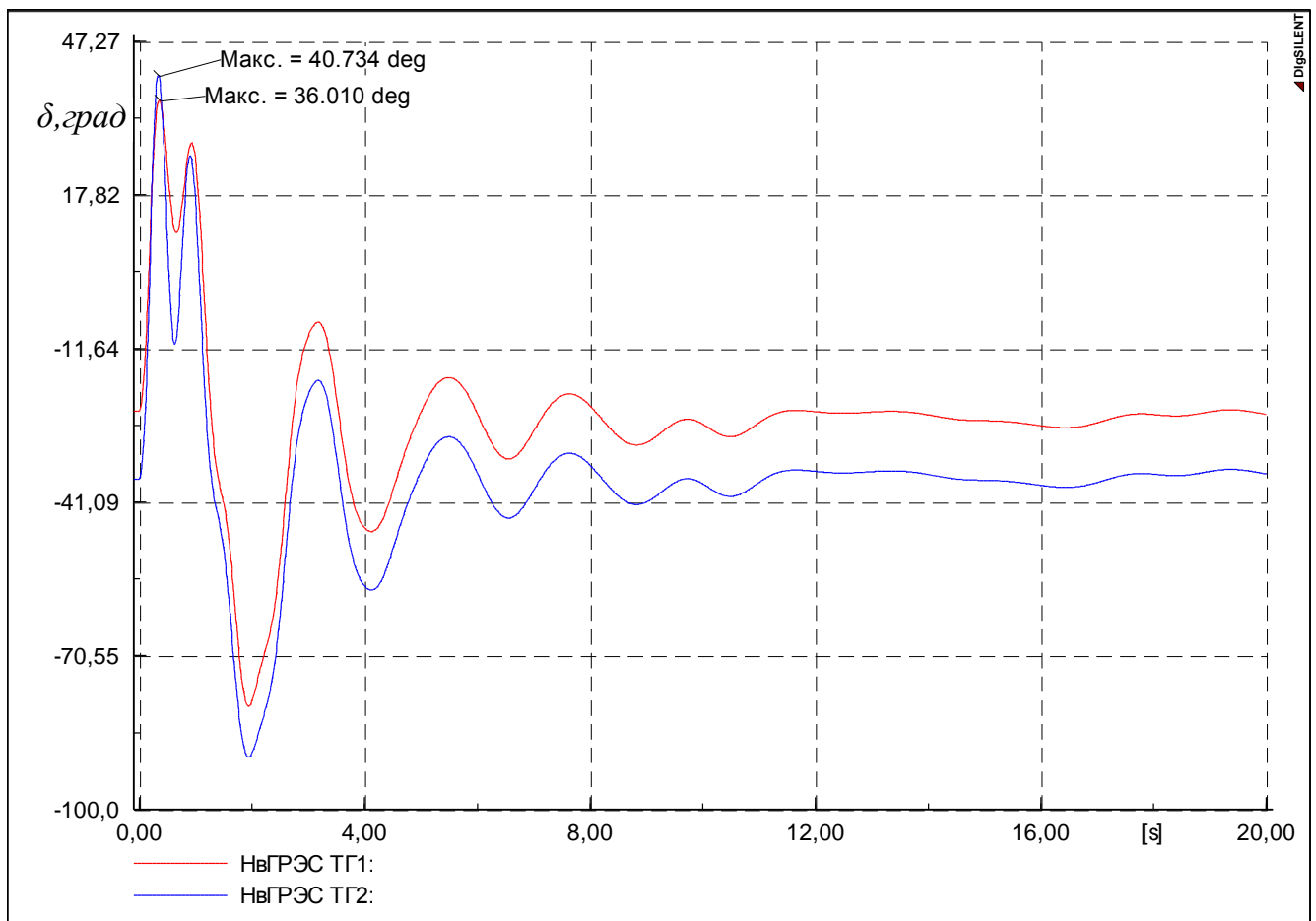


Рисунок 4.13 – Трёхфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Кирьяновская – Сибирская (вблизи шин станции Нижневартовская ГРЭС). ЭМТ отключены. Углы ротора генераторов по отношению к углу опорной машины в град.

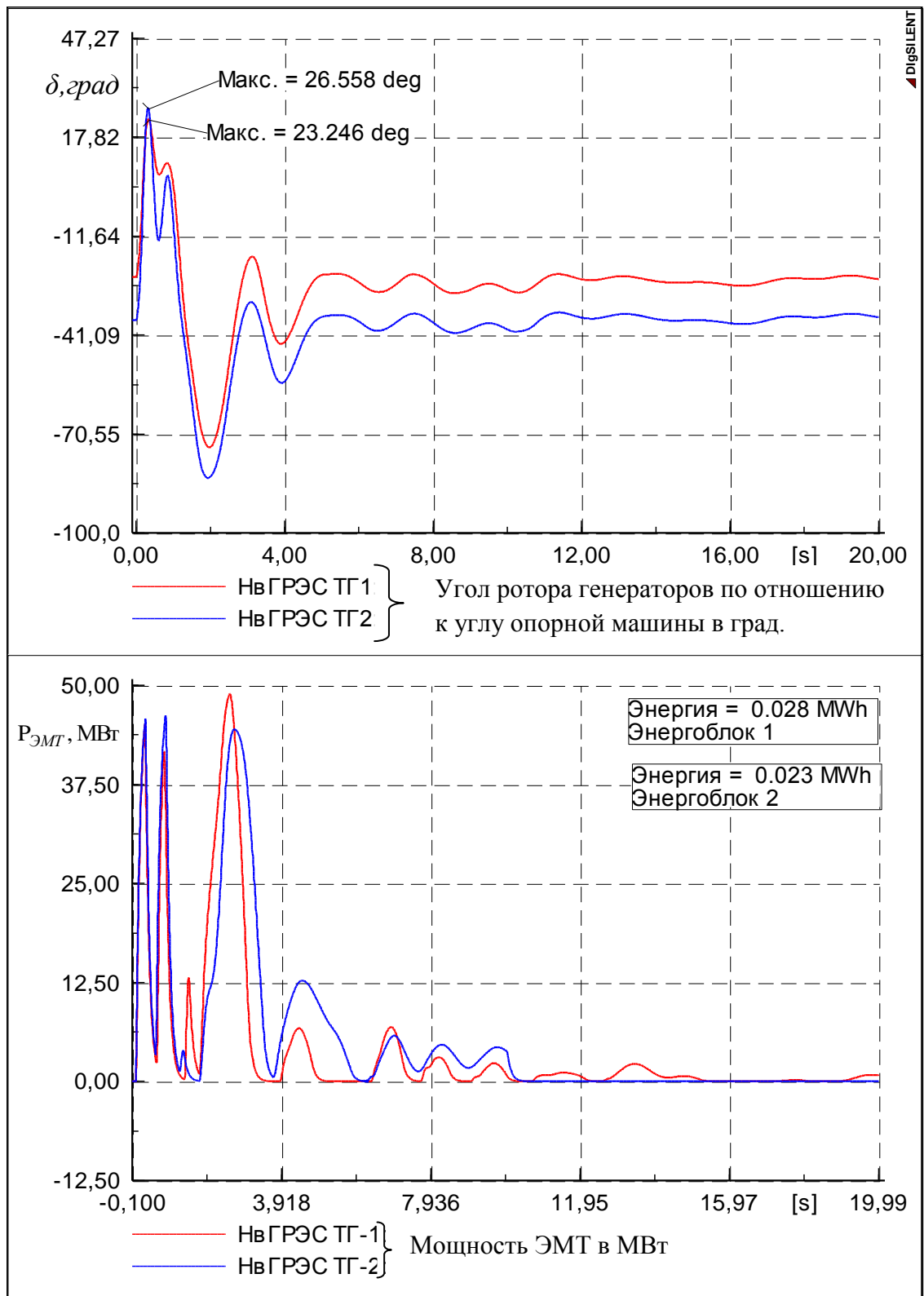


Рисунок 4.14 – Трёхфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Кирьяновская – Сибирская (вблизи шин станции Нижневартовская ГРЭС). ЭМТ включены.

4. Трёхфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Няганская ГРЭС – КТП 3220 (вблизи шин станции Няганская ГРЭС) с неуспешным АПВ. Установленная мощность Няганской ГРЭС составляет 840 МВт. ГРЭС состоит

из двух энергоблоков установленной мощностью 420 МВт. Состав и параметры оборудования представлены в Приложении В. Результаты расчётов приведены на рисунке 4.15. Как видно, генераторы Няганской ГРЭС выпадают из синхронизма. Это объясняется включением ВЛ Няганская ГРЭС-КГП3220 на устойчивое трёхфазное короткое замыкание в момент ускорения генерирующих агрегатов во втором цикле качаний.

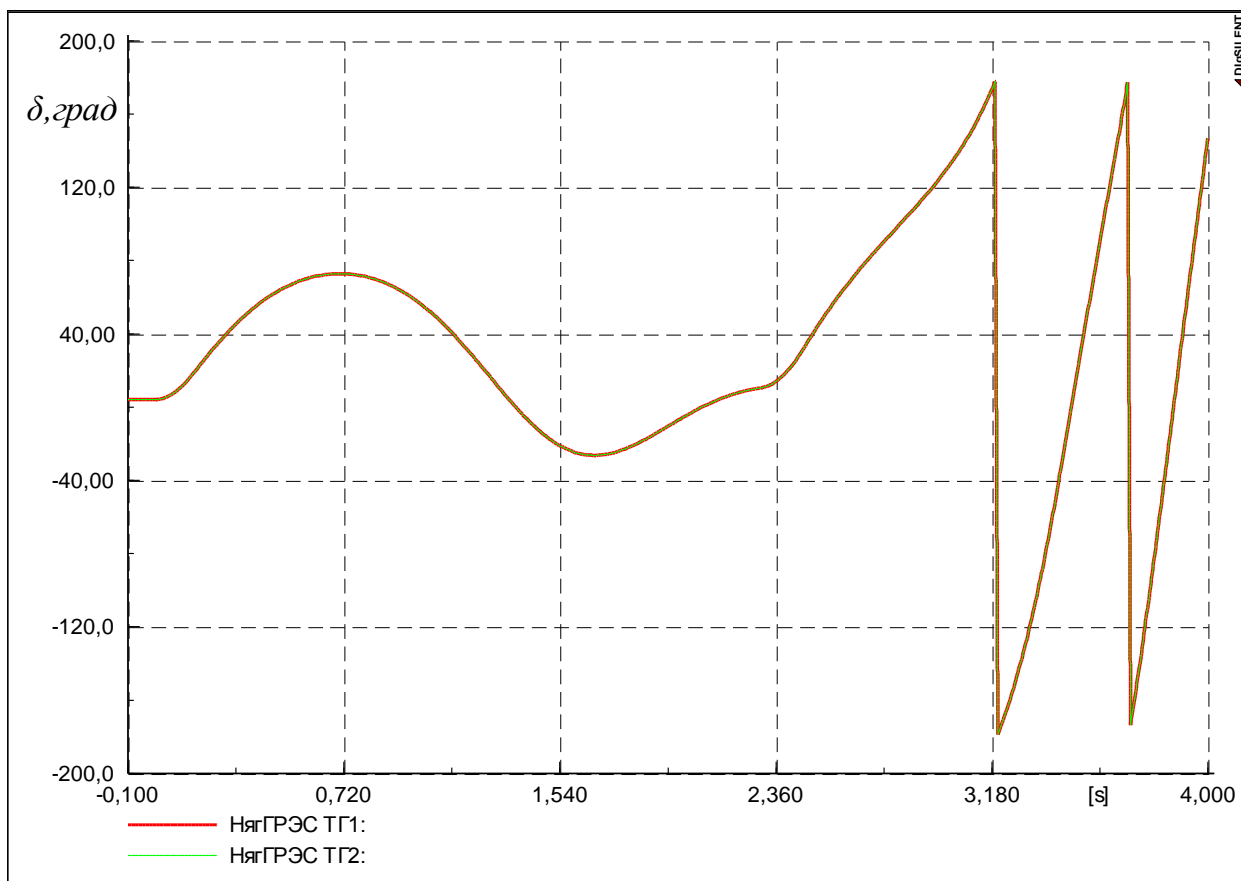


Рисунок 4.15 – Трёхфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Няганская ГРЭС – КГП3220 (вблизи шин станции Няганская ГРЭС) с неуспешным АПВ. ЭМТ отключены. Углы ротора генераторов по отношению к углу опорной машины в град.

Результаты переходного процесса с учётом работы ЭМТ на генераторах Няганской ГРЭС с выбранным законом управления мощностью показан на рисунке 4.16. Как видно, включение ЭМТ на генерирующих агрегатах Няганской ГРЭС позволило избежать нарушения динамической устойчивости, а также быстро демпфировать переходный процесс. При этом максимальное отклонение угла ротора составила всего 60° , что позволяет сделать вывод о эффективности

работы ЭМТ. Суммарные потери электрической энергии на торможение в течение переходного процесса составили 78 кВт*ч.

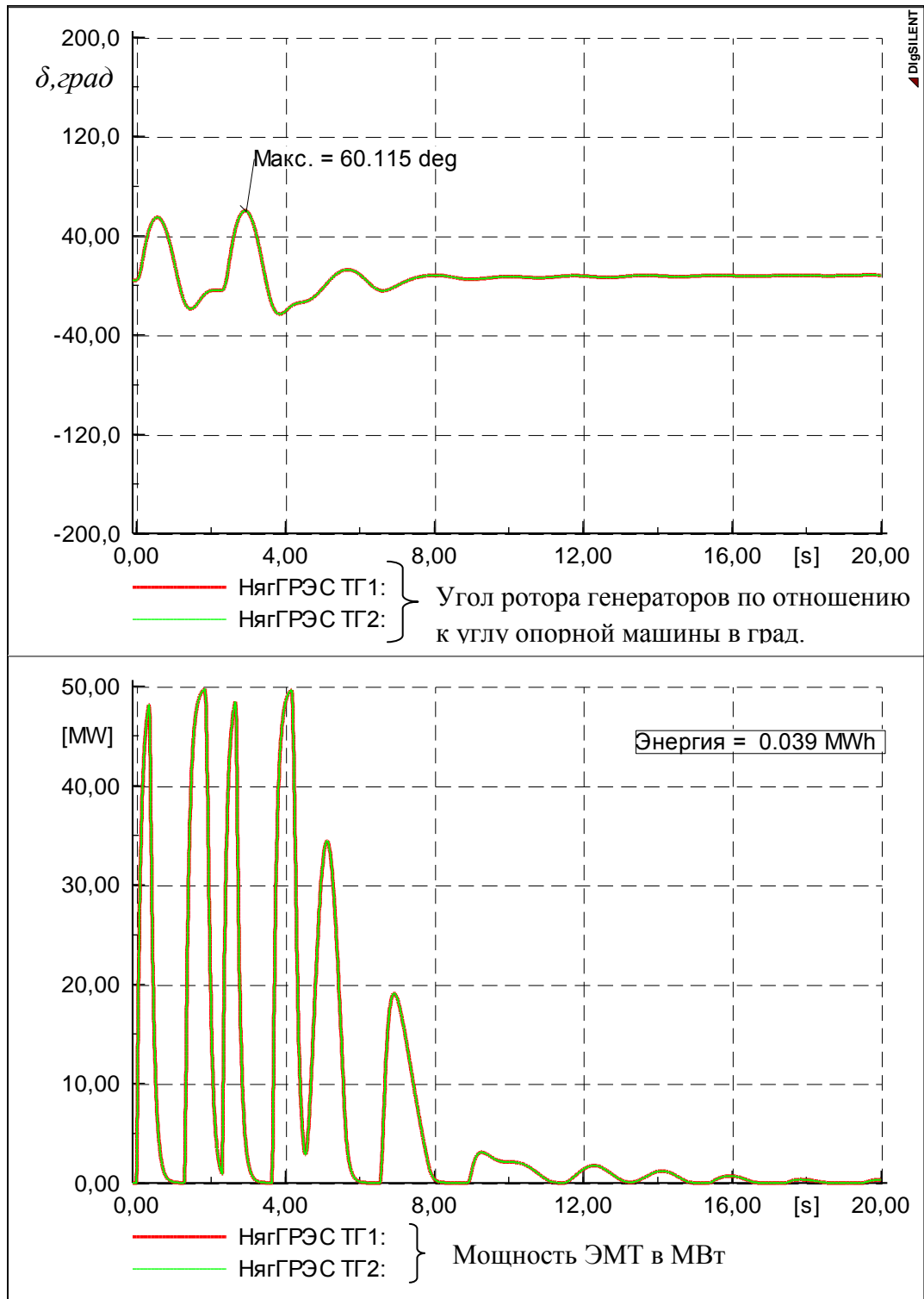


Рисунок 4.16 – Трёхфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Няганская ГРЭС – КТП3220 (вблизи шин станции Няганская ГРЭС) с неуспешным АПВ. ЭМТ включены.

5. Двухфазное короткое замыкание на землю на ВЛ 500 кВ Тюмень – Луговая (на одной из ВЛ, принадлежащей межсистемной связи) с успешным АПВ. Тюменская энергосистема характерна тем, что при определённых условиях по рассматриваемому сечению А (рисунок 4.8) возникают слабозатухающие низкочастотные межсистемные колебания порядка 200 МВт. На рисунке 4.20 показаны результаты расчёта такого переходного процесса. При этом расчётная схема распадается на две подсистемы по границе рассматриваемого сечения, это видно по частотным зависимостям (рисунок 4.21). Выберем наиболее крупные источники электрической энергии с одной и другой стороны от рассматриваемого сечения и поставим на них ЭМТ. Для установки выбраны станции Сургутская ГРЭС-1, Сургутская ГРЭС-2, Рефтинская ГРЭС. Результаты расчётов показаны на рисунке 4.21.

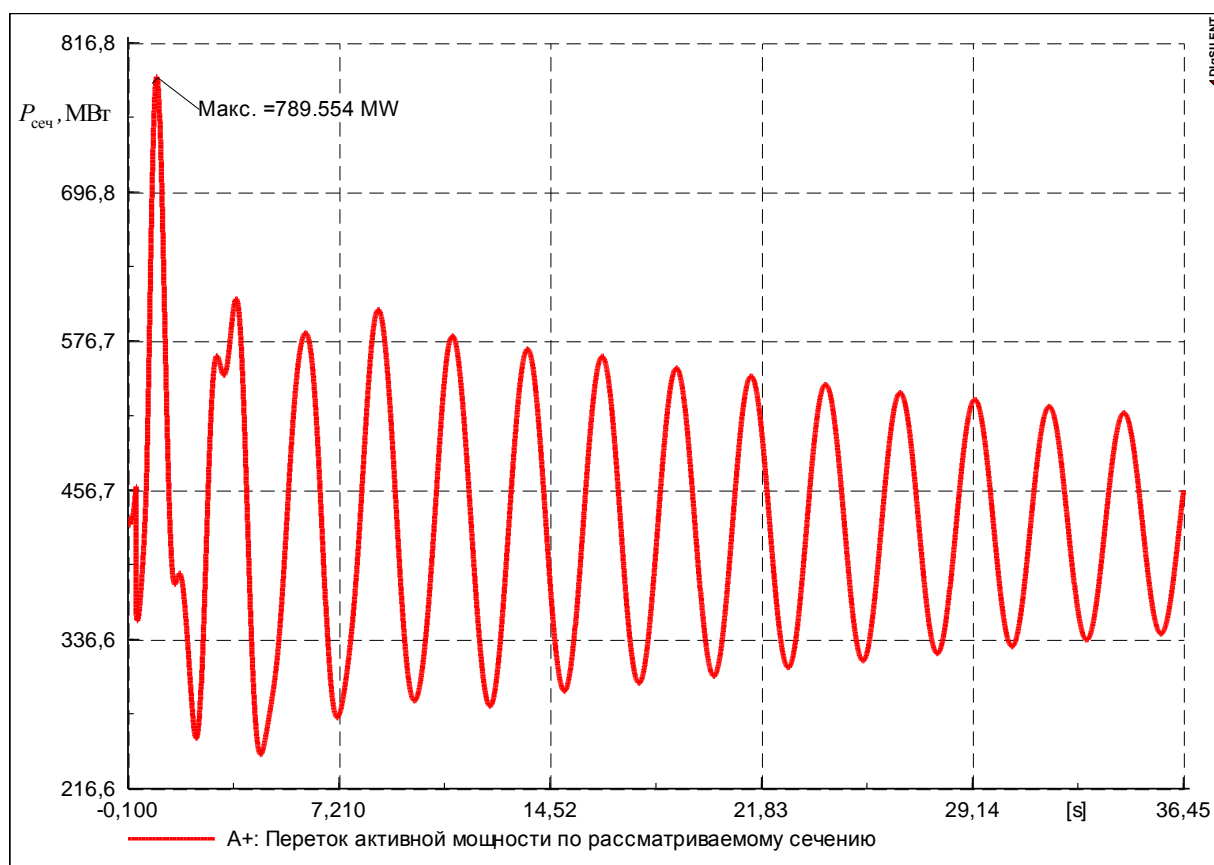


Рисунок 4.20 – Двухфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Тобольская ТЭЦ – ВОС (вблизи шин станции Тобольская ТЭЦ) с успешным АПВ. ЭМТ выключены.

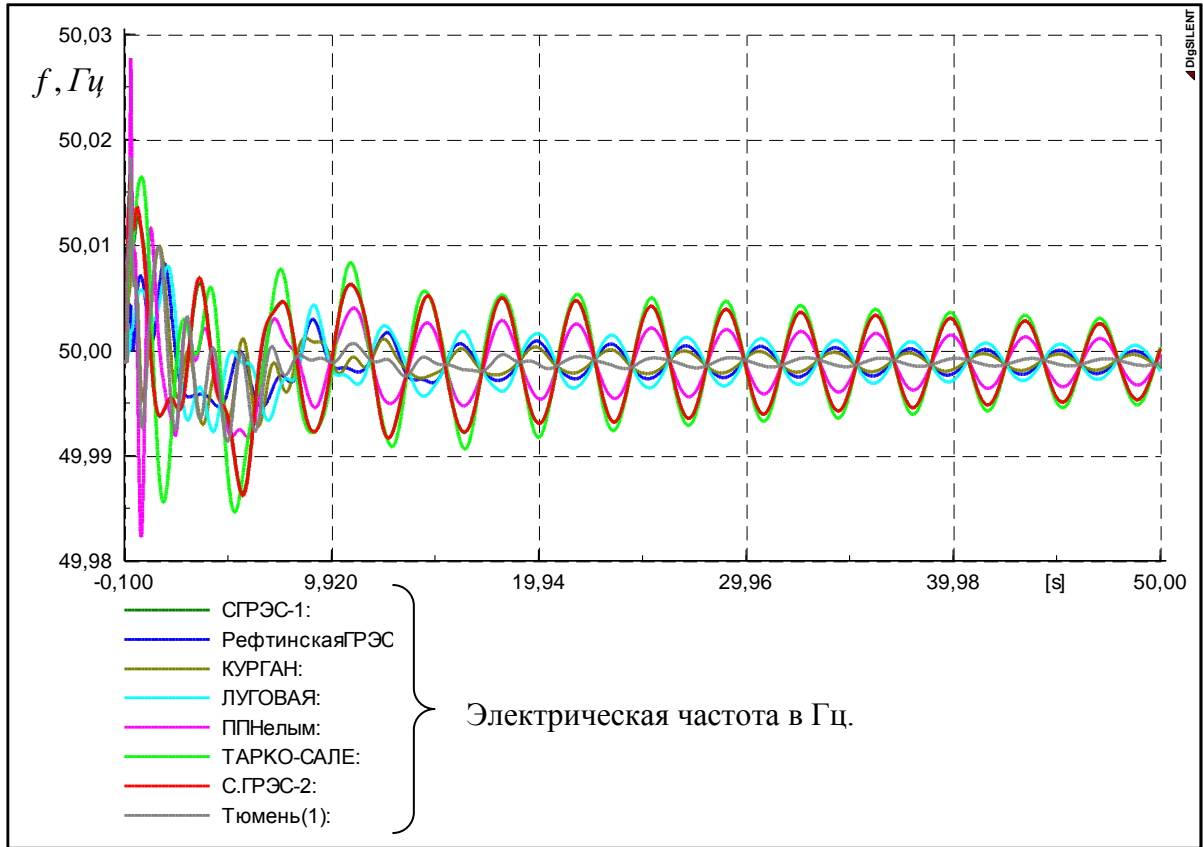


Рисунок 4.21 – Двухфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Тобольская ТЭЦ – ВОС (вблизи шин станции Тобольская ТЭЦ) с успешным АПВ. Распределение частот.

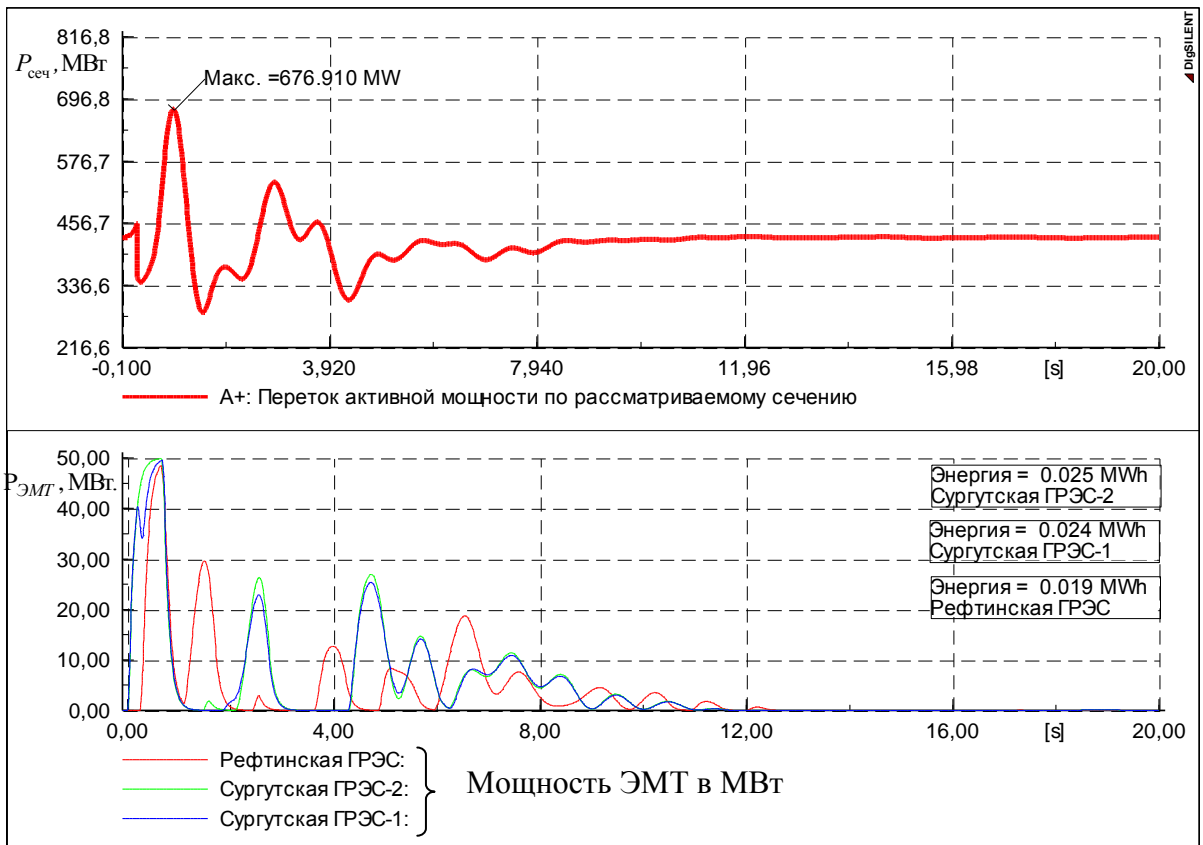


Рисунок 4.22 – Двухфазное короткое замыкание на ВЛ 220 кВ Тобольская ТЭЦ – ВОС (вблизи шин станции Тобольская ТЭЦ) с успешным АПВ. Работа ЭМТ.

Как видно из результатов расчётов переходного процесса, включение ЭМТ с обеих сторон относительно контролируемого сечения позволило эффективно демпфировать низкочастотные слабозатухающие колебания. Кроме того, работа ЭМТ значительно снижает амплитуды низкочастотных межсистемных колебаний. Из рисунка 4.22 видно, что ЭМТ включаются в различное время в течение всего переходного процесса в зависимости от того, какой подсистеме принадлежит ЭМТ.

Выводы:

1. Установка ЭМТ на генерирующие агрегаты позволяет сохранить синхронную работу и эффективно демпфировать возникающие в результате возмущений колебания.
2. Выбранный в третьей главе «квазиоптимальный» закон управления мощностью ЭМТ способствует улучшению динамической устойчивости в рассмотренной энергосистеме, а также эффективно демпфирует возникающие в результате возмущений колебания.
3. Установка ЭМТ на мощные генерирующие агрегаты позволяет изменять декремент затухания межсистемных колебаний. Максимальный эффект достигается при установке ЭМТ с одной и другой стороны относительно сечения, по которому наблюдаются слабозатухающие и незатухающие колебания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решены поставленные задачи и достигнута цель исследования: разработаны законы управления электромагнитным тормозом (ЭМТ) синхронных генераторов для обеспечения условий устойчивости ЭЭС при различных возмущениях.

При решении поставленных задач были достигнуты следующие результаты:

1. Разработана методика оценки влияния ЭМТ на условия статической устойчивости с учётом однополярной зависимости тормозного момента от тока возбуждения тормоза;
2. Доказано, что применение ЭМТ позволяет обеспечить динамическую и статическую устойчивость ЭЭС, при этом качество протекания переходного процесса определяется законом управления ЭМТ;
3. Разработана методика и алгоритм определения эталонного (оптимального) управления мощностью ЭМТ с учётом однополярной зависимости тормозного момента от тока возбуждения тормоза.
4. Показано, что применение метода «обратного решения» для синтеза закона управления ЭМТ позволяет получить результат, но полученный закон требует решения задачи выбора настроечных коэффициентов для совокупности режимов работы ЭЭС, что существенно осложняет его практическую реализацию.
5. Путём последовательного применения инженерного подхода синтезирован «квазиоптимальный» закон управления ЭМТ который имеет значения критерия качества переходного процесса близкое к значению оптимального и может быть реализован на практике без расчёта оптимального управления в темпе процесса.

6. На примере сложных энергосистем показано, что применение ЭМТ с «квазиоптимальным» законом управления позволяет обеспечить динамическую устойчивость ЭЭС и способствует демпфированию электромеханических колебаний.
7. В вычислительном эксперименте показано эффективное демпфирование слабозатухающих низкочастотных колебания в межсистемных связях с помощью ЭМТ.

Результаты, полученные в данной диссертации, могут лечь в основу решения следующих задач:

- установка ЭМТ на генерирующих агрегатах единой энергосистемы в местах, где остро стоят вопросы обеспечения динамической устойчивости;
- обеспечение необходимых показателей качества затухания переходных процессов в межсистемных связях;
- выбор закона управления ЭМТ.

Для внедрения ЭМТ в работу электроэнергетической системы необходимо решить задачи, которые являются развитием настоящей диссертации:

- оценка влияния ЭМТ на статическую устойчивость в сложных энергосистемах;
- выбор мест расстановки устройств ЭМТ в сложной электроэнергетической системе;
- определение места ЭМТ в структуре противоаварийной автоматики, разработки требований к параметрам ЭМТ, согласование работы ЭМТ с существующей противоаварийной автоматикой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с., ил.;
2. Электрические системы: Управление переходными режимами электроэнергетических систем. Учебник/Веников В.А., Зуев Э.Н., Портной М.Г. и др.; Под ред. В.А.Веникова. – М.: Высш.школа, 1982. – 247 с., ил.;
3. Патент РФ № 2339144, 19.07.2007. www.fips.ru. Способ улучшения динамической устойчивости и демпфирования колебаний электроэнергетических систем и устройство для его осуществления / Ю.В. Шаров, И.Д. Янкович, О. Н. Кузнецов;
4. Н.А. Антипова, О.Н. Кузнецов. Определение технических характеристик электромагнитного тормоза для улучшения динамической устойчивости ЭЭС // Вестник МЭИ. 2012. №1;
5. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем/ Под ред. Л.А.Жукова. – М.. Энергия, 1979. – 456 с., ил.;
6. Коротков В. Ф. Автоматическое управление напряжением и реактивной мощностью синхронных генераторов и электрических станций: учеб. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». – Иваново, 2008. – 192 с.
7. СТО 59012820.29.240.008-2008. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем.;
8. СТО 59012820.29.160.20.001-2012. Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов;
9. Павлов Г.М., Меркурьев Г.В. Автоматика энергосистем, 2001 г. 388 с.
10. ГОСТ 21558-2000;

11. Электрические системы. Электрические сети: Учеб. для электроэнерг. Спец. Вузов/В.А.Веников, А.А.Глазунов, Л.А.Жуков и др.: Под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Высш.шк., 1998. – 511 с.: ил.
12. В.А.Веников, Л.А.Жуков, И.И.Карташев, Ю.П.Рыжов. Статические источники реактивной мощности в электрических сетях. М., «Энергия», 1975.
13. Веников В.А., Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока: Учебн. Пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с., ил.
14. Вайнштейн Р.А. Основы управления энергосистем по частоте и активной мощности, по напряжению и реактивной мощности: учебное пособие/ Р.А.Вайнштейн, Н.В.Коломиец, В.В.Шестакова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – с.
15. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения / Ю.П. Рыжов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007;
16. Кощев Л.А. Автоматическое противоаварийное управление в электроэнергетических системах. // Ленинградское отделение Энергоатомиздата;
17. Беркович М.А. и др. Автоматика энергосистем: Учеб. для техникумов/ М.А. Беркович, В.А. Гладышев, В.А. Семенов. — 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 240 с.
18. Синюгин В.Ю., Магрук В.И., Родионов В.Г. Гидроаккумулирующие электростанции в современной электроэнергетике / В.Ю. Синюгин, В.И.Магрук, В.Г.Родионов. – М.: ЭНАС, 2008. – 352 с.
19. Барзам А.Б. Системная автоматика. – 4-е изд. Перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 446 с.: ил.
20. Богословский А.В. О повышении динамической устойчивости посредством механического торможения гидрогенераторов // Электричество, 1954, № 12, с. 45-50.

21. Экспериментальное исследование последовательного электрического торможения капсульных гидрогенераторов/ Корхов И.Ф., Рагозин А.А., Родченко Е.А. и др. // Электрические станции, 1978, № 2, с.64-66.

22. Кычаков В.П., Могирев В. В., Руденко Ю.Н. Выбор параметров электрического торможения генераторов в сложных энергетических системах // Докл. на II Всесоюзн. научно-техн. совещ. по устойчивости и надежности энергосистем СССР. М.: Энергия, 1969, с. 198-206.

23. Бронштейн Э.Л., Веников В.А., Совалов С.А. Исследование электрического торможения генераторов Волжской ГЭС им. В.И. Ленина. // Труды ВНИИЭ, 1963, вып. пятнадцатый, с. 227-247.

24. Бронштейн Э.Л. Динамическая устойчивость электропередачи Волжская ГЭС им. В.И. Ленина Москва при электрическом торможении // Труды Московского ордена Ленина энергетического института, 1964, с. 177-187.

25. Бронштейн Э.Л. Методика настройки устройства электрического торможения однократного действия. // Труды ВНИИЭ, 1963, вып. шестнадцатый, с. 266-272.

26. Реконструкция, испытания и опытная эксплуатация быстродействующего выключателя ВАБ-43-6300/10 к устройствам электрического торможения капсульных генераторов // Электрические станции, 1979, № 3, с.30-34.

27. Кощев Л.А., Шмелькин Б.М. О применении электрического торможения и разгрузки генераторов в сложной энергосистеме. // Известия НИИ постоянного ток. Передача энергии постоянным и переменным током, 1961, сб. восьмой.

28. Кощев Л.А. Управление электрическим торможением генераторов в схеме с применением БАПВ. // Устойчивость и надежность энергосистем СССР. М.; Л.: Энергия, 1964, с. 144-156.

29. Лугинский Я.Н. Автоматика разгрузки электропередач от мощных ГЭС при набросах активной мощности: Афтореферат дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., 1967.
30. Н. И. Зеленохат, Б. Пурэвсүрэн, О. Н. Зеленохат Дискретное управление электрическим торможением синхронного генератора в электроэнергетической системе // Вестник Московского энергетического института. - 2009. - N 2.
31. Баатарын Пурэвсүрэн. Разработка алгоритмов управления и исследование применения электрического торможения для повышения динамической устойчивости развивающейся энергодефицитной энергосистемы: дис. ... канд. техн. наук, Москва - 2009.
32. Зеленохат Н.И. Повышение динамической устойчивости энергосистемы с помощью электрического торможения генераторов // Электро. 2004. №4.
33. <http://www.esco-motors.ru/engines.php>;
34. <http://snabsystem.ru/catalog/elektrodvigateli/servoprivody-keb>;
35. Поздеев А.Д. и Розман Я.Б., Электромагнитные муфты и тормоза с массивным якорем, М.—Л., Госэнергоиздат, 1963, 104 с. с черт. (Библиотека по автоматике, вып. 82)
36. <http://qy-machine.ru/11-magnetic-dynamometer.html/164260>;
37. A Parametric Model of an Eddy Current Electric Machine for Automotive Braking Applications // Soheli Anwar. – IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEM TECHNOLOGY, vol.12, №3, 2004;
38. Design and Performance of a Water-cooled Permanent Magnet Retarder for Heavy Vehicles // Lezhi Ye, Desheng Li, Yuanjing Ma, Bingfeng Jiao. – IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, vol.26, №3, 2011;
39. DESIGN AND USE OF AN EDDY CURRENT RETARDER IN AN AUTOMOBILE // C.Y. LIU, K.J. JIANG, Y. ZHANG. – International Journal of Automotive Technology, vol.12, №4, 2011;

40. TORQUE CHARACTERISTICS ANALYSIS FOR OPTIMAL DESIGN OF A COPPER-LAYERED EDDY CURRENT BRAKE SYSTEM // S. ANWAR, R.C. STEVENSON. – International Journal of Automotive Technology, vol.12, №4, 2011;

41. <http://www.scb-sem.ru/produkcija/asynchronousmotors/withelectromagneticbrake.html>;

42. http://www.szemo.ru/crp_brake.php;

43. Бобцов А.А., Ефимов Д.В., Сергеев К.А. К задаче стабилизации нелинейных аффинных систем//Ш научно-техническая конференция молодых ученых "Навигация и управление движением". СПб.: ГНЦ РФ — ЦНИИ "Электроприбор". 2001. С. 113-122.

44. Беркович Л.М.: Факторизация и преобразования дифференциальных уравнений. Методы и приложения. М.: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2002. – 464 с.

45. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления: Учеб.пособ. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 616 с.

46. Михеев С. Е. Многомерная аппроксимация и интерполяция. Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2012. 59 с.

47. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-ти тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 616 с.;ил.

48. Arstein Z. Stabilization with relaxed control // Nonlinear Analysis, #7,1983, pp. 1163-1173.

49. Clarke F.H., Yu.S.Ledyayev, E.D. Sontag and A.I. Subbotin, Asymptotic controllability implies feedback stabilization, IEEE Trans.Automat.Control, #42, 1997, pp. 1394-1407/

50. Дорф Р. Современные системы управления/Р.Дорф, Р. Бишоп. Пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.:Лаборатория Базовых Знаний, 2002. - 832 с.:ил.

51. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. I. Теория линейных систем

автоматического управления / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова и др.; Под ред. А. А. Воронова.—2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1986. — 367 с.

52. Поляк Б.Т., Щербаков П.С., Робастная устойчивость и управление, Наука, 2002

53. Ефимов Д.В. Робастное и адаптивное управление нелинейными колебаниями. – СПб.: Наука, 2005. – 314 с.

54. Устойчивость нелинейных систем с неединственным состоянием равновесия. Гелиг А.Х., Леонов Г.А., Якубович В.А. Наука, Главная редакция физико-математической литературы, М., 1978, 400 стр.

55. Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P.V. Nonlinear and Adaptive Control Design. Wiley & Sons , Inc. 1995, P. 563.

56. Sontag E.D. A “universal” construction of Arstein’s theorem on nonlinear stabilization // Systems & Control Letters, vol.12,1989, pp. 542-550.

57. Teel A.R. Using saturation to stabilize a class of single-input partially linear composite systems // In Prep. Of the 2nd IFAC Nonlinear Control Systems Design Symposium, Bordeaux, France, 1992. P.224-229.

58. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.

59. Ибадулла С.И. Решение задачи синтеза системы управления методом вариационного генетического программирования: дис. ... канд. техн. наук, Москва-2014;

60. Сорокин Д.В. Выбор настроек АРВ генераторов сложной энергосистемы на основе применения генетического алгоритма и методов модального анализа: дис. ... канд. техн. наук, Санкт-Петербург – 2009;

61. Отчёт о научно-исследовательской работе. Результаты исследований систем регулирования частоты и напряжения энергоблоков ПГУ (ГТУ) на электростанциях группы ИНТЕР РАО ЕЭС. Разработка организационных и технических мероприятий по повышению надёжности систем регулирования частоты и напряжения энергоблоков ПГУ (ГТУ). Том 1, НИУ МЭИ – 2013.

62. Панин А.В. Обоснование применения электромагнитного тормоза для обеспечения динамической устойчивости генерирующих агрегатов электростанций: дис. ... канд. техн. наук, Москва-2014;

63. Определение технических характеристик электромагнитного тормоза для улучшения динамической устойчивости ЭЭС / Н. А. Антипова, О. Н. Кузнецов // Вестник Московского энергетического института. - 2012. - № 1. - С. 54-59

64. Панин А.В., Чумаченко В.В., Кузнецов О.Н. Моделирование электромагнитного тормоза для улучшений условий динамической устойчивости электроэнергетической системы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ №9-10/2014

65. Tricomi F. Integrazione di un'equazione differenziale presentatasi in elettrotecnica. Annali della Scuola Normale Superiore di Pisa, Classe di Scienze 2, Ser. 2, No. 1, 1933, p. 1–20.

66. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. // 2-е изд., перераб. и испр. - М., Наука, 1981.-918 с.

67. Леонов Г.А. Введение в теорию управления СПб.: Изд-во СПб ун-та, 2004.

68. Белюстина Л.Н. Об одном уравнении из теории электрических машин. – Сб. памяти А.А.Андропова. Изд-во АН СССР, 1955.

69. Бакаев Ю.Н. Некоторые вопросы нелинейной теории фазовых систем. – М.: Труды ВВИА им. Н.Е.Жуковского, 1959, вып.800.

70. Рейссиг Р., Сансоне Г., Конти Р. Качественная теория нелинейных дифференциальных уравнений.// М., Наука, 1974. -316 с.

71. Малкин И.Г. Теория устойчивости движения // 2-е изд., М., Наука, 1966. -533 с.

72. Гелиг А.Х., Леонов Г.А., Якубович В.А. Устойчивость нелинейных систем с неединственным состоянием равновесия.// М., Наука, 1978. - 400 с.

73. Pai M.A. Energy function analysis for power system stability Boston: Kluwer, 1989.
74. Панин А.В., Чумаченко В.В., Кузнецов О.Н. Сопоставление эффективности законов управления электромагнитного тормоза // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ №5-6/2014
75. Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф.Мищенко. Математическая теория оптимальных процессов. – 4-е изд.-М.: «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 392с.
76. Строев В.А., Селиджанов Р.М. Управление переходными режимами в электрических системах. /Под ред. В.И.Пуго. М.:Изд-во МЭИ,1992.-91 с.
77. Л.С. Понтрягин. Избранные труды. М.: Наука. -1989.
78. Якимов А.С. Аналитический метод решения уравнений математической физики: Учеб.пособие. – Томск: Изд-во Том. Ун-та, 2010. – 197 с.
79. Bellman R. Quasilinearization and upper and lower bounds for variational problems. Quart. Appl. Math. № 19. - 1962. – P. 349-350.
80. Bellman R. Quasilinearization and nonlinear boundary-value problems. / Bellman R., Kalaba R. - American Elsevier Publishing Company, Inc. – New York. - 1965. - 183p.
81. Kalaba R. On nonlinear differential equations, the maximum operation and monotone convergence. J. Math., Mech. № 8. - 1959. – P. 519-574.
82. Тихонов А. Н. Дифференциальные уравнения / А. Н. Тихонов, А. Б. Васильева, А. Г. Свешников. – М.: Наука. - 1985. - 231 с.
83. Карташев А. П. Обыкновенные дифференциальные уравнения и основы вариационного исчисления. / А. П. Карташев, Б. Л. Рождественский – М.: Наука. - 1986. – 272 с.
84. Бахвалов Н. С. Численные методы. / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков – М.: Наука. - 1987. – 600 с.
85. И.В. Моршнева, С.Н. Овчинникова. Численное решение краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений. Метод стрельбы.

Методические указания для студентов 3 и 4 курсов мехмата. Ростов-на-Дону, УПЛ РГУ, 2003г.

86. Н.Р. Беляев, И.В. Танатаров. Введение в теорию приближённых вычислений.

87. Заусаев А.Ф. Разностные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений: Учеб.пособ. Самара: Самарский гос.техн.ун-т, 2010. 100 с.

88. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т.2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. Н.Д.Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. – 736 с.;ил.

89. Чебыкин А.А. Backstepping – метод синтеза управления для нелинейных объектов.// Уральский федеральный университет, 2015

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Описание ПК DIgSILENT PowerFactory v 15.1.

Программный комплекс DIgSILENT PowerFactory (Германия) версии 15.1 позволяет моделировать энергосистемы большой размерности и включает в себя следующие функции:

- Расчет симметричных и несимметричных установившихся режимов, токов КЗ для 1-, 2-, 3- и 4-проводных, однофазных или трехфазных сетей произвольной конфигурации переменного и постоянного тока.
- Моделирование станционных регуляторов, первичных и вторичных регуляторов, системной противоаварийной автоматики энергосистемы.
- Анализ режимов, напряжений и планирование резервов мощностей.
- Ведение перспективных схем с помощью привязки элементов к времени ввода и вариантам развития.
- Анализ низковольтных распределительных сетей и их оптимизация.
- Оптимизация режимов энергосистем и оценка состояния.
- Моделирование электромагнитных и электромеханических переходных процессов, расчеты статической и динамической устойчивости, анализ собственных значений (модальный анализ).
- Расчет, моделирование и координация систем РЗА, устройств силовой электроники, FACTS и др.
- Моделирование и анализ утяжеленных и аварийных режимов, n-1, n-m.
- Расчет и анализ надежности, гармонический анализ.

Функциональные модули:

- Base Package (Базовый пакет) – моделирование установившихся нормальных и аварийных (симметричных и несимметричных, ТКЗ и др.) режимов

- Stability Functions (RMS) – моделирование электромеханических переходных процессов
- Electromagnetic Transients (EMT) – моделирование электромагнитных переходных процессов
- Harmonic Analysis – гармонический анализ
- Protection Functions – расчет, моделирование и координация систем РЗА
- Reliability Analysis – анализ надежности
- Distribution Network Optimization – оптимизация распределительной сети
- Low Voltage Network Analysis – анализ построения низковольтной сети
- Optimal Power Flow – оптимизация распределения электрической мощности в сети
- State Estimation – оценка состояния
- PSS/E Export – экспорт данных (конвертор) в формате программы PSS/E

Достоинства:

- Функционально интегрированное программное обеспечение представляет собой единый исполняемый модуль с гибкой системой подключения функциональных возможностей по желанию пользователя.
- Единая для всех функциональных модулей интегрированная база данных.
- Настраиваемый графический интерфейс пользователя.
- Фоновый режим работы позволяет работать в многозадачной среде.
- Развитый графический редактор элементов электрической сети с поддержкой большого количества как типовых, так и программируемых блоков автоматики.
- Система документирования проектов.
- Встроенные средства программирования.

- Различные интерфейсы интеграции с системами WAMS, SCADA, ГИС, БД.

- Совместимость с другими программными продуктами NETCAL, NEPS, PSS/E, PSS/U, Adept, NEPLAN и DVG, развитый интерфейс экспорта-импорта данных (конверторов).

- Многопользовательский режим работы.

- Локальные и серверные БД для организации объектно-ориентированных принципов хранения и управления данными.

- Готовые табличные и графические формы для подготовки отчетов.

- Отсутствуют ограничения по количеству узлов, ветвей, генераторов, нагрузок и блоков автоматики.

- Моделирование Power Factory «ветро-турбин» – общепризнанный «де-факто» стандарт.

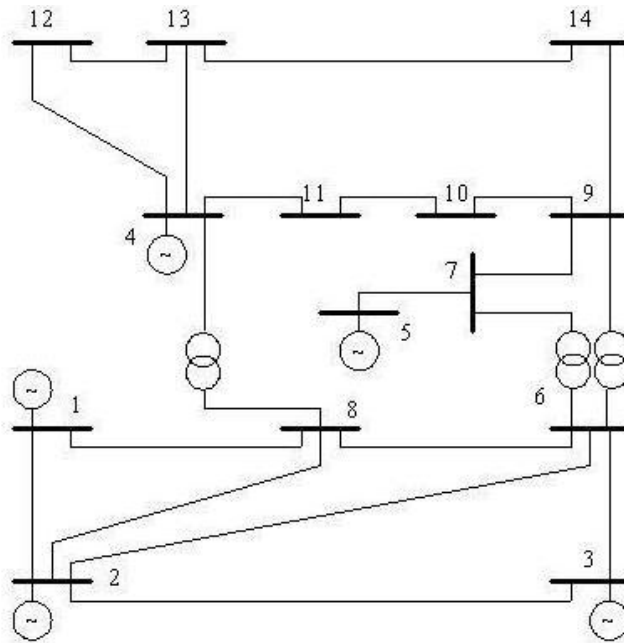
Недостатки:

- Отсутствие русскоязычной сервисной поддержки.

- Отсутствуют рекомендации со стороны ОАО «СО ЕЭС» к применению на территории РФ.

- Отсутствие встроенных конверторов данных (экспорт-импорт) общепринятых в РФ программ электросетевых расчетов (кроме PSS/E).

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Исходные данные по 14-узловой 5-ти генераторной схеме IEEE



Данные по узлам

Узел	тип	Uном	Вш (емк+	Напряжение	Мощность нагрузки	Мощность генерации	Пределы генерации				
		кВ	мСм инд-)	фаза,град	модуль,кВ	P,МВт	Q,МВар	P,МВт	Q,МВар	Qmax,МВар	Qmin,МВар

1	3	230.0	-	0.000	243.800	-	-	100.39	-16.55	-	-
2	2	230.0	-	-4.983	240.350	21.70	12.70	60.00	43.56	50.00	-40.00
3	2	230.0	-	-12.725	232.300	94.20	19.00	120.00	25.08	40.00	0.00
4	1	230.0	-	-10.313	234.064	47.80	-3.90	-	-	-	-
5	1	230.0	-	-8.774	234.488	7.60	1.60	-	-	-	-
6	2	115.0	-	-14.221	123.050	11.20	7.50	20.00	12.73	24.00	-6.00
7	1	115.0	-	-13.360	122.075	-	-	-	-	-	-
8	2	115.0	-	-13.360	125.350	-	-	100.00	17.62	24.00	-6.00
9	1	115.0	1.437	-14.939	121.432	29.50	16.60	-	-	-	-
10	1	115.0	-	-15.097	120.863	9.00	5.80	-	-	-	-
11	1	115.0	-	-14.791	121.544	3.50	1.80	-	-	-	-
12	1	115.0	-	-15.076	121.347	6.10	1.60	-	-	-	-
13	1	115.0	-	-15.156	120.794	13.50	5.80	-	-	-	-
14	1	115.0	-	-16.034	119.086	14.90	5.00	-	-	-	-

Данные по ветвям

нач кон R,Ом X,Ом B,мСм Ктр

(емк+ инд-)

1	2	10.2520	31.3009	0.0998	-
1	5	28.5819	117.9882	0.0930	-
2	3	24.8577	104.7261	0.0828	-
2	4	30.7402	93.2733	0.0643	-
2	5	30.1266	91.9825	0.0654	-
3	4	35.4483	90.4749	0.0242	-
4	5	7.0622	22.2762	0.0000	-
4	7	0.0000	105.8105	0.0000	0.511247
4	9	0.0000	276.2604	0.0000	0.515996
5	6	0.0000	115.8037	0.0000	0.536481
6	11	12.5611	26.3045	0.0000	-
6	12	16.2548	33.8309	0.0000	-
6	13	8.7483	17.2282	0.0000	-
7	8	0.0000	23.2958	0.0000	-
7	9	0.0000	14.5488	0.0000	-
9	10	4.2069	11.1751	0.0000	-
9	14	16.8103	35.7578	0.0000	-
10	11	10.8511	25.4013	0.0000	-
12	13	29.2167	26.4341	0.0000	-
13	14	22.6055	46.0256	0.0000	-

Параметры режима сети

нач кон Rнач,МВт Qнач,МВар Iнач,А Rкон,МВт Qкон,МВар Iкон,А

1	2	156.88	-20.40	374.65	-152.59	27.68	372.51
1	5	75.51	3.85	179.05	-72.75	2.23	179.20
2	3	73.24	3.56	176.13	-70.91	1.60	176.29

2	4	56.13	-1.55	134.89	-54.45	3.02	134.53
2	5	41.52	1.17	99.77	-40.61	-2.10	100.13
3	4	-23.29	4.47	58.93	23.66	-4.84	59.56
4	5	-61.16	15.82	155.82	61.67	-14.20	155.82
4	7	28.07	-9.68	73.25	-28.07	11.38	143.28
4	9	16.08	-0.43	39.68	-16.08	1.73	76.89
5	6	44.09	12.47	112.81	-44.09	-8.05	210.28
6	11	7.35	3.56	38.33	-7.30	-3.44	38.33
6	12	7.79	2.50	38.37	-7.71	-2.35	38.37
6	13	17.75	7.22	89.89	-17.54	-6.80	89.89
7	8	0.00	-17.16	81.17	-0.00	17.62	81.17
7	9	28.07	5.78	135.56	-28.07	-4.98	135.56
9	10	5.23	4.22	31.94	-5.21	-4.18	31.94
9	14	9.43	3.61	47.99	-9.31	-3.36	47.99
10	11	-3.79	-1.62	19.66	3.80	1.64	19.66
12	13	1.61	0.75	8.48	-1.61	-0.75	8.48
13	14	5.64	1.75	28.24	-5.59	-1.64	28.24

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Состав и параметры генерирующего оборудования

Тюменской энергосистемы.

Название	№	U _{ном} , кВ	P _{ном} , МВт	cosφ	T _j , с	X'd, о.е.	Xd, о.е.	Xq, о.е.	X''d, о.е.	X''q, о.е.
Рефтенская ГРЭС	Г-1	20	300	0,85	6,5	0,3	2,2	2,2	0,195	0,195
Рефтенская ГРЭС	Г-2	20	300	0,85	6,5	0,3	2,2	2,2	0,195	0,195
Рефтенская ГРЭС	Г-3	20	300	0,85	6,5	0,3	2,2	2,2	0,195	0,195
Рефтенская ГРЭС	Г-4	20	300	0,85	6,5	0,3	2,2	2,2	0,195	0,195
Рефтенская ГРЭС	Г-5	20	300	0,85	6,5	0,3	2,2	2,2	0,195	0,195
Рефтенская ГРЭС	Г-6	20	300	0,85	6,5	0,3	2,2	2,2	0,195	0,195
Рефтенская ГРЭС	Г-7	20	500	0,85	5,6	0,373	2,413	2,413	0,243	0,243
Рефтенская ГРЭС	Г-8	36,75	500	0,85	5,6	0,38	2,43	2,43	0,273	0,273
Рефтенская ГРЭС	Г-9	36,75	500	0,85	5,6	0,38	2,43	2,43	0,273	0,273
Рефтенская ГРЭС	Г-10	36,75	500	0,85	5,6	0,38	2,43	2,43	0,273	0,273
Сургутская ГРЭС-1	Г-1	15,75	200	0,85	7	0,29	1,97	1,97	0,2	0,2
Сургутская ГРЭС-1	Г-2	15,75	200	0,85	7	0,27	2,106	2,106	0,181	0,181
Сургутская ГРЭС-1	Г-3	15,75	200	0,85	7	0,27	2,106	2,106	0,181	0,181
Сургутская ГРЭС-1	Г-4	15,75	200	0,85	7	0,29	1,97	1,97	0,2	0,2
Сургутская ГРЭС-1	Г-5	15,75	200	0,85	7	0,29	1,97	1,97	0,2	0,2
Сургутская ГРЭС-1	Г-6	15,75	200	0,85	7	0,272	2,106	2,106	0,181	0,181
Сургутская ГРЭС-1	Г-7	15,75	200	0,85	7	0,272	2,16	2,16	0,18	0,18
Сургутская ГРЭС-1	Г-8	15,75	200	0,85	7	0,272	2,16	2,16	0,18	0,18
Сургутская ГРЭС-1	Г-9	15,75	200	0,85	7	0,272	2,16	2,16	0,18	0,18
Сургутская ГРЭС-1	Г-10	15,75	200	0,85	7	0,272	2,16	2,16	0,18	0,18
Сургутская ГРЭС-1	Г-11	15,75	200	0,85	7	0,272	2,16	2,16	0,18	0,18
Сургутская ГРЭС-1	Г-12	15,75	200	0,85	7	0,272	2,16	2,16	0,18	0,18
Сургутская ГРЭС-1	Г-13	15,75	200	0,85	7	0,272	2,16	2,16	0,18	0,18
Сургутская ГРЭС-1	Г-14	15,75	200	0,85	7	0,272	2,16	2,16	0,18	0,18
Сургутская ГРЭС-1	Г-15	15,75	200	0,85	7	0,272	2,16	2,16	0,18	0,18
Сургутская ГРЭС-1	Г-16	15,75	200	0,85	7	0,272	2,16	2,16	0,18	0,18
Сургутская ГРЭС-2	Г-17	24	800	0,9	5	0,31	2,33	2,33	0,219	0,219
Сургутская ГРЭС-2	Г-1	24	800	0,9	5	0,31	2,33	2,33	0,219	0,219
Сургутская ГРЭС-2	Г-2	24	800	0,9	5	0,31	2,33	2,33	0,219	0,219
Сургутская ГРЭС-2	Г-3	24	800	0,9	5	0,31	2,33	2,33	0,219	0,219
Сургутская ГРЭС-2	Г-4	24	800	0,9	5	0,31	2,33	2,33	0,219	0,219
Сургутская ГРЭС-2	Г-5	24	800	0,9	5	0,31	2,33	2,33	0,219	0,219
Сургутская ГРЭС-2	Г-6	18	382,33	0,85	13	0,255	2,23	2,12	0,215	0,215
Сургутская ГРЭС-2	Г-7	18	382,33	0,85	13	0,255	2,23	2,12	0,215	0,215
Тюменская ТЭЦ-1	Г-1-1	10,5	63	0,8	6,76	0,25	2,6	2,6	0,18	0,18
Тюменская ТЭЦ-1	Г-1-2	15,75	160	0,85	7,27	0,17	2,3	2,3	0,13	0,13
Тюменская ТЭЦ-1	Г-2-1	10,5	66	0,8	8,43	0,216	1,913	1,792	0,168	0,178
Тюменская ТЭЦ-1	Г-2-2	15,75	160	0,85	7,27	0,17	2,3	2,3	0,13	0,13
Тюменская ТЭЦ-1	Г-3	10,5	60	0,8	6,6	0,217	1,657	1,657	0,146	0,146
Тюменская ТЭЦ-1	Г-4	10,5	100	0,85	6,67	0,26	1,79	1,79	0,183	0,183
Тюменская ТЭЦ-1	Г-5	10,5	120	0,85	7,8	0,314	2,155	2,155	0,214	0,214

Тюменская ТЭЦ-1	Г-6	10,5	120	0,85	7,8	0,314	2,155	2,155	0,214	0,214
Тюменская ТЭЦ-2	Г-1	15,75	200	0,85	7,5	0,32	1,896	1,896	0,213	0,213
Тюменская ТЭЦ-2	Г-2	15,75	200	0,85	7,5	0,32	1,896	1,896	0,213	0,213
Тюменская ТЭЦ-2	Г-3	15,75	200	0,85	7,5	0,32	1,896	1,896	0,213	0,213
Тюменская ТЭЦ-2	Г-4	15,75	200	0,85	7,5	0,32	1,896	1,896	0,213	0,213
Тобольская ТЭЦ	Г-1	18	160	0,85	6	0,329	2,3	2,3	0,221	0,221
Тобольская ТЭЦ	Г-2	15,75	210	0,85	6,37	0,34	1,997	1,997	0,225	0,225
Тобольская ТЭЦ	Г-3	10,5	100	0,8	6,55	0,314	2,155	2,155	0,214	0,214
Тобольская ТЭЦ	Г-4	18	160	0,85	6	0,329	2,3	2,3	0,221	0,221
Тобольская ТЭЦ	Г-5	10,5	110	0,8	6	0,22	2,6	2,6	0,16	0,16
НВГРЭС=3	Г-1	24	800	0,9	5	0,31	2,33	2,33	0,219	0,219
НВГРЭС=1	Г-2	24	800	0,9	5	0,31	2,33	2,33	0,219	0,219
НяГРЭС=1	Г-1	20	426,7	0,85	11,36	0,4098	2,1826	2,1449	0,3183	0,3161
НяГРЭС=1	Г-2	20	426,7	0,85	11,36	0,4098	2,1826	2,1449	0,3183	0,3161

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Типы систем возбуждения и АРВ генераторов, учтённых в цифровой модели Тюменской энергосистемы.

Название	№ генератора	Тип АРВ	Тип СВ	Tvozb	Umin	Umax
Рефтенская ГРЭС	Г-1	АРВ-СД	СТН	0,04	-1,6	2
Рефтенская ГРЭС	Г-2	АРВ-СДП1	СТН	0,04	-1,6	2
Рефтенская ГРЭС	Г-3	АРВ-СДП1	СТН	0,04	-1,6	2
Рефтенская ГРЭС	Г-4	АРВ-СД	СТН	0,04	-1,6	2
Рефтенская ГРЭС	Г-5	АРВ-СД	СТН	0,04	-1,6	2
Рефтенская ГРЭС	Г-6	АРВ-СДП1	СТН	0,04	-1,6	2
Рефтенская ГРЭС	Г-7	АРВ-СДП1	СТН	0,04	-1,6	2
Рефтенская ГРЭС	Г-8	АРВ-СД	СТН	0,04	-1,6	2
Рефтенская ГРЭС	Г-9	АРВ-СД	СТН	0,04	-1,6	2
Рефтенская ГРЭС	Г-10	АРВ-СД	СТН	0,04	-1,6	2
Сургутская ГРЭС-1	Г-1	АРВ-СД	В/Ч модерн	0,12	0	2
Сургутская ГРЭС-1	Г-2	АРВ-СД	В/Ч модерн	0,12	0	2
Сургутская ГРЭС-1	Г-3	АРВ-СД	В/Ч модерн	0,12	0	2
Сургутская ГРЭС-1	Г-4	АРВ-СД	В/Ч модерн	0,12	0	2
Сургутская ГРЭС-1	Г-5	АРВ-П	В/Ч	0,3	0	2
Сургутская ГРЭС-1	Г-6	АРВ-П	В/Ч	0,3	0	2
Сургутская ГРЭС-1	Г-7	АРВ-СД	СТН	0,04	-1,6	2
Сургутская ГРЭС-1	Г-8	АРВ-СД	СТН	0,04	-1,6	2
Сургутская ГРЭС-1	Г-9	АРВ-2М	СТН	0,04	-1,6	2
Сургутская ГРЭС-1	Г-10	АРВ-СД	СТН	0,04	-1,6	2
Сургутская ГРЭС-1	Г-11	АРВ-СД	СТН	0,04	-1,6	2
Сургутская ГРЭС-1	Г-12	АРВ-СД	СТН	0,04	-1,6	2
Сургутская ГРЭС-1	Г-13	АРВ-СД	СТН	0,04	-1,6	2
Сургутская ГРЭС-1	Г-14	АРВ-СД	СТН	0,04	-1,6	2
Сургутская ГРЭС-1	Г-15	АРВ-СД	СТН	0,04	-1,6	2
Сургутская ГРЭС-1	Г-16	АРВ-СД	СТН	0,04	-1,6	2
Сургутская ГРЭС-2	Г-17	АРВ-СДП1	СТН	0,04	-1,6	2
Сургутская ГРЭС-2	Г-1	АРВ-СДП1	СТН	0,04	-1,6	2
Сургутская ГРЭС-2	Г-2	АРВ-СДП1	СТН	0,04	-1,6	2
Сургутская ГРЭС-2	Г-3	АРВ-2М	СТН	0,04	-1,6	2
Сургутская ГРЭС-2	Г-4	АРВ-СДП1	СТН	0,04	-1,6	2
Сургутская ГРЭС-2	Г-5	АРВ-СДП1	СТН	0,04	-1,6	2
Сургутская ГРЭС-2	Г-6	EX2100				
Сургутская ГРЭС-2	Г-7	EX2100				
Тюменская ТЭЦ-1	Г-1-1	АРВ-2М	СТС	0,04	-2	2,5
Тюменская ТЭЦ-1	Г-1-2	АРВ-2М	СТС	0,04	-2	2,5
Тюменская ТЭЦ-1	Г-2-1	Ansaldo	СТС	0,04	-3,8	4,75
Тюменская ТЭЦ-1	Г-2-2	АРВ-2М	СТС	0,04	-2	2,5
Тюменская ТЭЦ-1	Г-3	АРВ-П	Э/М	0,3	0	2
Тюменская ТЭЦ-1	Г-4	АРВ-П	Э/М	0,3	0	2
Тюменская ТЭЦ-1	Г-5	АРВ-П	Э/М	0,3	0	2

Тюменская ТЭЦ-1	Г-6	АРВ-П	Э/М	0,3	0	2
Тюменская ТЭЦ-2	Г-1	АРВ-СД	СТН	0,04	-1,6	2
Тюменская ТЭЦ-2	Г-2	АРВ-СД	СТН	0,04	-1,6	2
Тюменская ТЭЦ-2	Г-3	АРВ-СДП1	СТС	0,04	-2	2,5
Тюменская ТЭЦ-2	Г-4	АРВ-СД	СТН	0,04	-1,6	2
Тобольская ТЭЦ	Г-1	АРВ-СДП1	СТН	0,04	-1,6	2
Тобольская ТЭЦ	Г-2	АРВ-П	СТН	0,3	0	2
Тобольская ТЭЦ	Г-3	АРВ-2М	СТС	0,04	-2	2,5
Тобольская ТЭЦ	Г-4	АРВ-СДП1	СТН	0,04	-1,6	2
Тобольская ТЭЦ	Г-5	АРВ-2М	СТС	0,04	-2	2,5
НВГРЭС=3	Г-1	АРВ-М	СТН	0,04	-1,6	2
НВГРЭС=1	Г-2	АРВ-СДП1	СТН	0,04	-1,6	2
НяГРЭС=1	Г-1	THYRIPOL				
НяГРЭС=1	Г-2	THYRIPOL				