

На правах рукописи

СОРОКИН Евгений Владимирович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ
АВТОМАТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ СНИЖЕНИЯ ЧАСТОТЫ
И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАРУШЕНИЯХ
БАЛАНСА МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ**

Специальность 05.14.02 – Электростанции
и электроэнергетические системы

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2007

Работа выполнена на кафедре «Электрические системы и сети» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Смоловик Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Булычев Александр Витальевич

кандидат технических наук,
ст. научный сотрудник
Кац Пинкус Янкелевич

Ведущая организация: ОАО «Архэнерго»

Защита состоится «__» _____ 2007 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан «__» _____ 2007 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.229.11
кандидат технических наук, доцент

Попов М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Общероссийские нормы качества электроэнергии предусматривают, что частота в электроэнергетических системах (ЭЭС) должна поддерживаться в диапазоне $50 \pm 0,05$ Гц. Отклонение частоты на $\pm 0,2$ Гц от номинального значения 50 Гц допускается не более 15 мин. Аварийное отклонение частоты ограничивается как по условиям работы основного и вспомогательного оборудования электростанций, так и в соответствии с требованиями ряда потребителей.

Для предотвращения и ликвидации аварийных ситуаций с возникновением опасного дефицита мощности и снижения частоты в отделившемся районе энергосистемы служат устройства автоматического ограничения снижения частоты (АОСЧ): 1) автоматическая частотная разгрузка (АЧР); 2) частотная делительная автоматика (ЧДА); 3) дополнительная автоматическая разгрузка (ДАР) и ряд других. Благодаря действию устройств АОСЧ без участия человека обеспечивается предотвращение и ликвидация аварийных ситуаций, а также восстановление нормального режима работы энергосистемы.

Несмотря на то, что автоматика ограничения снижения частоты успешно эксплуатируется в России и за рубежом много лет, она еще далека от совершенства. Существующий на сегодняшний день стандарт ОАО «СО–ЦДУ ЕЭС» «Технические правила организации в ЕЭС России автоматического ограничения снижения частоты при аварийном дефиците активной мощности (автоматическая частотная разгрузка)» не удовлетворяет требованиям ряда энергосистем. Возникает необходимость в настройке устройств АОСЧ, которая определяется свойствами конкретной энергосистемы. К сожалению, до настоящего времени исследования не завершены в полном объеме и полностью не решены проблемы выбора настроек устройств АОСЧ.

Для выбора настроек устройств АОСЧ используются специализированные программы для ЭВМ, которые позволяют провести достаточно подробные исследования и дать общие рекомендации по улучшению функционирования устройств АОСЧ.

Однако следует отметить, что эти программы имеют ряд недостатков, и, как правило, используют одноузловые модели энергосистемы с устройствами АЧР. На практике система АЧР включает в себя множество отдельных устройств, размещенных в десятках и более узлах схемы. При этом каждое из совокупности устройств АЧР имеет индивидуальные настройки. Таким образом, разработанные программы малоприспособны для эксплуатационных расчетов, анализа объема разгрузки и корректировки существующих настроек устройств АОСЧ в условиях реальных энергосистем.

Следует также отметить, что действующий стандарт не содержит никаких рекомендаций по применению таких устройств, как АЧР, реагирующих на скорость снижения частоты (АЧР–С), АЧР с зависимой выдержкой времени и ряда других. Данные устройства находятся в настоящее время на этапе внедрения. Тем не менее, требуется разработка методики выбора уста-

вок такой разгрузки, оценка возможности ее сочетания с ныне применяемыми устройствами АОСЧ, а также анализ динамики изменения частоты при использовании данного типа устройств.

Цели и задачи работы. Целями работы является разработка подробных математических моделей устройств АОСЧ и исследование процессов динамики изменения частоты в энергосистемах различной структуры для уточнения настроечных параметров, распределения мощностей очередей и выработки рекомендаций по оптимизации параметров устройств. Для достижения поставленных целей решены следующие **задачи**:

1. Проведение теоретического исследования переходных процессов в простейшей энергосистеме с учетом действия устройств АОСЧ при разных аварийных ситуациях, отличающихся между собой величиной дефицита мощности, параметрами настройки устройств АОСЧ и величиной вращающегося резерва мощности.

2. Разработка математических моделей устройств АОСЧ (АЧР, АЧР с зависимой выдержкой времени, АЧР–С, комбинированной АЧР, ЧАПВ и др.), а также моделей нагрузки, отражающих особенности процессов энергосистемы при глубоких снижениях частоты.

3. Разработка методики настройки устройств АОСЧ и получение практических рекомендаций для дефицитных энергосистем (на примере Архангельской ЭЭС).

4. Разработка программы расчета переходных процессов в энергосистеме сложной структуры с учетом действия устройств АОСЧ, предназначенной для эксплуатационных расчетов, научно-исследовательских и проектных проработок.

5. Проведение исследования переходных процессов в эквивалентной схеме Архангельской ЭЭС с учетом действия следующих устройств: 1) АЧР с зависимой выдержкой времени; 2) АЧР–С; 3) АЧР, построенной на комбинации различных факторов и др. для разработки рекомендаций по перспективному развитию эффективной системы АЧР.

6. Разработка методики выбора уставок устройств АЧР с зависимой выдержкой времени, АЧР–С, а также оценка возможности сочетания этих устройств с традиционной разгрузкой, выполненной с совмещением действия АЧР1 и АЧР2.

7. Проведение исследования динамики процесса снижения и восстановления частоты в аварийных условиях при наличии вращающегося резерва мощности на электростанциях и его отсутствии.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Проведен анализ существующих методов настройки устройств АОСЧ и показаны их недостатки.

2. Разработаны математические модели устройств АОСЧ (АЧР, АЧР с зависимой выдержкой времени, АЧР–С, комбинированной АЧР, ЧАПВ и др.), а также модели нагрузки, отражающие особенности процессов энергосистемы при отклонениях частоты.

3. Разработана программа расчета переходных процессов энергосистемы сложной структуры с учетом действия устройств АОСЧ. Программа позволяет учитывать индивидуальные настройки отдельных устройств АОСЧ, размещение по узлам и т. д. Программа предназначена для эксплуатационных расчетов, научно-исследовательских и проектных проработок. Она позволяет оценить эффективность устройств АОСЧ и при необходимости с помощью проведения серии расчетов скорректировать ее уставки, объемы разгрузки и размещение устройств для предотвращения аварийных ситуаций, связанных с нарушениями баланса мощности электроэнергетической системы.

4. Выполнены анализ и обобщение результатов исследования переходных процессов в энергосистеме с учетом действия устройств АОСЧ при различных аварийных ситуациях, отличающихся между собой величиной дефицита мощности, параметрами настройки устройств АОСЧ, а также величиной вращающегося резерва мощности.

5. Показаны достоинства АЧР с зависимой выдержкой времени, АЧР–С и АЧР, построенной на комбинации различных факторов, перед традиционной разгрузкой, выполненной с совмещением действия АЧР1 и АЧР2.

6. Для дефицитных энергосистем разработаны и проверены на практике рекомендации по выбору настроек устройств АОСЧ.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Показаны недостатки существующих устройств АОСЧ, приводящие к глубокому снижению частоты в аварийных ситуациях и затягиванию процесса восстановления частоты в энергосистеме. Даны рекомендации по устранению отмеченных недостатков. Сформулированы требования по настройке устройств АОСЧ, обеспечивающие минимальное понижение и время восстановления частоты.

Разработана методика выбора уставок таких устройств, как АЧР–С, АЧР с зависимой выдержкой времени, комбинированной АЧР. Проведена оценка возможности сочетания такой разгрузки с ныне применяемыми устройствами АОСЧ, а также анализ динамики изменения частоты при использовании данного типа устройств. Результаты теоретических исследований, проведенных на ЭВМ, могут быть использованы на практике в энергосистемах с целью повышения эффективности работы устройств АОСЧ.

Разработанное в ходе выполнения диссертации программное обеспечение, полученные выводы и рекомендации могут быть использованы в проектных и эксплуатационных организациях при реконструкции и проектировании электрических систем переменного тока, в которых возможно возникновение электрических режимов, характеризующихся значительным небалансом мощности, а также при выполнении исследований электромеханических переходных процессов электрических систем и оптимизации показателей переходных процессов при авариях. Разработанное программное обеспечение используется в научной работе кафедры «Электрические системы и сети» СПбГПУ при решении задач анализа и оптимизации переходных процессов существующих и перспективных ЭЭС при возникновении дефицитов

активной мощности, анализа протекания аварий в энергосистемах, связанных со значительными отклонениями частоты. Выработанные в процессе исследований приемы анализа и расчетные методики могут использоваться при рассмотрении перспективных вопросов установки устройств АОСЧ в энергосистемах различной структуры.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на научно-технических конференциях и семинарах, а также на заседании кафедры «Электрические системы и сети» СПбГПУ. По теме диссертации опубликовано четыре печатных работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 80 наименований, приложения. Основная часть работы изложена на 230 страницах и включает в себя 119 рисунков, 28 таблиц и 6 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика проблемы и отражается актуальность тематики диссертации, описывается состояние применения устройств АОСЧ и рассматриваются вопросы, которые исследуются в диссертации, а также общий подход к их решению.

В первой главе приводится классификация устройств АОСЧ, рассматриваются особенности развития и протекания аварийных ситуаций в дефицитных энергосистемах (Архангельской и Коми). Описывается структура Архангельской ЭЭС, а также опыт применения в ней устройств АОСЧ и их недостатки.

Во второй главе рассматриваются математические модели элементов энергосистемы при анализе процессов, связанных с нарушением баланса активной мощности, а также модели устройств АОСЧ (АЧР, АЧР с зависимой выдержкой времени, АЧР–С, комбинированная АЧР, ЧАПВ и др.).

Статорные уравнения всех вращающихся машин (синхронных и асинхронных) записаны с учетом отклонения частоты вращения ротора от синхронной. У асинхронных двигателей учтены зависимости тормозного момента от частоты вращения ротора.

Математические модели синхронных генераторов содержат модели автоматического регулирования возбуждения и частоты вращения. Система возбуждения синхронной машины представлена типовой моделью автоматического регулятора возбуждения сильного действия (описывается дифференциальными уравнениями 6 порядка с учетом ограничений). Действие регулятора возбуждения конкретного типа при моделировании реальных энергосистем осуществлялось заданием соответствующих коэффициентов усиления и постоянных времени.

В диссертации принята следующая модель обобщенной нагрузки, представленной шунтом активной и реактивной проводимости

$$G_n = \frac{R_0 \cdot (1+s)^n}{R_0^2 \cdot (1+s)^2 + X_0^2 \cdot (1+s)^2}; \quad B_n = \frac{X_0}{R_0^2 \cdot (1+s)^2 + X_0^2 \cdot (1+s)^2},$$

где n – показатель степени, $n=2,5-4$.

Численными экспериментами показано, что принятая аппроксимация физически правильно и максимально приближенно к действительности отражает изменение мощности потребителей при изменении частоты.

В третьей главе приведены результаты исследования переходных процессов в энергосистеме простой структуры (рис. 1) с учетом действия устройств АОСЧ при различных аварийных ситуациях, различающихся между собой величиной дефицита мощности, параметрами настройки устройств АОСЧ, а также величиной вращающегося резерва мощности. Описание параметров энергосистемы приводится ниже.

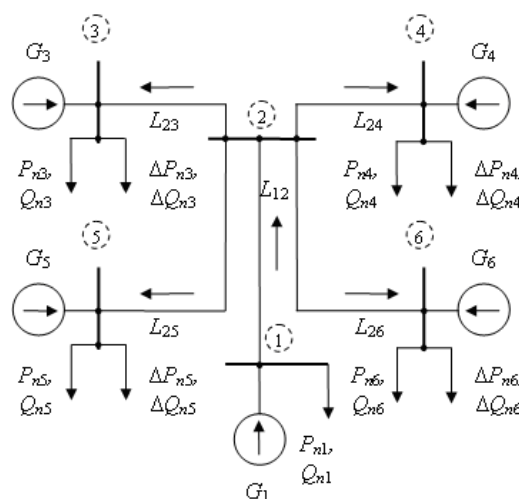


Рис. 1. Схема простейшей ЭЭС

Энергосистема (рис. 1), в состав которой входят четыре электростанции (G_3-G_6) и нагрузки (N_3-N_6), получает часть мощности из энергообъединения (G_1) по линии L_{12} . Мощность подключенной к АЧР нагрузки составляет 50 % от суммарного потребления. Для простоты принято, что вращающийся резерв мощности на всех электростанциях отсутствует. Это допущение вполне оправдано, так как регулировочный диапазон (резерв мощности) ТЭС в ряде энергосистем не превышает 10–15% включенной в работу мощности, в большинстве случаев он значительно меньше этого значения или отсутствует совсем.

Выполнен анализ влияния изменения верхних уставок f_H АЧР1 и АЧР2 на переходный процесс изменения частоты. Уставки устройств АЧР1 и АЧР2 для различных районов приняты следующими: район 3 – $f_{АЧР1}=48,8-46,6$ Гц, $f_{АЧР2}=49,1$ Гц; район 4 – $f_{АЧР1}=48,9-46,7$ Гц, $f_{АЧР2}=49,2$ Гц; район 5 – $f_{АЧР1}=49,0-46,8$ Гц, $f_{АЧР2}=49,3$ Гц; район 6 – $f_{АЧР1}=49,1-46,9$, $f_{АЧР2}=49,4$ Гц. Интервал между очередями по частоте Δf АЧР1 и начальные уставки по времени $t_{НАЧР2}$ очередей АЧР2 приняты при этом одинаковыми.

На рис. 2 приведена зависимость изменения частоты во времени $f=\varphi(t)$ для районов при погашении узла №2 и дефиците активной мощности $\Delta P_r=0,4$.

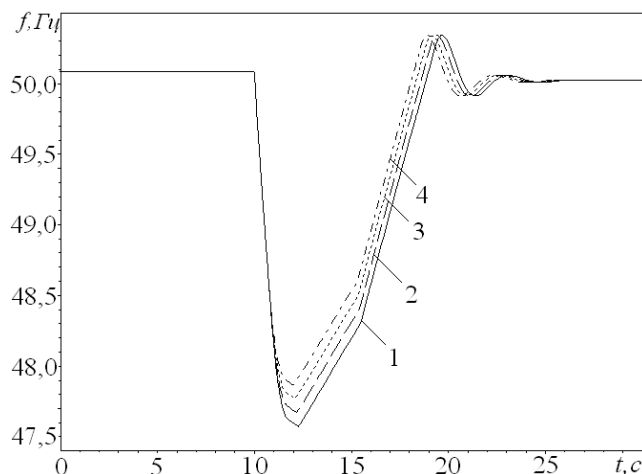


Рис. 2. Зависимости изменения частоты во времени:

1 – $f_{\text{НАЧР1}}=48,8$ Гц, $f_{\text{НАЧР2}}=49,1$ Гц; 2 – $f_{\text{НАЧР1}}=48,9$ Гц, $f_{\text{НАЧР2}}=49,2$ Гц; 3 – $f_{\text{НАЧР1}}=49,0$ Гц, $f_{\text{НАЧР2}}=49,3$ Гц; 4 – $f_{\text{НАЧР1}}=49,1$ Гц, $f_{\text{НАЧР2}}=49,4$ Гц

Как видно из рис. 2, для дефицитных районов, где вращающийся резерв мощности на электростанциях отсутствует, повышение частоты $f_{\text{НАЧР1}}$ и $f_{\text{НАЧР2}}$ на 0,1–0,3 Гц не дает частоте «провалиться» и разгрузка начинает действовать раньше. Таким образом верхний предел уставок по частоте АЧР1 и АЧР2 целесообразно выбирать более высоким ($f_{\text{НАЧР1}}=49,1$ Гц – для АЧР1, $f_{\text{НАЧР2}}=49,4$ Гц – для АЧР2). Следует отметить, что опыт эксплуатации устройств АОСЧ в дефицитных энергосистемах ОЭС Центра, Средней Волги и Урала подтверждает сделанный вывод.

В этой же главе показано, что рекомендация задержки начальной уставки по времени АЧР2 $t_{\text{НАЧР2}}$ на 10–20 с является завышенной и неоправданной. АЧР1 завершает свое действие за 3–4 с, поэтому время $t_{\text{НАЧР2}}$ должно быть не более 5 с. Таким образом, целесообразным следует признать следующие уставки АЧР2: $t_{\text{НАЧР2}}=5$ сек, $\Delta t=5$ сек.

Рассмотрено влияние изменения интервала между очередями по частоте Δf АЧР1 и, как следствие, плотности разгрузки $k_p=(\Delta P_p/\Delta f)$ (отношение мощности разгрузки АЧР ΔP_p к диапазону изменения частоты f_n-f_k) на переходный процесс изменения частоты. Уставки устройств АЧР1 для различных районов приняты следующими: район 3 – $f_{\text{АЧР1}}=48,8$ –46,6 Гц, $\Delta f=0,2$ Гц; район 4 – $f_{\text{АЧР1}}=48,8$ –47,15 Гц, $\Delta f=0,15$ Гц; район 5 – $f_{\text{АЧР1}}=48,8$ –47,7 Гц, $\Delta f=0,1$ Гц; район 6 – $f_{\text{АЧР1}}=48,8$ –48,25 Гц, $\Delta f=0,05$ Гц. Значение плотности разгрузки k_p для различных районов при заданном диапазоне изменения частоты $f_{\text{НАЧР1}}-f_{\text{КАЧР1}}$ и мощности нагрузки АЧР $\Delta P_p=50$ % составит: район 3 – $k_p=11$; район 4 – $k_p=15$; район 5 – $k_p=22$; район 6 – $k_p=45$. Значения уставок очередей АЧР2 по частоте и времени приняты при этом одинаковыми.

На рис. 3 приведена зависимость изменения частоты во времени $f=\varphi(t)$ для районов при погашении узла №2 и дефиците мощности $\Delta P_r=0,4$ о. е.

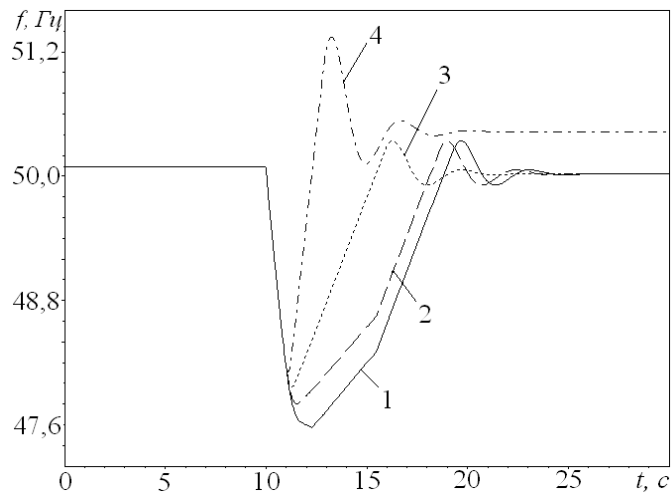


Рис. 3. Зависимости $f=\varphi(t)$:
1 $-k_p=11$; 2 $-k_p=15$; 3 $-k_p=22$; 4 $-k_p=45$

Как видно из рис. 3, плотность разгрузки k_p оказывает существенное влияние на переходный процесс изменения частоты $f=\varphi(t)$. Во-первых, увеличение плотности разгрузки k_p уменьшает отклонение частоты от допустимых значений и, как следствие, повышает минимальное значение частоты $f_{\text{мин}}$, которое достигается в переходном процессе. Во-вторых, с увеличением плотности разгрузки k_p происходит более быстрое завершение переходного процесса изменения частоты $f=\varphi(t)$.

Таким образом, увеличение плотности разгрузки k_p обуславливает положительные изменения характера переходного процесса. Однако, исследование динамики действия АЧР1 показывают, что с увеличением k_p возникает «перерегулирование» частоты в процессе отключения потребителей, что особо заметно при плотностях $k_p > 22$. При плотностях $k_p \geq (7-10)$ «перерегулирование» частоты проявляется слабо и корректировку уставки последних очередей АЧР1 (уменьшение диапазона $f_n - f_k$ за счет сокращения интервала между очередями АЧР1) следует признать целесообразной.

После того, как выбраны объемы разгрузки, они могут быть распределены по очередям различными способами. В большей степени на характер переходного процесса изменения частоты оказывает влияние характер распределения нагрузки по очередям АЧР1. Выполнено сопоставление нескольких различных вариантов распределения: 1) – равномерное распределение нагрузки по очередям АЧР1; 2) – с подключением основной части нагрузки к первым очередям (к первым шести очередям подключается 75 % от общего объема разгрузки); 3) – с подключением основной части нагрузки к последним очередям (к последним шести очередям подключается 75 % от общего объема разгрузки); 4) – с подключением основной части нагрузки к средним очередям.

На рис. 4 приведены зависимости изменения частоты во времени при погашении узла №2 и дефиците активной мощности $\Delta P_r=0,2$ при различных вариантах распределения нагрузки по очередям АЧР1.

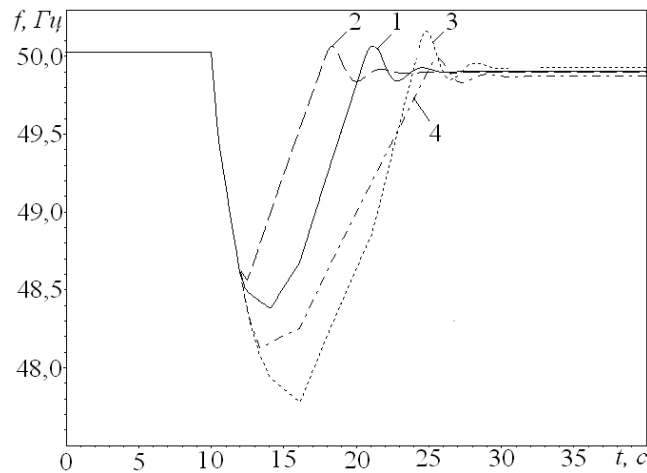


Рис. 4. Зависимости изменения частоты во времени:

1 – равномерное; 2 – с подключением основной части нагрузки к первым очередям; 3 – с подключением основной части нагрузки к последним очередям; 4 – с подключением основной части нагрузки к средним очередям

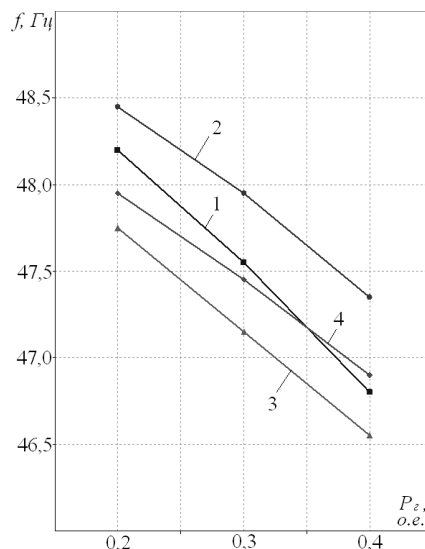


Рис. 5. Зависимость минимального значения частоты в переходном процессе от дефицита мощности:

1 – равномерное; 2 – с подключением основной части нагрузки к первым очередям; 3 – с подключением основной части нагрузки к последним очередям; 4 – с подключением основной части нагрузки к средним очередям

На рис. 5 приведены зависимости минимального значения частоты $f_{\text{мин}}$ в переходном процессе от дефицита ΔP_r при различных вариантах распределения нагрузки по очередям АЧР1. Как видно из рис. 5, приемлемое качество переходного процесса и наибольшее минимальное значение частоты $f_{\text{мин}}$ имеет место при подключении основного объема к первым очередям АЧР1.

Отключение потребителей быстродействующими очередями АЧР1 происходит с некоторым запаздыванием Δt . Учитывая, что время срабатыва-

ния реле частоты устройства АЧР $t_p=0,15-0,2$ с, время действия выключателя $t_b=0,15-0,2$ с, при полном исключении выдержки времени устройства $t_{p,b}=0$ минимальное значение Δt составит $0,3-0,4$ с.

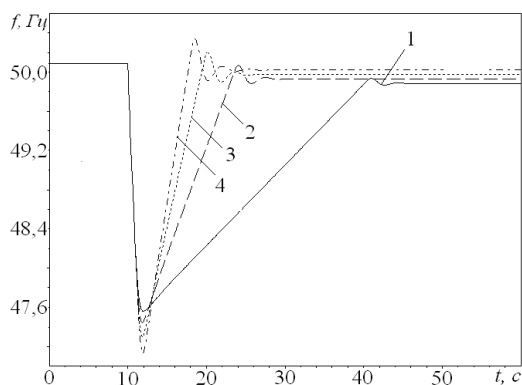


Рис. 6. Зависимости изменения частоты во времени:
1 – $\Delta t=0,3$ с; 2 – $\Delta t=0,4$ с; 3 – $\Delta t=0,5$ с; 4 – $\Delta t=0,6$ с

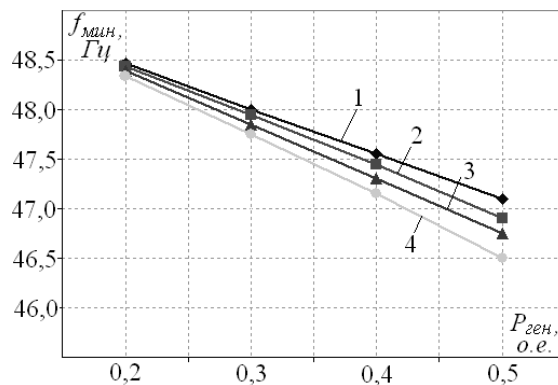


Рис. 7. Зависимость минимального значения частоты от дефицита мощности:
1 – $\Delta t=0,3$ с; 2 – $\Delta t=0,4$ с; 3 – $\Delta t=0,5$ с; 4 – $\Delta t=0,6$ с

На рис. 6 приведены зависимости изменения частоты во времени для районов при погашении узла №2 ($\Delta P_r=0,3$) при различном запаздывании в отключении потребителей. Как видно из рис. 6, запаздывание в отключении потребителей оказывает существенное влияние на переходный процесс изменения частоты $f=\varphi(t)$ при действии АЧР1.

При $\Delta t=0,3-0,6$ с запаздывание в отключении потребителей при работе очередей АЧР1 приводит при больших дефицитах мощности к «перерегулированию», т. е. кратковременному снижению частоты в переходном процессе до очередей АЧР1 с более низкими уставками по частоте, чем это было бы при $\Delta t=0$, а при особо больших дефицитах – ниже уставок АЧР1.

В качестве иллюстрации этого явления на рис. 7 построены зависимости минимального значения частоты f_{\min} в переходном процессе от значения дефицита мощности ΔP_r при различных временах запаздывания Δt отключения потребителей очередями АЧР1. Как видно из рис. 7, величина f_{\min} тем ниже, чем больше Δt .

Так же в этой главе проведено исследование переходных процессов с учетом действия АЧР с зависимой выдержкой времени и АЧР-С.

Выполнение аварийной разгрузки по скорости снижения частоты дает возможность произвести отключение потребителей раньше, чем это сделает разгрузка по абсолютному значению частоты, и тем самым получить более высокие значения частоты в переходном процессе.

При выполнении разгрузки с зависимой выдержкой времени отключение потребителей при работе очередей, действующих как АЧР1, произойдет несколько быстрее, нежели это происходит в обычных устройствах АЧР1, когда уставки очередей АЧР1 остаются неизменными. Кроме того, при работе такой разгрузки всегда будет соблюдаться порядок отключения потребителей по мере роста их ответственности.

В качестве примера на рис. 8 показаны зависимости изменения частоты в переходном процессе при использовании традиционной АЧР, АЧР с зависимой выдержкой времени и АЧР-С.

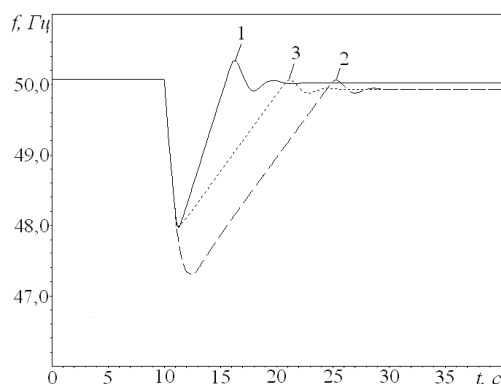


Рис. 8. Зависимости изменения частоты во времени: 1 – традиционная АЧР; 2 – АЧР с зависимой выдержкой времени; 3 – АЧР-С

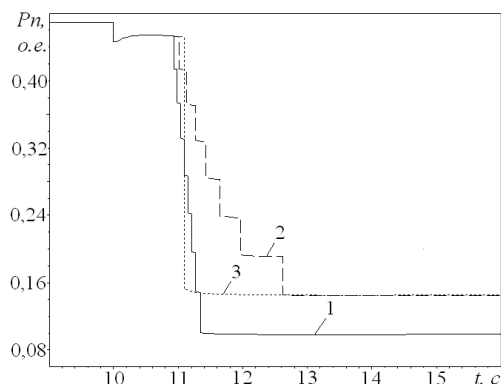


Рис. 9. Зависимости изменения мощности нагрузки, подключенной к АЧР: 1 – традиционная АЧР; 2 – АЧР с зависимой выдержкой времени; 3 – АЧР-С

Как видно из рис. 8, при использовании АЧР-С минимальное значение частоты $f_{\text{мин}}$ в переходном процессе повышается и происходит более быстрое восстановление частоты. Кроме того, применение АЧР с зависимой выдержкой времени и АЧР-С не приводит к «перерегулированию» частоты и излишнему отключению потребителей (рис. 9), а также позволяет несколько сократить частотно-временную зону по сравнению с совмещенным принципом выполнения разгрузки.

В четвертой главе приводится методика и последовательность расчета аварийной разгрузки (на примере Архангельской ЭЭС), а также определение зависимости изменения частоты во времени $f=\varphi(t)$ после возникновения дефицита мощности и действия разгрузки в различных режимах работы Архангельской ЭЭС.

В качестве дополнительных мероприятий для повышения эффективности АОСЧ в Архангельской ЭЭС рассматриваются следующие: 1) – применение АЧР с зависимой выдержкой времени; 2) – замена последних очередей АЧР1 (с уставками ниже 47,5 Гц) на АЧР с зависимой выдержкой времени; 3) – применение АЧР-С; 4) – применение комбинированной разгрузки.

Рассмотрим применение комбинированной разгрузки, когда традиционная разгрузка совмещается с АЧР-С, а последние очереди АЧР1 (с уставками ниже 47,5 Гц) заменяются на АЧР с зависимой выдержкой времени.

В качестве аварийной ситуации рассмотрим выделение Архангельского энергоузла на изолированную работу с дефицитом активной мощности $\Delta P_r=45\%$. При дефиците мощности $\Delta P_r=45\%$ работа устройств АЧР с зависимой выдержкой времени несколько повышает минимальное значение частоты $f_{\text{мин}}$, а также дает более приемлемое качество переходного процесса (кривая 2, рис. 10). Работа устройств АЧР-С, входящих в комбинированную АЧР, при дефиците мощности $\Delta P_r=45\%$ еще несколько повышает мини-

мальное значение частоты f_{\min} (кривая 3, рис. 10). При дефиците мощности $\Delta P_r=50\%$ срабатывают все очереди устройства АЧР–С, а также часть устройств АЧР с зависимой выдержкой времени, и потребителей отключается несколько больше, чем при ликвидации аварии традиционной АЧР. Однако следует отметить, что при работе комбинированной АЧР частота восстанавливается в течение 15–20 с и становится возможным обратное включение ответственных потребителей устройствами ЧАПВ.

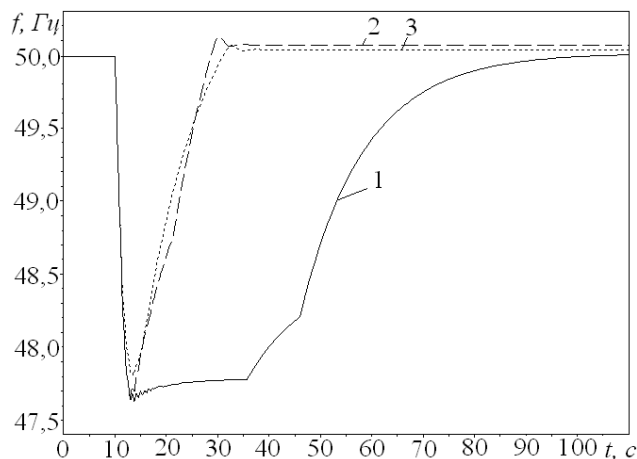


Рис. 10. Зависимости изменения частоты во времени:

1 – традиционная АЧР; 2 – выполнение АЧР с совмещением действия АЧР1, 2 и заменой устройств АЧР1 ($f_{уст} \leq 47,5$ Гц) на АЧР с зависимой выдержкой времени; 3 – комбинированная АЧР

В пятой главе рассматривается программа расчета электромеханических переходных процессов, разработанная при участии автора на кафедре «Электрические системы и сети» СПбГПУ. Программа обладает всеми необходимыми функциональными возможностями, ориентированными на задачи эксплуатации ЭЭС, и позволяет проводить расчеты длительных переходных процессов, связанных с дефицитом (избытком) активной мощности и работой устройств АОСЧ.

В этой же главе иллюстрируется работа программы на примере аварийной ситуации, имевшей место в Архангельской ЭЭС, приводятся ее краткая характеристика, план размещения устройств АОСЧ, а также упрощенные блоки расчета устройств АОСЧ.

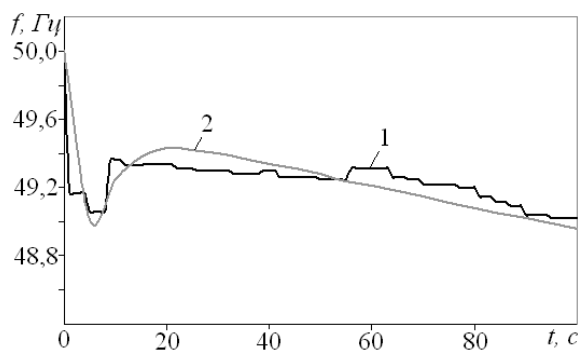


Рис. 11. Зависимость изменения частоты во времени:

1 – авария; 2 – расчет

На рис. 11 в качестве примера приведены результаты расчета по этой программе и произведено их сопоставление с реальным процессом в энергосистеме, которое дает достаточно хорошее совпадение.

В этой же главе рассматривается влияние вращающегося резерва мощности на электростанциях на динамику изменения частоты (рис. 12).

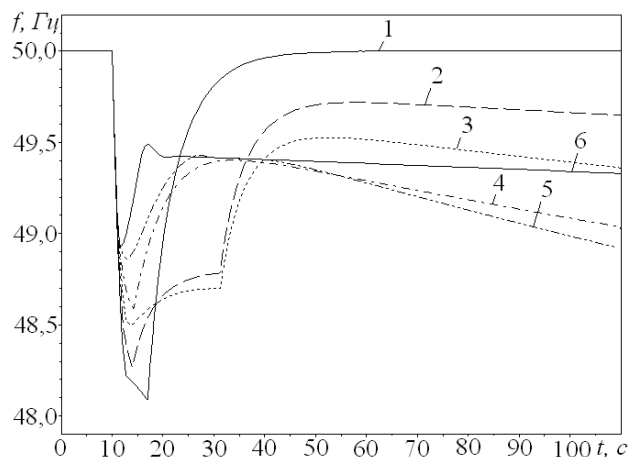


Рис. 12. Изменение частоты при наличии вращающегося резерва мощности на электростанциях:

1 – отсутствует; 2 – 0,06 о. е.; 3 – 0,11 о. е.; 4 – 0,16 о. е.; 5 – 0,22 о. е.; 6 – 0,28 о. е

Из рис. 12 видно, что наличие вращающегося резерва мощности на электростанциях позволяет повысить минимальное значение частоты $f_{\text{мин}}$ во время переходного процесса, а также избежать срабатывания устройств АЧР1(2) и тем самым существенно уменьшить объем отключаемой нагрузки.

В этой же главе показано, что для успешной ликвидации аварийной ситуации со снижением частоты в Архангельской ЭЭС к устройствам АОСЧ необходимо подключить не менее 60 % суммарной мощности нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ реальных аварийных ситуаций со снижением частоты, а также существующих способов реализации устройств АОСЧ на примере Архангельской ЭЭС. Показаны недостатки устройств АОСЧ, приводящие к глубокому снижению частоты в аварийных ситуациях и затягиванию процесса восстановления частоты в энергосистеме. Приведены практические рекомендации по устранению отмеченных недостатков.

2. Разработана модель нагрузки, а также модели устройств АОСЧ (АЧР, АЧР с зависимой выдержкой времени, АЧР-С, ЧАПВ и др.) для анализа длительных переходных процессов при значительных дефицитах мощности.

3. Рассмотрено влияние различных настроек устройств АОСЧ на переходный процесс изменения частоты. Произведено сравнение процессов снижения частоты в энергосистеме при различном числе ступеней разгрузки, плотности разгрузки, времени запаздывания в канале отключения потреби-

телей, распределении объема разгрузки по очередям, наличии вращающегося резерва и его отсутствию и т. д.

4. Проведена серия экспериментов на математической модели Архангельской ЭЭС с применением перспективных устройств АЧР (АЧР–С, АЧР с зависимой выдержкой времени, комбинированной АЧР и других). Полученные результаты показали, что использование перечисленных устройств обуславливает ряд преимуществ перед традиционной системой организации аварийной частотной разгрузки.

5. Разработана методика выбора уставок АЧР–С, АЧР с зависимой выдержкой времени; выполнена оценка возможности их сочетания с ныне применяемыми устройствами АОСЧ, а также проведен анализ динамики изменения частоты при использовании данного типа устройств.

6. Разработана программа расчета переходных процессов с учетом действия устройств АОСЧ, предназначенная для эксплуатационных расчетов, научно-исследовательских и проектных проработок, которая позволяет оценить эффективность устройств АОСЧ и при необходимости с помощью проведения серии расчетов скорректировать ее уставки, объемы разгрузки и размещение устройств. Результаты расчета электромеханических переходных процессов по этой программе при аварийной ситуации в Архангельской ЭЭС дают достаточно хорошее совпадение с реальным процессом.

7. Проведена серия экспериментов на математической модели Архангельской ЭЭС для изучения динамики снижения частоты. Результаты исследований на ЭВМ подтверждают, что для получения приемлемого качества переходного процесса изменения частоты следует рекомендовать следующие уставки устройств АОСЧ: верхний предел уставок по частоте АЧР1 и АЧР2 целесообразно выбирать $f_{nmax}=49,1$ Гц – для АЧР1, $f_{nmax}=49,4$ Гц – для АЧР2; количество очередей для устройств разгрузки $n_{АЧР}=10-15$; основной объем разгрузки (75%) следует подключать к первым очередям; выдержка времени устройств разгрузки должна выбираться минимальной $\Delta t=0,15$ с. Рекомендуется также замена устройств АЧР1 (с уставками ниже 47,5 Гц) на АЧР с зависимой выдержкой времени, а также применение АЧР–С и комбинированной АЧР.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *Сорокин Е.В.* Моделирование алгоритмов автоматической частотной разгрузки при исследовании переходных процессов электроэнергетических систем / А.Н. Беляев, С.В. Смолвик, Е.В. Сорокин // Материалы X Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах». 18.05–19.05.2006, Санкт–Петербург. СПб. Изд-во СПбГПУ. - 2006. - С. 262–263.
2. *Сорокин Е.В.* Проблема обеспечения эффективности аварийной частотной разгрузки на примере Архангельской ЭЭС // Материалы X Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фунда-

- ментальные исследования в технических университетах». 18.05–19.05.2006, Санкт–Петербург. СПб. Изд-во СПбГПУ. - 2006. - С. 288–289.
3. *Сорокин Е.В.* Математическое моделирование автоматической частотной разгрузки с зависимой выдержкой времени// Научно-технические ведомости СПбГПУ № 6-1 (48), 2006. СПб. Изд-во СПбГПУ. - 2006. - С. 58–62.
 4. *Сорокин Е.В.* Автоматическая частотная разгрузка с зависимой выдержкой времени// Материалы XI Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах». 18.05–19.05.2007, Санкт–Петербург. СПб. Изд-во СПбГПУ. - 2007. - С. 547–553.