

Московский энергетический институт

Основатель Московского энергетического института и кафедры теоретических основ электротехники МЭИ
Карл Адольфович Круг

Газодинамической лаборатории кафедры паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева НИУ «МЭИ» – 65 лет

Исследование температурного состояния проточной части паровой турбины Т-125/150 ПГУ-450 при работе её в беспаровом и моторном режимах

Организация непрерывного контроля и учёта вредных выбросов в атмосферу на ТЭС

Новые паровые глушители МЭИ

Вместе с электроэнергетикой и электротехникой

Методики анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения СГ и примеры их использования в режиме реального времени

Особенности пуска энергоблока ПГУ с помощью аварийной дизельной электростанции

Оптимизация режима электрической сети по реактивной мощности критериальным методом

Московской школе энергетиков семьдесят лет (репринт статьи из журнала «Электрические станции», 1975, № 12)

ХРОНИКА

Не разорваны узы студенческой дружбы

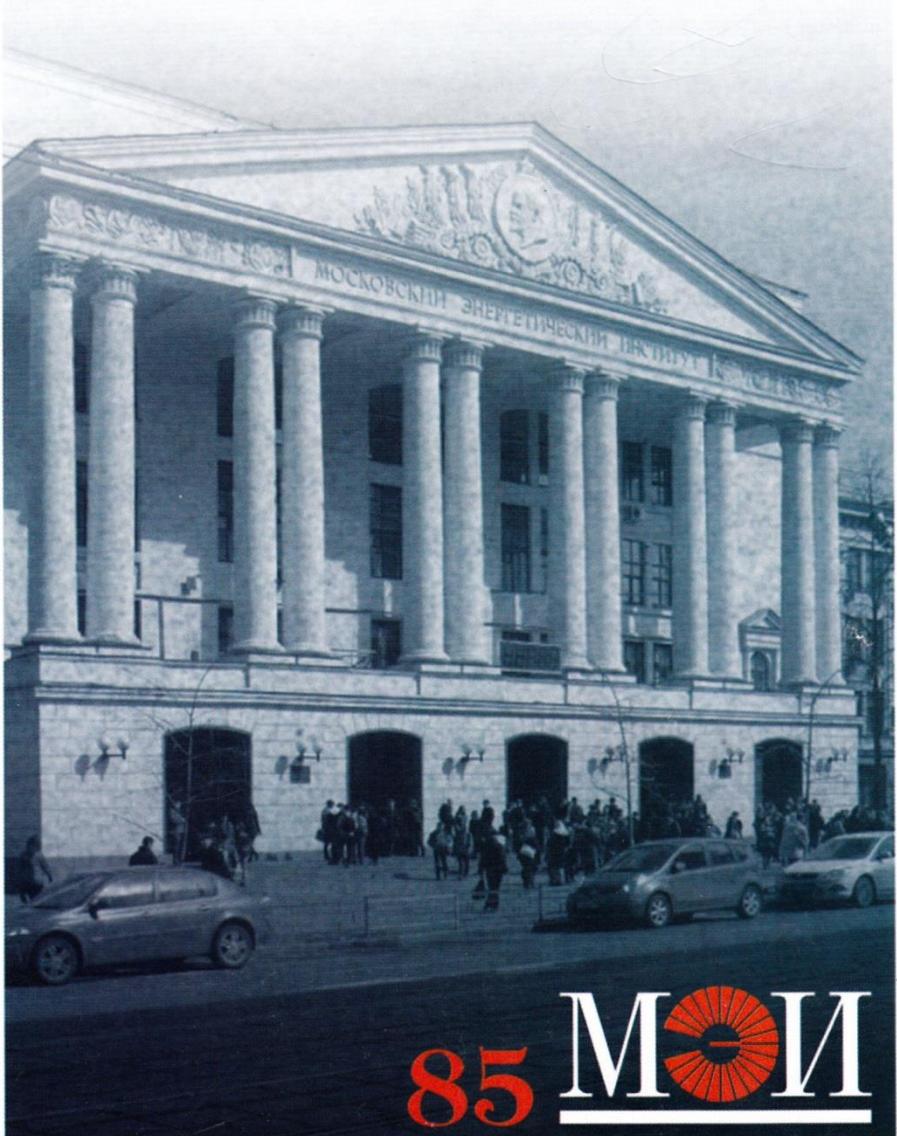
Новости электротехнических и электроэнергетических компаний

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО СТАНЦИИ

ISSN 0201-4564

2015 6



85 МОИ

Методики анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения СГ и примеры их использования в режиме реального времени

- Дьяков А.Ф., доктор техн. наук, чл.-кор. РАН, Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”, Москва
- Климова Т.Г.¹, канд. техн. наук, Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”, Москва
- Максимов Б.К., доктор техн. наук, Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”, Москва

Представлены методики, необходимые для определения областей устойчивости и получения оптимальных по заданному критерию параметров автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов, работающих в различных распределенных сетях. Методики проверены в специализированном программно-аппаратном комплексе в условиях, близких к реальным.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс реального времени, автоматический регулятор возбуждения, синхронный генератор, области устойчивости, оптимальная настройка.

На кафедре релейной защиты и автоматизации энергосистем (РЗиАЭс) НИУ “МЭИ” в научно-образовательном центре “Надёжность и эффективность РЗА, ПА и телекоммуникаций в интеллектуальной электроэнергетической системе с активно-адаптивными сетями” установлен специализированный программно-аппаратный комплекс RTDS (Real-Time Digital Simulator), позволяющий исследовать действующие и новые микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (УРЗА) в реальном режиме времени, моделировать события и явления в ЭЭС с физическим подключением УРЗА, создавать новые методики исследования и настроек устройств и проверять эти методики в условиях, близких к реальным.

Предметом статьи являются разработанные на кафедре методики исследования и настройки автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) синхронных генераторов (СГ) отечественного и зарубежного производства в соответствии с требованиями стандарта ОАО “СО ЕЭС” [1] и примеры их использования при проверке функционирования автоматических регуляторов возбуждения и выборе параметров настройки АРВ синхронного генератора конкретной электростанции.

Для проведения контрольных расчётов электромеханических переходных процессов (ПП) и устойчивости необходимо адекватно описывать различные типы АРВ и создавать их математические модели. В АРВ сильного действия синхронного генератора российского производства в качестве входных параметров каналов стабилизации могут применяться первая производная (скорость изменения) напряжения статора синхронного генера-

тора и первая производная тока ротора (каналы внутренней стабилизации), отклонение частоты напряжения статора синхронного генератора и её первая производная (каналы внешней стабилизации). В АРВ зарубежного производства в качестве входных параметров системного стабилизатора могут применяться частота вращения ротора и электрическая мощность генератора [1].

В работе основным способом проверки методик анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения и их настройки является исследование работы АРВ в цифровой модели энергосистемы, реализованной с использованием RTDS, достаточно нового инструмента моделирования. RTDS позволил провести необходимые исследования в реальном времени с физическим подключением АРВ.

Разработаны и проверены следующие методики: создания тестовых схем для сертификации АРВ и схем энергосистем для получения рабочих

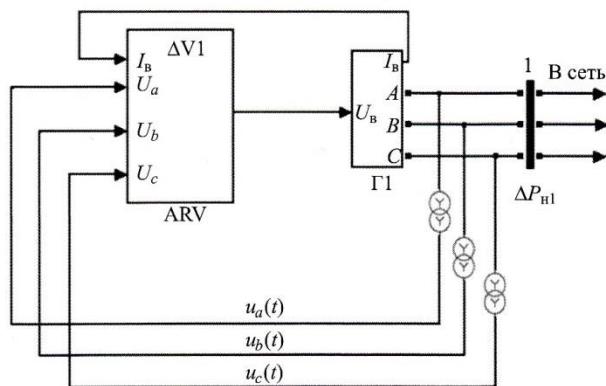


Рис. 1. Структурная схема АРВ

¹ Климова Татьяна Георгиевна: tgklim@mail.ru

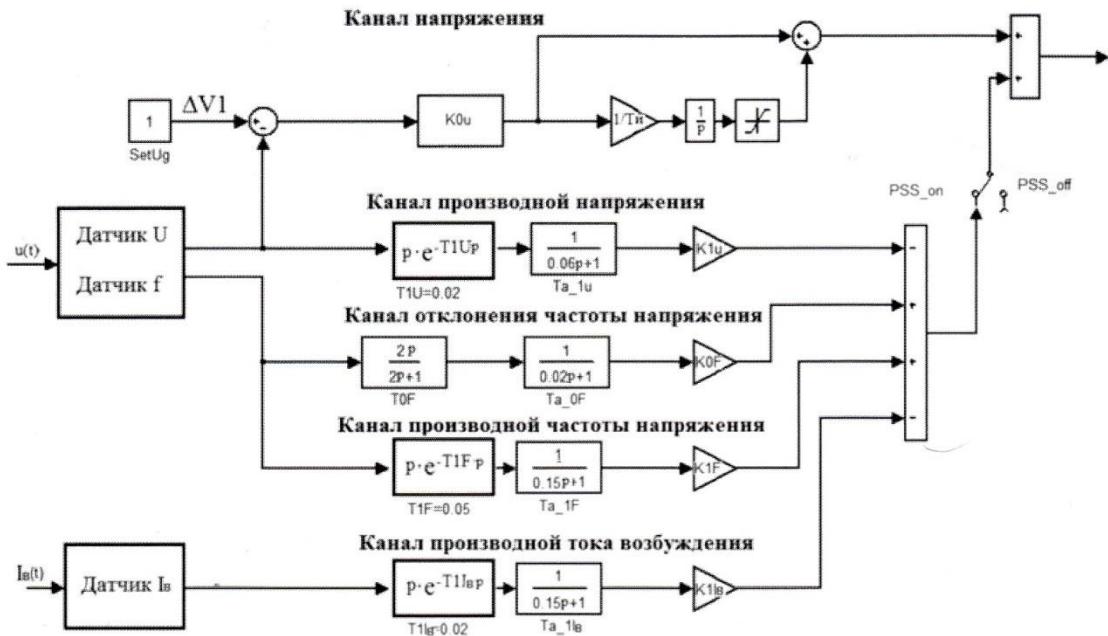


Рис. 2. Математическая модель автоматического регулятора возбуждения типа APB-3МТ

настроек APB (в методике показывается выбор элементов, позволяющих максимально выявить особенности работы APB в различных ситуациях [3]);

оценки качества функционирования устройств APB в соответствии с требованиями СТО ОАО “СО ЕЭС” [1] (в методике предлагаются различные способы количественной оценки параметров переходных процессов и наглядного представления информации о них [4]);

верификации (формирования и подтверждения правильности) математических моделей микропроцессорных устройств APB (в методике представлены четыре способа экспериментального получения частотных характеристик APB, учитывающие различные технические возможности регулятора, их аппроксимация – определение по частотным характеристикам передаточных функций каналов – и проверка правильности полученной математической модели [5]);

количественной оценки влияния структуры и параметров APB на параметры переходных процессов в ЭЭС [6];

определения областей устойчивости по необходимым наборам коэффициентов каналов APB;

определения оптимальных настроек APB, обеспечивающих наилучшее демпфирование переходных процессов заданного режимного параметра при тестовых, нормативных аварийных возмущениях.

Разработанные методики определения областей устойчивости APB и выбора его настроек для конкретной электростанции позволяют определить области устойчивости и параметры опти-

мальной настройки APB синхронного генератора по любым требуемым параметрам APB российского и зарубежного производства и различным параметрам стабилизации в соответствии с требованиями стандарта [1]. Рассмотрение данных методик проведено на примере исследования и настройки регулятора типа AVR-3МТ [7] российского производства, работающего в АСР (автоматическая система регулирования), рис. 1. Настройка регулятора должна обеспечивать минимизацию колебаний частоты напряжения на шинах генератора при различных возмущениях. Другими словами, необходимо определить параметры каналов APB (рис. 2), обеспечивающие наилучшее демпфирование колебаний частоты на шинах генератора в переходных процессах.

В APB элемент 1 задаёт предписанное значение амплитуды выходного напряжения, при этом реализуется АСР по отклонению выходного параметра от предписанного значения. Для аналитического исследования таких систем необходимо знать точное описание всех звеньев АСР (APB и СГ, работающего на распределённую сеть), что нереально в сложных энергетических системах. Наиболее целесообразными и эффективными методами исследования в данной ситуации являются использования частотных методов анализа с применением экспериментально полученных частотных характеристик СГ, работающего в различных схемах.

Работа генератора рассматривается в двух схемах сети, представленных на рис. 3 (а – нормальный режим, б – ремонтный режим), отключённые линии показаны пунктиром. Эти схемные ситуа-

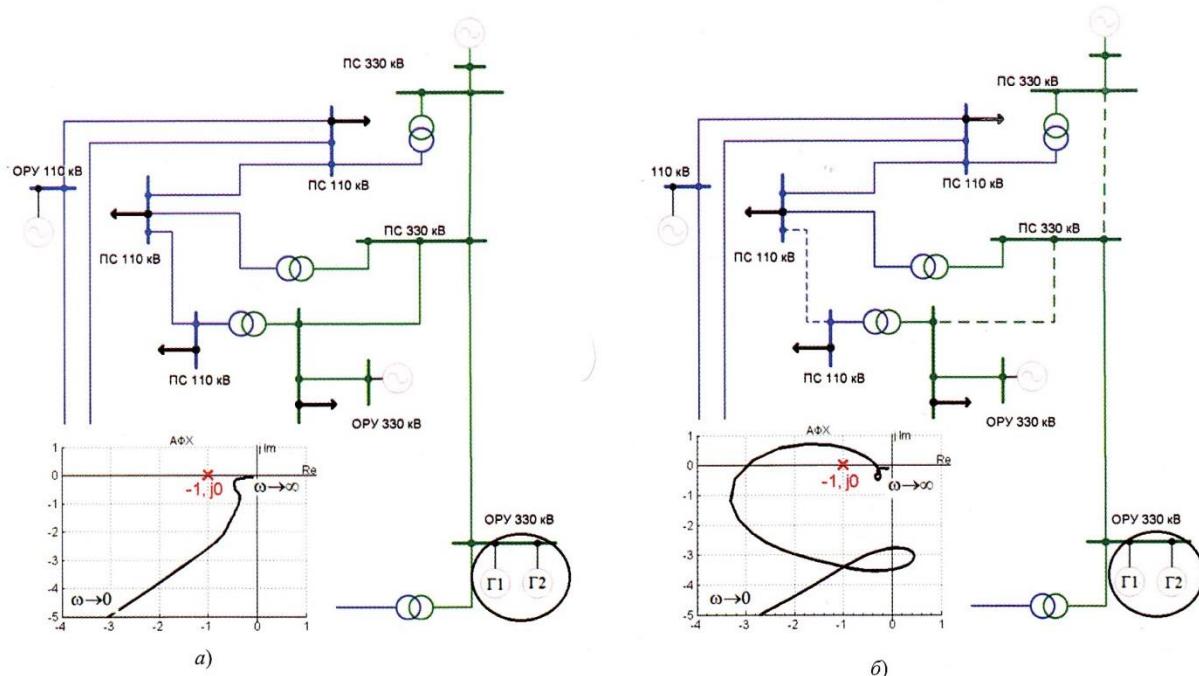


Рис. 3. Схема сети нормального режима и АФХ разомкнутой АСР (а) и схема ремонтного режима и АФХ разомкнутой АСР (б)

ции существенно различаются по своим характеристикам.

При использовании амплитудно-частотной (АЧХ) и фазно-частотной характеристик (ФЧХ) элементов АСР, полученных экспериментально в соответствии с методикой [5], построены амплитудно-фазовые характеристики (АФХ) разомкнутых АСР (рис. 3) в двух схемно-режимных ситуациях. При этом в АРВ отключены каналы стабилизации, в работе находится только канал напряжения. В соответствии с критерием Найквиста можно утверждать, что в схеме нормального режима АСР устойчиво работает и при использовании только рабочего канала напряжения, а в ситуации ремонтного режима АСР является неустойчивой. Необходимо определить оптимальные настройки каналов АРВ, дающих наилучшее качество переходного процесса, в выбранных схемно-режимных ситуациях. Под наилучшим качеством ПП понимается минимум его длительности, минимум перерегулирования и максимум коэффициента демпфирования [8, 9].

Этапы настройки АРВ:

экспериментальное определение частотных характеристик (рис. 4), знание которых необходимо для настройки АСР;

формирование функционала (величины, зависящей от нескольких функций) оптимальной настройки АРВ, включающего все параметры переходного процесса (длительность ПП, перерегулирование и коэффициент демпфирования);

настройка канала напряжения: определение области устойчивости по коэффициентам K_{0i} и T_i

(рис. 2) и выбор их значений для дальнейшего использования;

настройка каналов внутренней стабилизации (к каналам внутренней стабилизации относятся каналы производной напряжения и производной тока возбуждения): определение области устойчивости по коэффициентам усиления этих каналов K_{1U} и K_{1Iv} и выбор значений этих коэффициентов;

настройка каналов внешней стабилизации (к каналам внешней стабилизации относятся каналы отклонения частоты напряжения и производной частоты напряжения): определение области устойчивости по коэффициентам усиления этих каналов K_{0F} и K_{1F} и выбор значений этих коэффициентов;

уточнение параметров настройки.

Последовательность настройки графически показана на рис. 5. Здесь тонкие линии отмечают одинаковые значения составленного функционала, которые характеризуются числом. На рис. 5, а представлена область устойчивости по коэффициентам усиления канала напряжения K_{0i} и постоянной интегрирования T_i . Область устойчивости рассчитывается при отключённых каналах стабилизации. Увеличение коэффициента K_{0i} приводит к увеличению быстродействия АСР, однако уменьшает запас устойчивости и увеличивает колебательность переходных процессов.

С точки зрения обеспечения устойчивости на первом этапе настройки (рис. 5, а) существует большая степень свободы выбора параметров, выбор ограничен допустимым значением функционала (или длительностью ПП, перерегулированием и коэффициентом демпфирования). Далее ис-

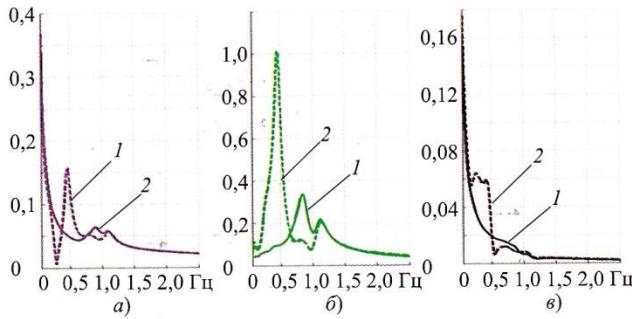


Рис. 4. Экспериментальные АЧХ преобразования напряжения возбуждения U_b :

a – в ток возбуждения I_b ; b – в частоту f_g напряжения на шинах Г1; c – в амплитуду U напряжения генератора; 1 – нормативный режим (схема рис. 3, a); 2 – ремонтный режим (схема рис. 3, b)

пользуются типовые значения коэффициентов $K0u = 15$ и $Tu = 2$ с [7]. Все типовые настройки отмечаются маркером (красный крестик). Выбранная точка является начальной точкой (отмечено красной окружностью) для следующей области устойчивости (рис. 5, b) по коэффициентам усиления каналов внутренней стабилизации $K1U$ и $K1Ib$.

Добавление канала производной напряжения формирует ПИД-регулятор (пропорциональный интегральный дифференциальный регулятор). Область устойчивости по коэффициентам усиления каналов внутренней стабилизации $K1U$ и $K1Ib$ показана на рис. 5, b . Увеличение коэффициентов $K1U$ и $K1Ib$ уменьшает амплитуду колебания час-

тоты на резонансных частотах, однако увеличивает перерегулирование напряжения.

Значения коэффициентов каналов, выбранные по областям рис. 5, a , b определяют начальную точку (отмечена красной окружностью) области устойчивости по коэффициентам усиления каналов внешней стабилизации $K0F$ и $K1F$ (рис. 5, b). Минимизация функционала оптимальности даёт значения рассматриваемых коэффициентов, отмеченные маркером (зелёный крестик).

Выбранные значения коэффициентов усиления каналов внешней стабилизации $K0F$ и $K1F$ являются оптимальными при выбранных ранее коэффициентах канала напряжения и каналов внутренней стабилизации по условию минимизации функционала оптимальности для схемы нормального режима (рис. 3, a).

Поскольку схемные ситуации для электростанции меняются, необходимо провести настройки для всех возможных схемно-режимных ситуаций и выбрать значения коэффициентов всех каналов, обеспечивающих минимум функционала оптимизации во всех возможных случаях. Ремонтная схема электроснабжения (рис. 3, b) соответствует одному из самых тяжёлых режимов работы электростанции. Процесс настройки АРВ для этой ситуации показан на рис. 6.

При типовых значениях коэффициентов $K0u$ и Tu АСР является неустойчивой. Область устойчивости по этим коэффициентам не включает данную точку, отмеченную на рис. 6, a красным крестиком. При начальной настройке может быть выбрана одна из точек (красная точка) области устой-

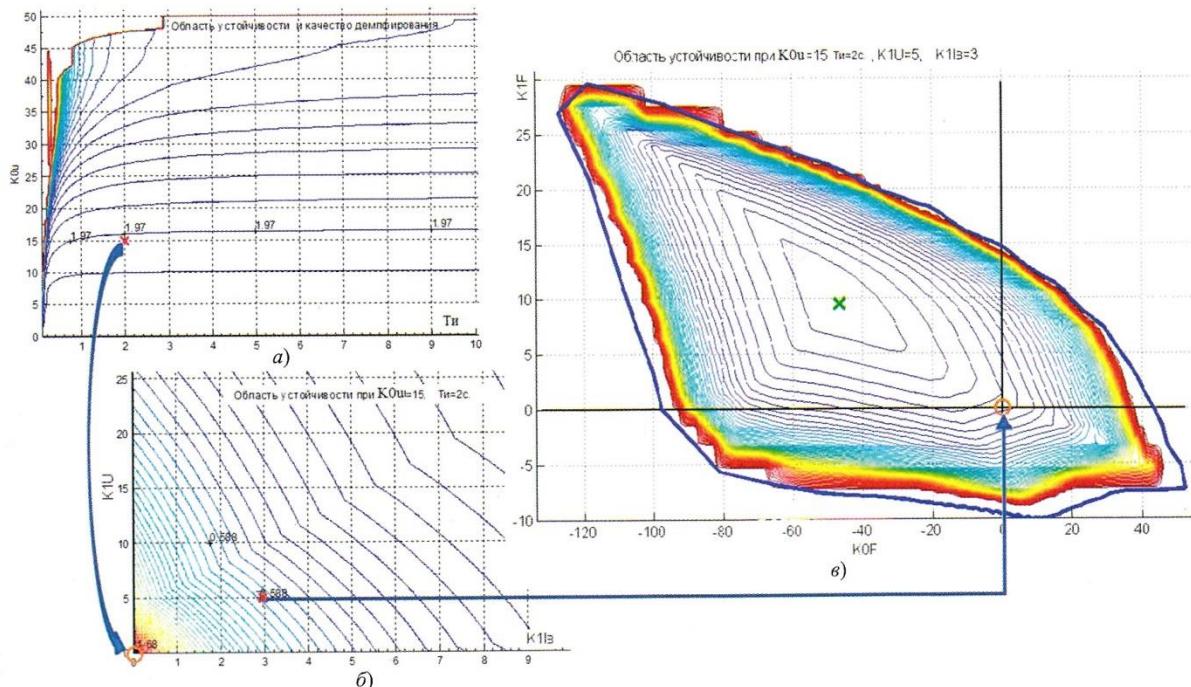


Рис. 5. Области устойчивости схемы нормального режима электроснабжения

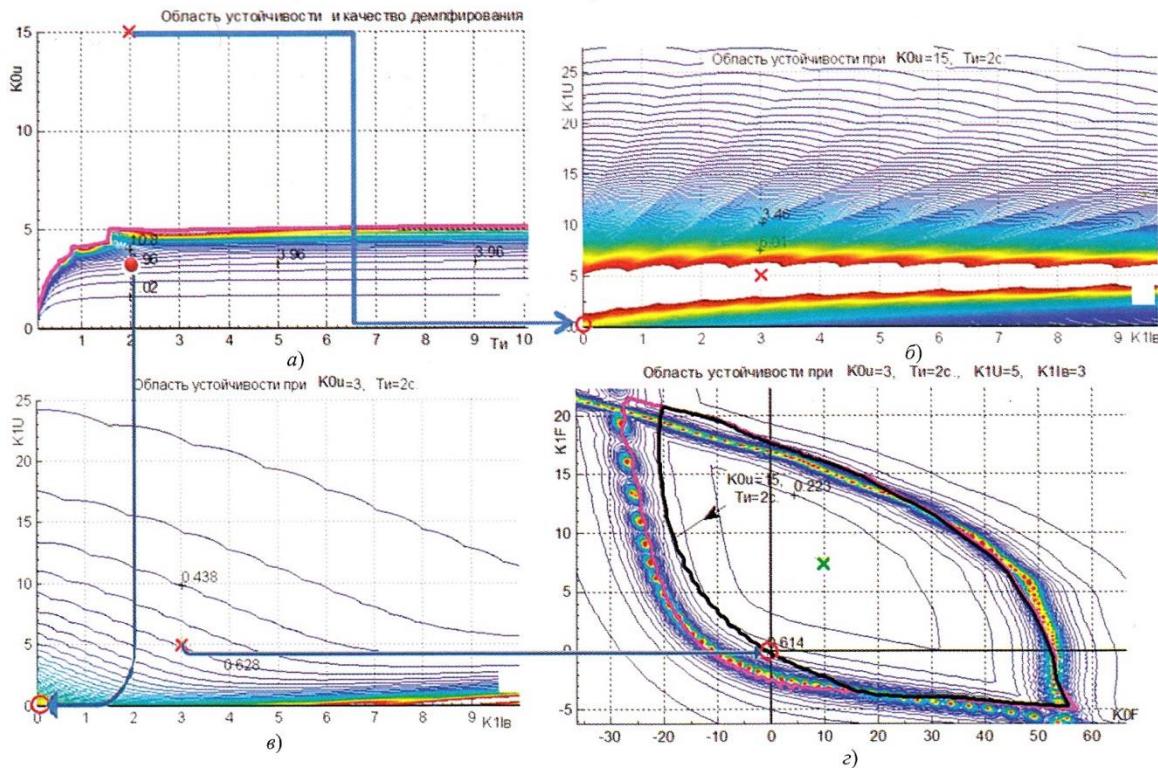


Рис. 6. Области устойчивости ремонтной схемы электроснабжения

чивости, однако известно, что, чем меньше коэффициент пропорционального канала АРВ, тем медленнее будет работать АСР.

При выборе типовых значений коэффициентов $K0u$ и Ti начальная точка находится в области коэффициентов усиления каналов внутренней стабилизации $K1U$ и $K1Ib$, дающих неустойчивую работу АСР, это показано на рис. 6, б (отмечена красным крестиком). И типовые значения коэффициентов $K1U$ и $K1Ib$ также соответствуют неустойчивой работе АСР. Как видно из рис. 6, г, эта точка близка к границе неустойчивости (для данных начальных параметров область устойчивости ограничена чёрной кривой).

При выборе значений коэффициентов $K0u$ и Ti из области устойчивости (красная точка на рис. 6, а) возможна устойчивая работа без каких-либо каналов стабилизации или только при включении внутренней стабилизации, но с различным качеством переходного процесса. Для улучшения демпфирующих свойств АСР включаются каналы внешней стабилизации; наименьшая амплитуда спектральной составляющей процесса $\Delta f_g(t)$ наблюдается при параметрах каналов внешней стабилизации, отмеченных маркером (зелёный крестик).

Объединение областей устойчивости для разных схемно-режимных ситуаций (рис. 7) позволяет найти общую область значений коэффициентов (окрашенная область рис. 7) и выбрать оптимальную настройку АРВ для всех схемно-режимных ситуаций.

Для определения итоговой настройки АРВ необходимо проанализировать качество переходных процессов при различных тестовых и нормативных аварийных возмущениях.

На рис. 8 иллюстрируется качество переходного процесса для более тяжёлой ситуации (схема рис. 3, б) при изменении постоянной интегрирования Ti . При включении канала производной напряжения амплитуда спектральной составляющей процесса $\Delta f_g(t)$ на резонансной частоте (кривая 1) существенно уменьшилась. Ещё больше амплитуда уменьшилась при включении канала производной частоты напряжения (кривая 2). Увеличение постоянной интегрирования Ti практически не влияет на спектр процесса $\Delta f_g(t)$ (кривая 3 совпадает с кривой 2).

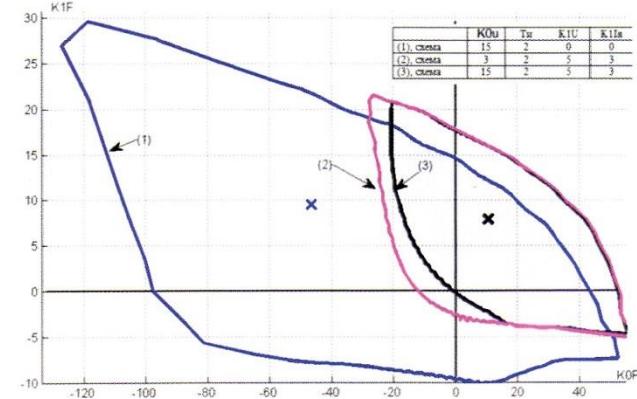


Рис. 7. Сопоставление областей устойчивости для разных схем рис. 3

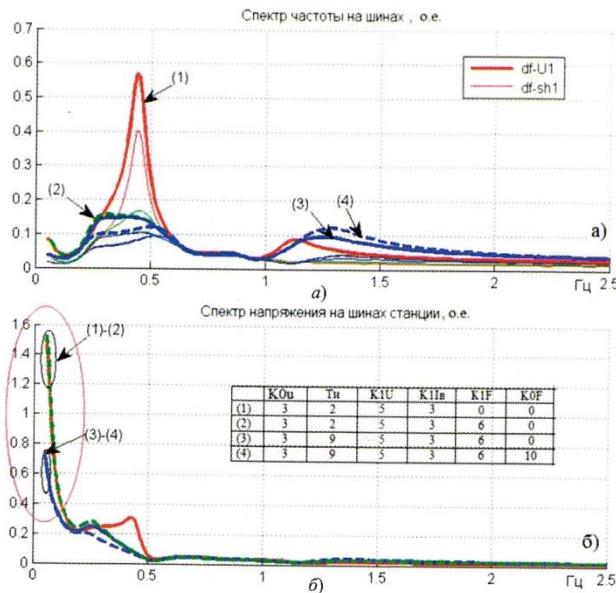


Рис. 8. Спектры: частоты $\Delta f_g(t)$ на шинах (а) генератора ($df-U_1$) и станции ($df-sh_1$) и спектр напряжения $\Delta U(t)$ на шинах станции при тестовом возмущении (б)

дает с кривой 2). Включение канала по отклонению частоты несколько перераспределяет мощность по спектральным составляющим (кривая 4).

Спектральная составляющая процесса $\Delta U(t)$ (рис. 8, б) на низкой резонансной частоте при постоянной интегрирования $T_{ti} = 2$ с имеет недопустимое значение (кривые 1 – 2), уменьшить которое возможно только при увеличении T_{ti} (кривые 3 – 4).

После рассмотрения всех возможных схемно-режимных ситуаций в работе энергосистемы и допустимых параметров переходных процессов определяют значения оптимальной настройки АРВ.

Выводы

- Представлены имеющие практическую направленность методики анализа функционирования регуляторов возбуждения синхронных генераторов. В совокупности эти методики позволяют оценить качество функционирования АРВ, определить области статической устойчивости системы регулирования по требуемому набору параметров АРВ, а также выбрать оптимальные настройки АРВ для заданных условий.

Все методики направлены на проверку и совершенствование алгоритмов функционирования и настройку АРВ в различных схемно-режимных ситуациях. Использование ПАК RTDS для анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения разных типов позволяет проверять работу АРВ в условиях, близких к реальным.

- Работоспособность методик проверена при выборе оптимальных параметров настройки АРВ в различных режимах работы конкретной энергосистемы.

- Разработанные методики успешно используются на кафедре РЗиАЭс МЭИ как при выполнении прикладных производственных задач, так и в учебном процессе магистерского направления.

Список литературы

- СТО 59012820.29.160.20.001-2012. Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов. М., 2012.
- Методические указания по устойчивости энергосистем. Утверждены приказом Минэнерго России от 30.06.2003 № 277.
- Использование программно-аппаратного комплекса RTDS для анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения. Создание тестовых схем / Арцишевский Я. Л., Климова Т. Г., Жуков А. В., Сацук Е. И., Расщепляев А. И. – Энергетик, 2013, № 9.
- Использование программно-аппаратного комплекса RTDS для анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения. Оценка качества переходного процесса / Арцишевский Я. Л., Климова Т. Г., Жуков А. В., Сацук Е. И., Расщепляев А. И. – Энергетик, 2013, № 10.
- Использование программно-аппаратного комплекса RTDS для анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения. Получение и верификация моделей микропроцессорных АРВ / Арцишевский Я. Л., Климова Т. Г., Жуков А. В., Сацук Е. И., Расщепляев А. И. – Энергетик, 2014, № 1.
- Использование программно-аппаратного комплекса RTDS для анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения. Влияние структуры и параметров АРВ на колебательные свойства АСР / Арцишевский Я. Л., Климова Т. Г., Жуков А. В., Сацук Е. И., Расщепляев А. И. – Энергетик, 2014, № 6.
- Логинов А. Г., Фадеев А. В. Микропроцессорный автоматический регулятор типа АРВ-М для систем возбуждения АО “Электросила”. – Электротехника, 2001, № 9.
- Литкенс И. В., Пуго В. И. Колебательные свойства электрических систем. М.: Энергоатомиздат, 1988.
- Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1985.