

0-784380

*На правах рукописи*



**АЛИ ЗИАД МОХАММЕД МОХАММЕД**

**СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ  
И УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ  
С ГЕНЕРИРУЮЩИМИ ИСТОЧНИКАМИ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань 2010

Работа выполнена на кафедре автоматизации и управления Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева (Национальном исследовательском университете).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Мяликов Александр Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Федотов Александр Иванович  
Кандидат технических наук, доцент  
Кропачев Георгий Федорович

Ведущая организация: ОАО Сетевая компания, г. Казань

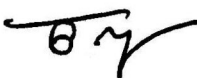
Защита состоится «18» Октября 2010 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.079.06 в Казанском государственном техническом университете им. А.Н. Туполева по адресу: г. Казань, ул. Толстого, 15 (3-е учебное здание КГТУ), ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке КГТУ им. А.Н. Туполева.

Ваши отзывы, заверенные печатью, в двух экземплярах просим высылать по адресу: 420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 10 на имя ученого секретаря.

Автореферат разослан «16» сентября 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000728491

А.В.Бердников

Актуальность темы.

В последние годы наметилась тенденция к созданию и использованию небольших по мощности источников электрической энергии. Как правило, такие энергоисточники строятся на базе энергосберегающих схем производства энергии с применением газовых турбин, газопоршневых установок, других небольших агрегатов, использующих имеющиеся ресурсы для производства энергии (вода, ветер, солнечная энергия и другие). Для обеспечения надежного и бесперебойного снабжения потребителей электрической энергией, такие энергоисточники, располагающиеся на небольшой территории, объединяются с помощью электрической сети. В результате создаются электротехнические комплексы с генерирующими источниками, обеспечивающие электроэнергией небольшие населенные пункты, производственные объекты, распределенные на небольшой территории. Это направление является перспективным и эффективным, так как позволяет создавать источники энергии с более низкой, чем предлагается монополистами и посредниками, стоимостью. Использование «своей» дешевой (по себестоимости) электроэнергии для собственного производства позволит получить более дешевый конечный продукт и в короткий срок (до трех-четырех лет) окупить затраты на создание собственного энергоисточника или электротехнического комплекса. Такие электротехнические комплексы с генерирующими источниками (ЭТК с ГИ) могут стать основой развития малой энергетики и децентрализованного снабжения малых удаленных регионов. Термин малая энергетика охватывает источники генерации от десятков киловатт до нескольких МВт по мощности. Для обеспечения надежного электроснабжения в ряде случаев (при имеющейся возможности) применяют схему резервирования «своего» энергоисточника от региональных электрических сетей. Такие ЭТК с ГИ уже имеют и активно внедряют предприятия ОАО Газпром, нефтедобывающие компании и другие.

Однако, для ЭТК с ГИ существуют аналогичные как и для больших электроэнергетических систем проблемы, связанные с обеспечением устойчивости совместной работы генерирующих источников при различных возмущениях. Поэтому обеспечение устойчивости при различных возмущениях является актуальной научно-технической проблемой, имеющей важное народно хозяйственное значение для экономики России. Данная проблема является также актуальной для экономики Арабской республики Египет, для которой одним из направлений развития энергетики является создание ЭТК с ГИ, ориентированных как на обычные, так и на нетрадиционные энергетические ресурсы.

Основным элементом ЭТК с ГИ является синхронный генератор. Управлению, исследованию устойчивости и моделированию электромеханических переходных процессов синхронных машин и их систем посвящено множество научных работ. Большой вклад внесли ученые: Горев А.А., Лебедев С.А., Жданов П.С., Веников В.А., Стрехов С.В., Вайман М.Я, Руденко Ю.Н., Воропай Н.И., Гамм А.З., Ушаков Е.И., Park R.H., Cron G, Anderson P.M., Fouad A.A., Kundur P., Concordia D., Pai M.A. и многие другие.

Объект исследования: электротехнический комплекс с генерирующими источниками небольшой мощности.

**Предмет исследования:** методы синтеза и настройки регуляторов синхронных генераторов для обеспечения устойчивости и качества переходных процессов ЭТК при учете различных возмущений.

**Задача научного исследования** состоит в разработке способов синтеза и настройки локальных регуляторов синхронных генераторов в электротехническом комплексе при учете различных возмущений.

**Цель работы:** обеспечение устойчивости и повышение качества переходных процессов электротехнических комплексов с генерирующими источниками на основе дополнительного регулирования возбуждения синхронных генераторов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

Анализ существующих способов синтеза и настройки дополнительных регуляторов, применяемых в системе возбуждения синхронного генератора;

Выбор математических моделей для анализа переходных процессов в многомашинных ЭТК при различных возмущениях;

Разработка способа синтеза и настройки дополнительного регулятора возбуждения синхронного генератора, обеспечивающего требуемое качество переходных процессов одномашинной системы при малых начальных отклонениях от установившегося режима;

Разработка способов перенастройки локальных регуляторов синхронных генераторов для обеспечения динамической устойчивости одномашинных и многомашинных ЭТК при изменениях режимов.

**Методы исследования:** В диссертационной работе используются методы теории электрических машин, систем и сетей, теории управления, теории устойчивости, линейной алгебры, а также компьютерное моделирование.

#### **Научная новизна работы.**

1. Разработан способ синтеза локальных регуляторов синхронного генератора (изодромный, ПИ, ПД, ПИД), основанный на сокращении размерности матрицы линеаризованной упрощенной модели одномашинной системы. Получены аналитические выражения для определения параметров типовых регуляторов из условия заданного расположения пары корней характеристического уравнения, определяющих качество переходных процессов механического движения и устойчивость системы при малых возмущениях.
2. Проведенный анализ влияния настроек дополнительного регулятора синхронного генератора на синхронизирующий и демпфирующий момент одномашинной системы показал, что применение дополнительных регуляторов повышает запас устойчивости СГ и обеспечивает требуемое качество переходных процессов.
3. Предложен способ настройки локальных регуляторов возбуждения синхронных генераторов в одно- и многомашинных ЭТК при учете влияния различных возмущений.
4. На основе компьютерного моделирования в пакете Matlab по полным нелинейным моделям одномашинных, 3-х машинных и 5-и машинных ЭТК показано, что использование дополнительных регуляторов возбуждения синхронного генератора улучшает качество переходных процессов при малых начальных отклонениях и обеспечивает динамическую устойчивость при изменениях режимов.
5. Разработано программное обеспечение для настройки локальных регуляторов, расчета установившихся режимов, анализа статической и динамической устойчивости одномашинных и многомашинных ЭТК.





Обоснованность и достоверность полученных результатов и вытекающих из них выводов обеспечена корректным использованием математического аппарата, общепринятых предположений и допущений. Исследование и компьютерное моделирование проводится в рамках общепринятых математических моделей, законов и уравнений электротехники, теории электрических машин, систем и сетей, теоретической механики с применением численных методов решения дифференциальных уравнений, методов программирования на входном языке пакета Matlab.

Практическая ценность работы. Типовые регуляторы, способы синтеза и настройки которых разработаны в диссертации, имеют простую структуру, используют только доступные для измерения параметры состояния (угловая скорость), легко реализуются и могут использоваться как локальные дополнительные регуляторы возбуждения синхронных генераторов в ЭТК и электроэнергетических системах. Разработанные способы настройки локальных регуляторов следует использовать в адаптивной системе подстройки параметров при изменениях режимов.

Разработанное программное обеспечение при соответствующем информационном обеспечении может использоваться для расчета установившихся режимов, моделирования и анализа переходных процессов, оценки статической и динамической устойчивости ЭТК с ГИ при учете различных возмущений.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены и используются в учебном процессе кафедры автоматизации и управления КГТУ им. А.Н. Туполева при выполнении курсовых и дипломных работ студентами и магистрантами, в научных исследованиях и учебном процессе инженерного факультета Южного Валлийского университета (Арабская республика Египет), в лаборатории электрических машин которого создается на основе разработанного программного обеспечения и Simulink моделей специальный курс для подготовки специалистов энергетического профиля.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Способ синтеза типовых регуляторов для синхронного генератора, обеспечивающий устойчивость и требуемое качество переходных процессов в системе при малых возмущениях.
2. Способ настройки дополнительных регуляторов возбуждения синхронного генератора в одномашинной системе при изменениях нагрузки.
3. Способ настройки локальных регуляторов синхронных генераторов в многомашинных ЭТК при учете влияния различных возмущений (изменение нагрузки, короткое замыкание, отключение-обрыв линии).
4. Результаты анализа устойчивости и переходных процессов одно и многомашинных ЭТК при различных возмущениях.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XV и XVII Туполевских чтениях, международной молодежной научной конференции, 2007 и 2009, г. Казань; на IV всероссийской школе-семинаре молодых ученых «Проблемы управления и информационные технологии. ПУИТ-08», 2008, г. Казань; Всероссийском семинаре «Аналитическая механика, устойчивость и управление движением», 2008, г. Казань; на X Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, 2009, г. Иркутск (Россия)–Ханх (Монголия); на VI Всероссийской школе-семинаре молодых ученых «Управление большими системами», 2009, г. Ижевск; на V Всероссийской научно-технической

конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики АНТЭ-09», 2009, г. Казань; на XXXIX Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений», 2009, г. Москва; на II Всероссийской конференции «Знания – онтологии – теории» с международным участием, 2009, г. Новосибирск; семинарах кафедры Автоматики и управления КГТУ им. А.Н. Туполева, г. Казань.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ (из них две статьи в научно-технических журналах, включенных в список, рекомендованных ВАК РФ, и одна статья в иностранном журнале на английском языке).

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Содержание работы изложено на 173 страницах, диссертация содержит 108 рисунка, 21 таблицу, список использованных источников, включающий 161 наименование.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, объект и предмет исследования, методы исследования, научная новизна, практическая ценность, реализация результатов работы. Даны основные определения, краткий обзор литературы по синтезу регуляторов, управлению режимами синхронного генератора, по качеству электроэнергии; дано описание структуры диссертации.

**В первой главе** диссертации «Математические модели синхронного генератора и одномашиной системы» представлены математические модели синхронного генератора, связанного с системой бесконечной мощности через линию электропередачи, имеющей активное сопротивление  $r_e$  и индуктивность  $L_e$ . Эквивалентная схема показана на рисунке 1. В литературе представлены математические модели синхронной машины, принимая во внимание различные эффекты. Полная модель с учетом процессов в демпферных обмотках включает семь нелинейных дифференциальных уравнений для каждой машины. Кроме того, в дополнение к ним, другие уравнения, описывающие нагрузку, системы возбуждения, а также изменения механического момента должны быть включены в математическую модель. Таким образом, полное математическое описание большой энергосистемы является чрезвычайно сложной задачей. Поэтому часто используют упрощенные модели.

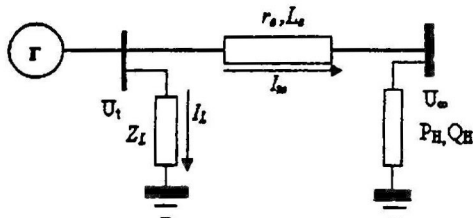


Рис. 1. Эквивалентная схема одномашиной системы - синхронный генератор ( $\Gamma$ ) с общей и локальной нагрузкой, работающий на систему бесконечной мощности

В диссертации при общепринятых допущениях о не учете переходных процессов в демпферных обмотках и некоторых других, динамика электромеханических переходных процессов синхронного генератора представлена уравнениями Парка-Горева (в полной модели одномашинной системы). В качестве переменных состояния в этой модели используются токи  $i_d, i_f, i_q$  (мгновенные значения), отклонение угла  $\delta$  и угловая скорость ротора  $\omega$ .

$$\frac{d\delta}{d\tau} = \omega - 1, \quad (1)$$

$$\frac{d\omega}{d\tau} = -\frac{L_d}{3\tau_j} i_q i_d - \frac{kM_F}{3\tau_j} i_q i_f + \frac{L_q}{3\tau_j} i_d i_q - \frac{D}{\tau_j} (\omega - 1) + \frac{M_{\text{мх}}}{\tau_j}, \quad (2)$$

$$\frac{di_d}{d\tau} = \frac{-L_F(r_f + r_i)}{L} i_d - \omega \frac{L_F(L_q + L_i)}{L} i_q + \frac{kM_{Ff}}{L} i_f - \frac{kM_F}{L} u_f + \frac{L_F U_\infty \sqrt{3}}{L} \sin(\delta), \quad (3)$$

$$\frac{di_f}{d\tau} = \frac{kM_{Ff}(r_f + r_i)}{L} i_d + \frac{-(L_q + L_i)}{L} r_f i_f + \omega \frac{kM_F(L_q + L_i)}{L} i_q + \frac{(L_f + L_i)}{L} u_f - \frac{kM_F U_\infty \sqrt{3} \sin(\delta)}{L}, \quad (4)$$

$$\frac{di_q}{d\tau} = \frac{(L_d + L_i)}{(L_q + L_i)} \omega i_d + \frac{kM_F}{(L_q + L_i)} \omega i_f - \frac{(r_f + r_i)}{(L_q + L_i)} i_d - \frac{U_\infty \sqrt{3}}{(L_q + L_i)} \cos(\delta). \quad (5)$$

Здесь  $L = L_F(L_q + L_i) - kM_F^2$ ;  $L_d, L_q, L_F$  - собственные индуктивности обмоток статора по продольной  $d$  и поперечной  $q$  оси, обмотки возбуждения ротора,  $M_F$  - взаимная индуктивность обмоток статора и ротора,  $r_s, r_f, r_e$  - активные сопротивления обмоток статора, обмотки возбуждения ротора и линии электропередачи,  $U_\infty, u_F$  - напряжения шины бесконечной мощности (действующее значение) и обмотки возбуждения ротора,  $k$  - постоянная Парка,  $\tau_j$  - механическая постоянная времени. Все параметры модели, включая токи, напряжения и время, представлены в относительных единицах. Предположение о не учете демпферных обмоток для рассматриваемых ЭТК с СГ небольшой мощности является допустимым. Для СГ большой мощности, как известно, необходимо учитывать две или более демпферных обмоток в модели.

При задании нагрузки требуемой мощностью или эквивалентной постоянной проводимостью из уравнений равновесия полной модели получены выражения для определения установившегося режима  $\delta_0, \omega_0, i_{d0}, i_{q0}, i_{f0}$ . Показано, что при учете наряду с общей нагрузкой, заданной требуемой мощностью, которую должен вырабатывать генератор (или эквивалентной постоянной проводимостью), еще и локальной нагрузки, задаваемой также эквивалентной проводимостью (или сопротивлением), полная модель не изменится, а изменятся только параметры установившегося режима.

Дополнительно к уравнениям (1)-(5) полной модели учитывается уравнение автоматического регулятора возбуждения (АРВ) в общепринятом виде

$$\frac{du_F}{d\tau} = \frac{K_A K_I}{T_A} (I_t - I_{\text{ref}}) + \frac{K_A K_u}{T_A} (U_{\text{ref}} - U_t) - \frac{1}{T_A} (u_F - u_{F\text{ref}}). \quad (6)$$

В предположении, что не учитываются переходные процессы в линии электропередачи, в демпферных обмотках, в обмотках статора, а генератор представлен эквивалентной ЭДС  $E'_q$  за переходным реактивным сопротивлением  $x'_d = \omega L'_d$ , упрощенная математическая модель системы с АРВ представляется следующей системой уравнений:

$$\frac{d\delta}{d\tau} = \omega - 1, \quad (7)$$

$$\frac{d\omega}{d\tau} = -\frac{E'_q I_q - \omega(L_q - L'_d)I_d I_q}{T_j} - \frac{D}{T_j}(\omega - 1) + \frac{M_{\text{кр}}}{T_j}, \quad (8)$$

$$\frac{dE'_q}{d\tau} = -\frac{E'_q}{T'_{do}} + \frac{\omega(L_d - L'_d)I_d}{T'_{do}} + \frac{U_{\mu}}{T'_{do}}, \quad (9)$$

$$\frac{dE_{\mu}}{d\tau} = \frac{K_A K_1}{T_A}(I_d - I_{\text{ref}}) + \frac{K_A K_2}{T_A}(U_{\text{ref}} - U) - \frac{1}{T_A}(E_{\mu} - E_{\mu\text{ref}}). \quad (10)$$

где  $I_d, I_q$  составляющие токов генератора по оси  $d, q$  (действующие значения).

Модели СГ с типовыми дополнительными регуляторами (ПИ, ПД, ПИД, 2-х этапным изодрономным) также представлены.

Во второй главе диссертации «Способ синтеза и настройки типовых регуляторов синхронного генератора на основе сокращения размерности матрицы» рассматривается линеаризованная упрощенная математическая модель синхронного генератора с АРВ, связанного с системой бесконечной мощности через линию электропередачи. Уравнения модели представлены в матричном виде:

$$\frac{dX}{dt} = AX + BM_{\text{кр}}$$

где  $X_1 = (\delta, \omega, dE'_q, dU_{\mu})^T$  – вектор состояния в отклонениях от установившегося режима,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ K_1 & \frac{-D}{T_j} & K_2 & 0 \\ K_3 & 0 & K_4 & \frac{1}{T'_{do}} \\ K_5 & 0 & K_6 & \frac{-1}{T_A} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \tau_j \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Здесь параметры  $K_5$  и  $K_6$  зависят от коэффициента  $K_A$  автоматического регулятора возбуждения, параметров системы и режима, параметры  $K_1$ – $K_4$  зависят только от параметров системы и режима. С целью улучшения динамических характеристик системы предлагается использовать дополнительный регулятор для

того чтобы сбалансировать задержку по фазе, которая возникает из-за задержки по времени электрической обратной связи, для увеличения момента демпфирования. Блок-схема для рассматриваемой системы при добавлении регулятора с передаточной функцией  $F(s)$  показана на рисунке 2.

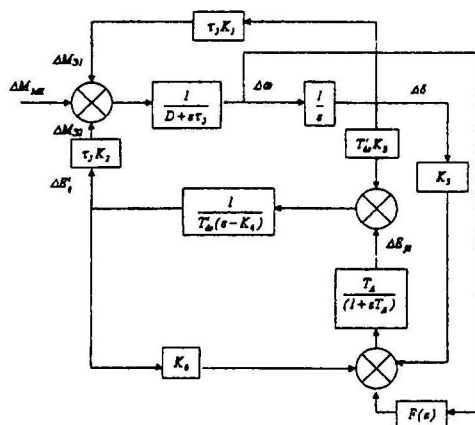


Рис. 2. Блок-схема синхронного генератора с добавлением регулятора с передаточной функцией  $F(s)$

Параметры регулятора выбираются из условия заданного расположения пары корней характеристического уравнения, определяющих движение ротора. Именно эта пара корней обычно расположена вблизи мнимой оси комплексной плоскости. Выделение указанной пары корней производится на основе сокращения размерности матрицы.

Матрицу  $A$  представим в блочном виде, тогда уравнения (11) примут вид:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix},$$

где  $X_1 = (\Delta\delta, \Delta\omega)^T$ , и  $X_2 = (\Delta E_q', \Delta E_{fd})^T$ ;

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ K_1 & -\frac{D}{\tau_j} \end{bmatrix}, A_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ K_2 & 0 \end{bmatrix}, A_{21} = \begin{bmatrix} K_3 & 0 \\ K_5 & 0 \end{bmatrix}, A_{22} = \begin{bmatrix} K_4 & \frac{1}{T_d'} \\ K_6 & -\frac{1}{T_d} \end{bmatrix}.$$

Перейдем к изображениям по Лапласу при нулевых начальных условиях:

$$s \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \text{ или } \begin{bmatrix} sI - A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & sI - A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = 0.$$

После исключения  $X_2$  из 1-го уравнения получим эквивалентную систему:

$$\begin{bmatrix} sI - A_{11} - A_{12}(sI - A_{22})^{-1}A_{21} & 0 \\ A_{21} & sI - A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = 0. \quad (12)$$

Обозначая  $A_r = sI - A_{11} - A_{12}(sI - A_{22})^{-1}A_{21}$ , запишем характеристическое уравнение для системы (12):

$$\det(sI - A) = \det(sI - A_r) \cdot \det(sI - A_{22}) = 0.$$

Здесь  $\det(sI - A_{22}) = s^2 + f_1s + f_2$ , где  $f_1 = \left(-K_4 + \frac{1}{T_A}\right)$ , и  $f_2 = \frac{-K_A}{T_A} + \frac{K_6}{T_{do}'}.$

$$\det(sI - A_r) = -K_1 + \frac{sK_2K_3 - K_2K_3K_4 + \frac{K_2K_5}{T_{do}'}}{s^2 + f_1s + f_2}.$$

После добавления регулятора изменится только матрица  $A_{21}(s) \rightarrow \tilde{A}_{21}(s)$ ,

$$\tilde{A}_{21}(s) = \begin{bmatrix} K_3 & 0 \\ K_5 + F(s) & 0 \end{bmatrix},$$

а также матрица  $A_r(s) \rightarrow \tilde{A}_r(s)$ , которая зависит от  $A_{21}$ . Параметры регулятора будем выбирать чтобы обеспечить для уравнения  $\det(sI - \tilde{A}_r(s)) = 0$ , желаемое расположение 2-х характеристических чисел  $s_m = -\sigma \pm j\xi$  или  $s_m = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$ , где  $\omega_n$  - собственная частота и  $\zeta$  - коэффициент демпфирования. При  $s=s_m$   $\tilde{A}_r(s)|_{s=s_m} = s_mI - A_{11} - A_{12}(s_mI - A_{22})^{-1}\tilde{A}_{21}(s_m)$ . Тогда характеристическое уравнение  $\det(sI - \tilde{A}_r(s)) = 0$  после подстановки  $s_m$  вместо  $s$  может быть представлено в виде:

$$s_m^2 + g_1s_m + g_2 = g_3F(s_m),$$

где

$$g_1 = f_1 + \frac{K_2K_3}{K_1}, g_2 = f_2 + \frac{K_2}{K_1}(-K_3K_4 + \frac{K_5}{T_{do}'}), g_3 = \frac{-K_2}{K_1T_{do}'}$$

Таким образом, в процессе сокращения размерности характеристическое уравнение  $\det(sI - \tilde{A}_r(s)) = 0$  после того как один из типовых регуляторов был добавлен, может быть представлено в виде:

1) Для изодромного регулятора

$$s_m^2 + g_1s_m + g_2 = g_3s_mK\left(\frac{1+s_mT_1}{1+s_mT_2}\right)^2; \quad (13)$$

2) Для ПИ регулятора

$$s_m^2 + g_1s_m + g_2 = g_3s_m\left(K_p + \frac{K_i}{s_m}\right); \quad (14)$$

3) Для ПД регулятора

$$s_m^2 + g_1s_m + g_2 = g_3s_m(K_p + K_d s_m); \quad (15)$$

4) Для ПИД регулятора

$$s_m^2 + g_1 s_m + g_2 = g_3 s_m \left( K_p + \frac{K_I}{s_m} + K_d s_m \right). \quad (16)$$

В результате при задании пары характеристических чисел  $s_m$  параметры для каждого регулятора могут быть выбраны путем решения системы 2-х нелинейных уравнений, полученных из характеристического уравнения. Из уравнений (13)-(16) получены аналитические выражения для определения параметров каждого конкретного дополнительного регулятора (изотропного, ПИ, ПД и ПИД). Для изотропного и ПИД регуляторов один из параметров задается, а два других вычисляются по аналитическим выражениям.

На рисунке 3 представлены переходные процессы в линеаризованной модели СГ без дополнительных регуляторов и с дополнительным регулятором при высокой нагрузке ( $P_n = 1.25$  о.е.  $Q_n = 0.3$  о.е.). Цифрами 1-5 на рисунке 3 обозначены графики переходных процессов (зависимости  $\Delta\omega$  от времени) соответственно для системы

1 - без дополнительных регуляторов, 2 - с изотропным регулятором, 3 - с ПД регулятором, 4 - с ПИ регулятором, 5 - с ПИД регулятором.

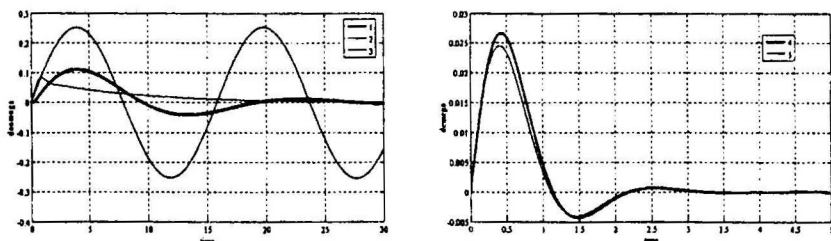


Рис. 3. Переходные процессы при высокой нагрузке

Видно, что использование дополнительного регулятора с настройками параметров по предложенному способу, обеспечивает устойчивость и требуемое качество переходных процессов.

Проведен анализ влияния настроек дополнительного регулятора синхронного генератора и автоматического регулятора возбуждения на синхронизирующий и демпфирующий моменты. При любой заданной частоте колебаний, синхронизирующий момент должен создаваться в фазе с углом  $\delta$ , а демпфирующий момент - в фазе с угловой скоростью  $\omega$  ротора генератора. Необходимое и достаточное условие для того, чтобы система была устойчивой - и синхронизирующий и демпфирующий моменты должны быть положительными. Поэтому, изображая синхронизирующий и демпфирующий моменты в зависимости от нагрузки, можно сделать вывод, что система является устойчивой в точках нагрузки, где они оба положительны. Но если один из них отрицателен, то система является неустойчивой.

На рисунках (4)-(5) представлены зависимости синхронизирующего и демпфирующего моментов синхронного генератора при изменении нагрузки и  $D=0$

(учитывается только демпфирующий момент, создаваемый системой возбуждения синхронного генератора).

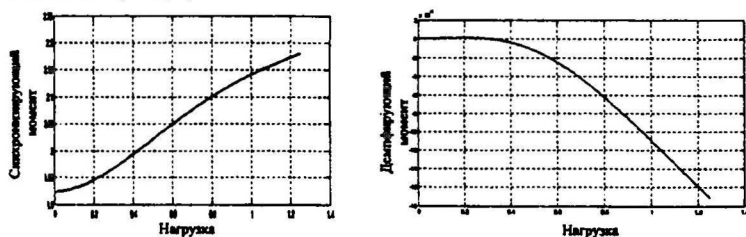


Рис. 4. СГ без дополнительного регулятора

Из рисунков (4)–(5) заключаем, что синхронизирующий и демпфирующий моменты улучшены после добавления регуляторов с настройками параметров по предложенному способу. Эти зависимости следует использовать для оценки запаса устойчивости СГ в одномашиной системе при малых начальных отклонениях для каждого режима нагрузки.

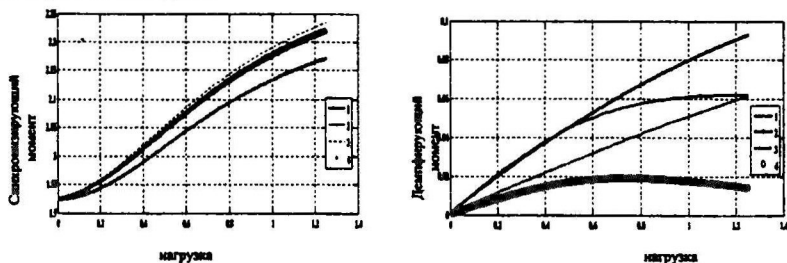


Рис. 5. СГ с дополнительным регулятором. 1 – изотормный, 2- ПИ, 3- ПД, 4- ПИД

Кроме того, влияние коэффициента усиления регулятора возбуждения на устойчивость системы при малых возмущениях изучено. Получены зависимости синхронизирующего и демпфирующего момента при изменении коэффициента  $K_A$ . На рисунке 6 представлены синхронизирующий и демпфирующий моменты для системы без дополнительных регуляторов при различных значения  $K_A$  при высокой нагрузке.

Из рисунка 6 заключаем, что при высокой нагрузке система без дополнительного регулятора будет устойчивой только при  $K_A \leq 10$  с малым запасом по демпфирующему моменту.

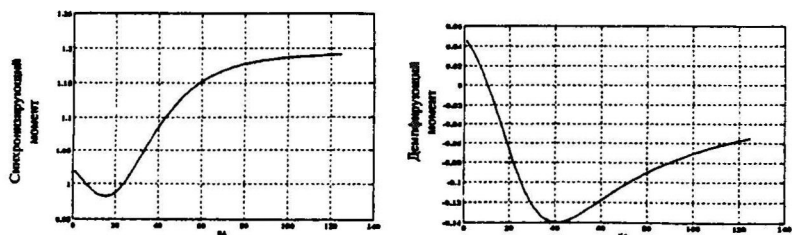


Рис. 6. Изменение синхронизирующего и демпфирующего моментов в зависимости от  $K_A$



В третьей главе диссертации «Обеспечение устойчивости одномашиной системы с помощью дополнительных регуляторов синхронного генератора» исследуется устойчивость и качество переходных процессов одномашиной системы по нелинейным упрощенной и полной моделям из первой главы. Представлены результаты исследования устойчивости и переходных процессов одномашиной системы при различных условиях нагрузки: низкой, средней, высокой. Учитываются также переходные процессы в линии электропередачи и влияние локальной нагрузки.

В таблице 1 представлены значения параметров установившегося режима для полной модели.

Таблица 1

Установившийся режим для полной модели

| Нагрузка                                   | $\delta_0$ рад | $\omega_0$ | $i_{d0}$ а.е. | $i_{q0}$ а.е. | $i_{f0}$ а.е. | $i_{FD}$ а.е. | $M_{max}$ а.е. |
|--------------------------------------------|----------------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| Низкая нагрузка $P_i = 0.05, Q_i = -0.225$ | 0.1214         | 1          | 0.3764        | 0.1332        | 1.0609        | 0.1924        | 0.0505         |
| Средняя нагрузка $P_i = 1, Q_i = 0.015$    | 0.9819         | 1          | -1.4547       | 0.9404        | 4.1574        | 0.7539        | 1.0100         |
| Высокая нагрузка $P_i = 1.25, Q_i = 0.3$   | 0.9179         | 1          | -2.0354       | 0.9025        | 5.4941        | 0.9963        | 1.2665         |

В таблице 2 представлены значение параметров установившегося режима для полной модели с локальной нагрузкой.

Таблица 2

Установившийся режим для полной модели с локальной нагрузкой

| Нагрузка                                   | $\delta_0$ рад | $\omega_0$ | $i_{d0}$ а.е. | $i_{q0}$ а.е. | $i_{f0}$ а.е. | $i_{FD}$ а.е. | $M_{max}$ а.е. |
|--------------------------------------------|----------------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| Низкая нагрузка $P_i = 0.05, Q_i = -0.225$ | 0.5335         | 1          | -0.3121       | 0.5714        | 2.2880        | 0.4149        | 0.3771         |
| Средняя нагрузка $P_i = 1, Q_i = 0.015$    | 1.2435         | 1          | -2.7565       | 1.0780        | 6.4982        | 1.1784        | 1.7363         |
| Высокая нагрузка $P_i = 1.25, Q_i = 0.3$   | 1.1918         | 1          | -3.5766       | 1.0633        | 8.3396        | 1.5123        | 2.1920         |

Соответствующие параметры установившегося режима для упрощенной модели, как показали расчеты, совпадают с параметрами установившегося режима для полной модели для всех рассмотренных вариантов общей и локальной нагрузки.

На основе компьютерного моделирования по полной и упрощенной моделям показано, что применение дополнительных регуляторов (ПИ, ПД, ПИД, изодромного), с настройками параметров по способу, разработанному в главе 2 на основе сокращения размерности матрицы, обеспечивает устойчивость и требуемое качество переходных процессов одномашиной системы при малых начальных отклонениях состояния от установившегося режима. Следует отметить, что результаты, полученные для упрощенной модели, совпадают с результатами, полученными для полной нелинейной модели.

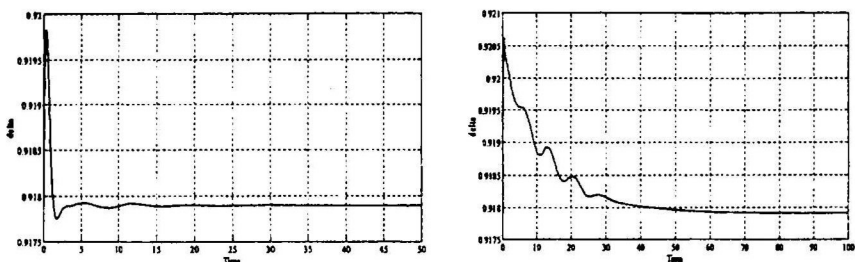


Рис. 7. Переходный процесс системы с ПИ и ПД регулятором при высокой нагрузке

На рисунке 7 показаны полученные по полной модели переходные процессы по  $\delta$  при малых начальных отклонениях состояния синхронного генератора соответственно с дополнительным ПИ и ПД регулятором при высокой нагрузке, а на рисунке 8 – переходные процессы одномашиной системы с дополнительным ПИД и изодромным регулятором.

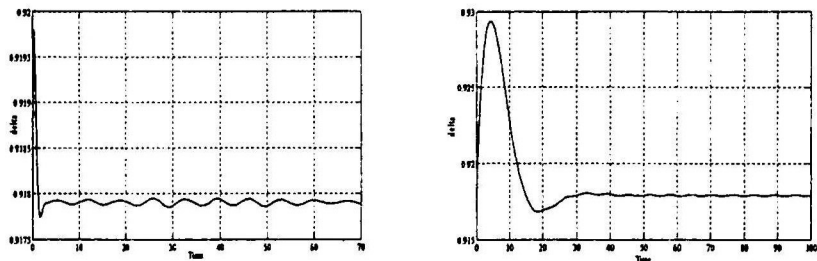


Рис. 8. Переходный процесс системы с ПИД и изодромным регулятором при высокой нагрузке

Также на основе компьютерного моделирования по полной модели проведен анализ динамической устойчивости одномашиной системы при изменении нагрузки. Показано, что без дополнительного регулятора система динамически неустойчива при всех рассмотренных вариантах изменения нагрузки. Дополнительные регуляторы (ПИ, ПД, ПИД) без перенастройки их параметров на новый, соответствующий измененному значению нагрузки установившийся режим, не обеспечивают динамическую устойчивость. Только изодромный регулятор без изменения настроек способен сохранить устойчивость системы при некоторых вариантах изменения нагрузки.

Для обеспечения динамической устойчивости одномашиной системы при изменении нагрузки предлагается способ перенастройки дополнительного регулятора синхронного генератора, в основе которого разработанный в главе 2 способ синтеза типовых регуляторов. На основе компьютерного моделирования переходных процессов рассматриваемой одномашиной системы при изменениях нагрузки показано, что при использовании предлагаемого способа перенастройки регуляторов удастся обеспечить динамическую устойчивость при всех рассмотренных вариантах изменения нагрузки.

В частности на рисунке 9 показано, что рассматриваемая система динамически устойчива при использовании дополнительного ПИ регулятора с перенастройкой по указанному способу параметров при переходе из установившегося режима с низкой нагрузкой в режим с высокой нагрузкой.

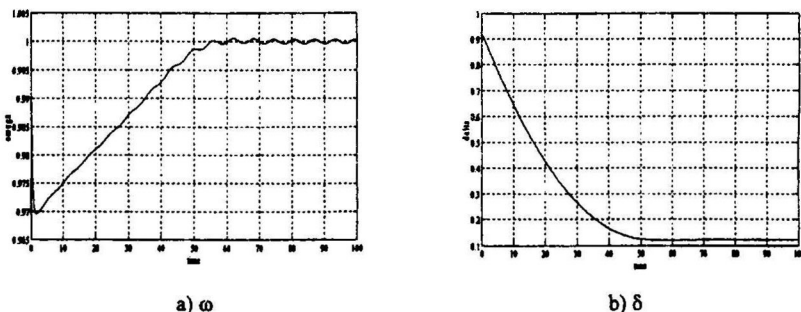


Рис. 9. Переход из режима с низкой нагрузкой в режим с высокой нагрузкой

В четвертой главе «Способ настройки локальных регуляторов для обеспечения динамической устойчивости многомашинной системы» рассматривается многомашинная система, в которой каждый синхронный генератор снабжен локальным дополнительным регулятором. В математической модели многомашинной системы  $i$ -й синхронный генератор представлен уравнениями Парка-Горева как в одномашинной системе (полная модель). Для описания сети используются алгебраические уравнения установившегося режима в форме баланса напряжений или в форме баланса мощности. Для расчета потоков распределения мощности в сети реализован и используется метод Ньютона Рафсона. Получены выражения для вычисления установившегося режима синхронных генераторов при известном распределении мощности в сети.

Для каждого генератора производится настройка параметров локальных дополнительных регуляторов по разработанному в диссертации способу. Для этого используются параметры линеаризованной упрощенной модели, которые вычисляются по параметрам генератора и параметрам установившегося режима.

На основе компьютерного моделирования по полной модели исследуется динамическая устойчивость синхронных генераторов при различных возмущениях (изменение нагрузки, короткое замыкание, отключение/включение линии электропередачи), приводящих к изменению установившегося режима и возникновению переходных процессов. Предложен способ перенастройки локальных дополнительных регуляторов синхронных генераторов, с целью обеспечения динамической устойчивости многомашинной системы при различных возмущениях. Способ апробирован на трех тестовых примерах многомашинных ЭТК с ГИ.

**Пример 1.** Рассматривается 3-х машинная система, в которой генерирующие источники связаны между собой и с системой бесконечной мощности, как показано на рисунке 10.

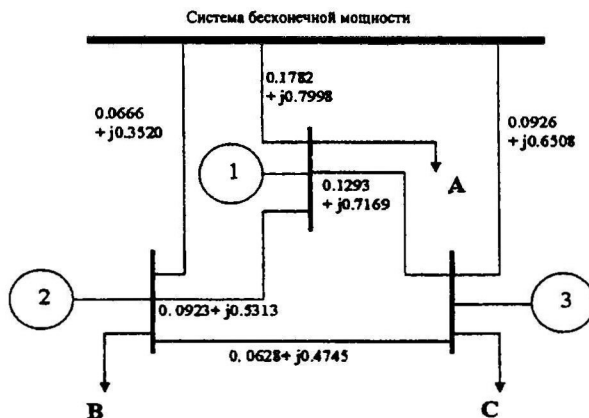


Рис. 10. 3-х машинная система, с 4-я узлами

**Пример 2.** 3-х машинная система с 7-ю узлами. Схема замещения представлена на рисунке 11, содержит 7 узлов с нагрузками; из них (1,6,7) - генераторные узлы.

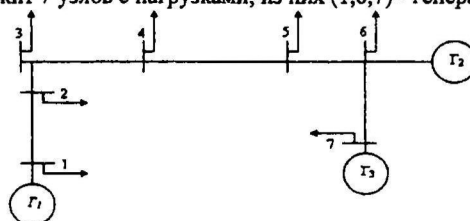


Рис. 11. 3-х машинная система, с 7-ю узлами

**Пример 3.** Тестовый пример стандарта IEEE 5-машинной системы с 14-ю узлами, эквивалентная схема которой показана на рисунке 12. Система состоит из пяти синхронных машин с IEEE-1 типа возбудителями, три из которых являются синхронными компенсаторами и используются только для поддержки реактивной мощности. В системе имеется 11 узлов с нагрузкой.

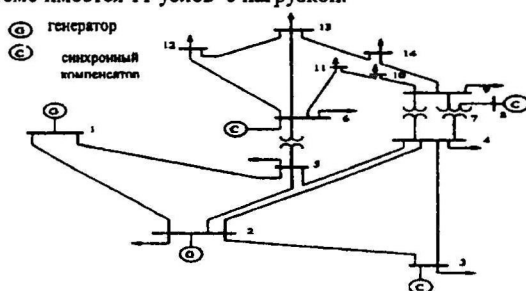
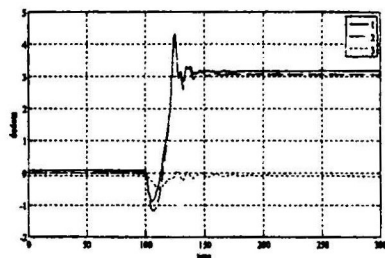
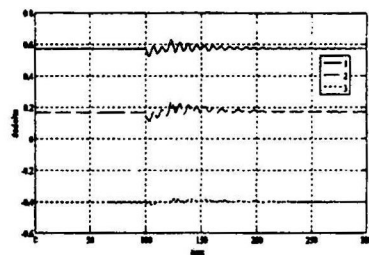


Рис. 12. 5-и машинная система с 14-ю узлами

На рисунке 13 представлены переходные процессы в системе (пример 1) при изменении и восстановлении нагрузки (отключение с последующим подключением через заданный промежуток времени).



Система без регулятора

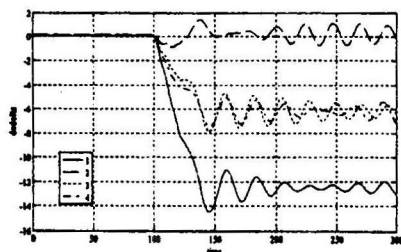


Система с 2-х этапным изохронным регулятором

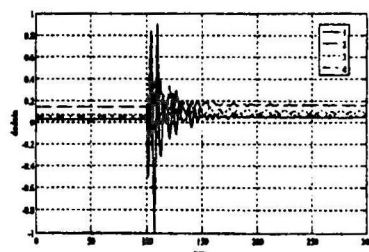
Рис. 13. Переходный процесс при изменении нагрузки для 3-х машинной системы  
1 -  $\delta_{12}$ , 2 -  $\delta_{13}$ , 3 -  $\delta_{23}$

В качестве возмущения также рассматривается короткое замыкание (к.з.) на линии  $i-j$  со стороны узла  $i$ . Такое возмущение моделируется включением дополнительной проводимости, соответствующей виду к.з. (она подсчитывается специальным образом), в узле  $i$ . Для определенности принимается, что к.з. трехфазное, чему теоретически соответствует подключение в узле  $i$  проводимости  $y_{i0}^{к.з.} = \infty$ . Практически  $y_{i0}^{к.з.}$  задается достаточно большим числом.

На рисунке 14 показаны переходные процессы по взаимным углам для 5-и машинной системы (пример 3) при коротком замыкании между узлами 1-2 со стороны узла 2.



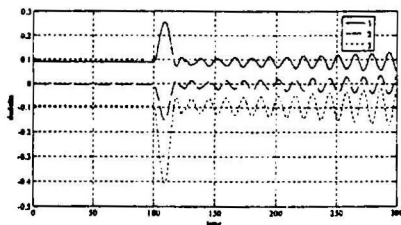
Система без регулятора



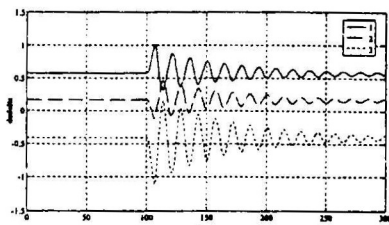
Система с 2-х этапным изохронным регулятором

Рис. 14. Переходный процесс при коротком замыкании в 5-ти машинной системе  
1 -  $\delta_{12}$ , 2 -  $\delta_{13}$ , 3 -  $\delta_{14}$ , 4 -  $\delta_{15}$

На рисунке 15 представлены переходные процессы по взаимным углам для 3-х машинной системы (пример 1) при обрыве линии с последующим восстановлением



Система без регулятора



Система с 2-х этапным изодромным регулятором

Рис. 15. Переходный процесс при обрыве линии для 3-х машинной системы (с 4-я узлами)  
1 -  $\delta_{12}$ , 2 -  $\delta_{13}$ , 3 -  $\delta_{23}$

Следует отметить, что для системы из примера 2, самым тяжелым возмущением является короткое замыкание. При таком возмущении не каждый из применяемых локальных регуляторов способен обеспечить динамическую устойчивость, и ближайший к месту возмущения генератор может выйти из синхронизма. В остальных вариантах рассмотренных возмущений дополнительные регуляторы с перенастройкой параметров по предложенному способу обеспечивают динамическую устойчивость рассмотренных многомашинных ЭТК.

В приложении к диссертации представлены числовые значения параметров рассматриваемых примеров 3-х машинной и 5-и машинной систем, результаты расчетов распределения мощности в сети и установившихся режимов для синхронных генераторов, листинги программ.

#### Основные выводы по диссертационной работе

На основе анализа известных в литературе моделей синхронных машин были выбраны и подробно представлены две модели: модель Парка-Горева, в качестве переменных состояния в которой используются токи и параметры движения ротора; упрощенная модель, в которой в качестве переменных состояния используются параметры движения ротора и эквивалентная ЭДС статора за переходным реактивным сопротивлением. Указанными моделями представлены СГ в моделях рассматриваемых одномашинных и многомашинных ЭТК. Даны выражения для расчета по полной и упрощенной моделям установившихся режимов ЭТК С ГИ при различных вариантах нагрузки.

Разработан способ синтеза типовых регуляторов синхронного генератора, основанный сокращении размерности матрицы. Параметры регулятора выбираются из условия заданного расположения пары корней характеристического уравнения линеаризованной упрощенной модели, определяющих механическое движение ротора, и обеспечивающих требуемое качество переходных процессов в линеаризованной упрощенной модели. Показано, что дополнительные регуляторы, с настройками по разработанному способу, обеспечивают устойчивость одномашинной системы и увеличивают запас устойчивости синхронного генератора по величине демпфирующего момента, создаваемого системой возбуждения, при всех вариантах нагрузки.

На основе компьютерного моделирования переходных процессов проведен анализ устойчивости и качества переходных процессов одномашинной системы при малых начальных отклонениях и различных условиях нагрузки. Показано, что применение дополнительных типовых регуляторов (ПИ, ПД, ПИД, изодромного), с настройками параметров по разработанному способу, обеспечивает устойчивость и

требуемое качество переходных процессов одномашинной системы при малых начальных отклонениях состояния от установившегося режима.

Для обеспечения динамической устойчивости одномашинной системы при изменениях нагрузки предлагается способ перенастройки дополнительного регулятора синхронного генератора. На основе компьютерного моделирования переходных процессов одномашинной системы при изменениях нагрузки показано, что при использовании предлагаемого способа перенастройки регуляторов, удается обеспечить динамическую устойчивость системы при всех рассмотренных вариантах изменения нагрузки.

Предложен способ перенастройки локальных регуляторов синхронных генераторов в многомашинных ЭТК при различных возмущениях.

На основе компьютерного моделирования в пакете Matlab по полным моделям одномашинной, 3-х машинной (с 7 узлами сети) и 5-и машинной (с 14-ю узлами сети) систем показано, что использование дополнительных локальных регуляторов синхронных генераторов улучшает качество переходных процессов при малых возмущениях и обеспечивает динамическую устойчивость при различных возмущениях.

Разработано программное обеспечение для синтеза и настройки дополнительных регуляторов, расчета потокораспределения мощности, установившихся режимов, анализа статической и динамической устойчивости одномашинных и многомашинных ЭТК.

#### Список публикаций по теме диссертации

Статьи в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ:

1. Али З.М., Маликов А.И. Локальное управление для улучшения устойчивости многомашинной энергетической системы // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2010, № 1-2, с. 75-83.

2. Али З.М., Маликов А.И. Влияние настроек регулятора энергетической системы и автоматического регулятора возбуждения на синхронизирующий и демпфирующий моменты // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2010, № 3-4, с. 131-142.

Статья в иностранном журнале на английском языке:

3. Ali Z.M.M, Malikov A.I. Robust techniques for designing power system stabilizer // Journal of theoretical and applied information technology JAITT. November 2009, Vol. 9, No.1, p 20-28.

Статьи, тезисы в сборниках и материалах научных конференций

4. Али З.М., Маликов А.И. Анализ влияния регуляторов для механической составляющей и системы возбуждения на динамику энергосистемы // Тезисы доклада XV Туполевские чтения, международная молодежная научная конференция. 9-10 ноября 2007 г., Казань: КГТУ им А.Н.Туполева. Т.2, с 165.

5. Али З.М., Маликов А.И. Возможности типовых регуляторов в обеспечении устойчивости электроэнергетических систем // Тезисы доклада. IV всероссийская школа-семинар молодых ученых «Проблемы управления и информационные технологии, ПУИТ-08», 23-28 июня 2008 г. Казань: КГТУ им А. Н. Туполева, 2008, с 230-234.

6. Али З.М., Маликов А.И. Влияние регулятора энергетической системы и автоматического регулятора напряжения на синхронизирующий и демпфирующий

моменты //Тезисы доклада. Всероссийский семинар. Аналитическая механика, устойчивость и управление движением. 11-12 ноября 2008 г. Казань: КГТУ им А.Н. Туполева, 2008, с 14-15.

7. Али З.М., Маликов А.И. Локальное управление для улучшения устойчивости многомашинной энергетической системы // Тезисы доклада. XLV всероссийская конференция по проблемам математики, информатики, физики и химии. 20-24 апреля 2009, Москва: РУДН, с. 51-54.

8. Али З.М., Маликов А.И. Локальное управление для улучшения устойчивости многомашинной энергетической системы // Тезисы доклада. XVII Туполевские чтения, международная молодежная научная конференция. 26-28 мая 2009 г, Казань: КГТУ им А Н Туполева, 2009, с. 120-124.

9. Али З.М., Маликов А.И. Синтез типовых регуляторов энергетической системы на основе алгоритма матричного сокращения // Тезисы доклада. X Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. 8-11 июня 2009 г., Иркутск (Россия)-Ханх (Монголия). [http://www.ict.nsc.ru/ws/show\\_abstract.dhtml?ru+205+15451+S](http://www.ict.nsc.ru/ws/show_abstract.dhtml?ru+205+15451+S)

10. Али З.М., Маликов А.И. Нью-методы синтеза робастного регулятора энергетической системы // VI Всероссийская школа-семинар молодых ученых «Управление большими системами», 31 августа – 5 сентября 2009 г. Ижевск: ООО Информационно-изд. центр Бон Анца, 2009, с. 14-25.

11. Али З.М., Маликов А.И. Обеспечение устойчивости энергетической системы с помощью нечеткого регулятора // VI Всероссийская школа-семинар молодых ученых «Управление большими системами», 31 августа – 5 сентября 2009 г., Ижевск: ООО Информационно-изд. центр Бон Анца, 2009, с. 26-37.

12. Али З.М., Маликов А.И. Обеспечение устойчивости энергетической системы с помощью нечеткого регулятора // Тезисы доклада. V Всероссийская научно-техническая конференция Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики АНТЭ-09, 12–13 октября 2009 г. Казань, КГТУ им А. Н. Туполева, 2009, с. 630-635.

13. Али З.М., Маликов А.И. Нью методы синтеза робастного регулятора энергетической системы //XXXIX Международная научно-практическая конфер. «Повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений», 16-20 ноября 2009 г. Москва: ГОУ ВПО МЭИ (ТУ), 2009, с. 189-200.

14. Али З.М., Маликов А.И. Effect of power system stabilizers and automatic voltage regulator gain on synchronizing and damping torques // Тезисы доклада. II Всероссийская конференция «Знания – онтологии – теории» с международным участием, 20–22 октября 2009 г. Новосибирск: Институт Математики СО РАН, 2009, с. 124-128.



---

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Печ.л. 1,25. Усл.печ.л. 1,16. Уч.-изд.л. 1,07.  
Тираж 120 заказ N159.

---

Типография Издательства Казанского государственного  
Технического университета  
420111, Казань, К.Маркса, 10





