

На правах рукописи



Захарова Елена Вячеславовна

КРИТЕРИЙ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ
ОБЪЕДИНЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент
Попов Максим Георгиевич

Официальные оппоненты: Нагай Владимир Иванович
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Южно-Российский
государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова»
Сорокин Дмитрий Владимирович
кандидат технических наук, начальник Центра системных
исследований и разработок ИЭС ААС,
Акционерное общество «Научно-технический центр
Федеральной сетевой компании
Единой энергетической системы»

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Научно-технический центр
Единой энергетической системы»

Защита состоится «24» июня 2016 г. в 12.00 на заседании диссертационного совета
Д212.229.11 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д. 29

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
www.spbstu.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.229.11
к. т. н., доцент



Попов Максим Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Современное развитие электроэнергетических систем характеризуется тенденцией увеличения и концентрации энергопотребления в крупных городах при слабой пропускной способности электрической сети. В сложившихся обстоятельствах возросла проблема обеспечения надежного электроснабжения, которая может быть решена созданием кольцевых схем, что, в свою очередь, в значительной мере усложняет задачу прогнозирования и управления их режимами работы. Обеспечение устойчивой параллельной работы энергосистем и надежного электроснабжения потребителей неразрывно связано с выполнением тщательных трудоемких расчетных исследований с привлечением статических или динамических математических моделей силового оборудования и его систем управления, реализованных в современных специализированных программных комплексах. Постоянное совершенствование и верификация используемых моделей приводят к повышению порядка дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы, что значительно усложняет применение существующих методов количественной оценки запасов по устойчивости. Поэтому быстрый и эффективный поиск (экспресс-анализ) области устойчивых режимов, полученных с использованием качественных критериев для сложных энергообъединений чрезвычайно актуален.

Основополагающие работы, посвященные аналитическим и численным методам исследования статической устойчивости электрических систем, а также средствам ее повышения, были выполнены в период создания Единой электроэнергетической системы страны в середине 30-х годов XX века А.А. Горевым, П.С. Ждановым, С.А. Лебедевым и позднее продолжены под руководством В.А. Веникова. Введение в практику эксплуатации сильного регулирования предопределило необходимость разработки методов исследований, учитывающих возможность самораскачивания вблизи предела по статической устойчивости, основанных на критериях Гурвица, Рауса и Михайлова. Укрупнение энергообъединений, включение их на параллельную работу и интенсивное развитие вычислительной техники определили необходимость разработки новых и совершенствования уже существующих методов анализа и синтеза устойчивых режимов параллельной работы энергосистем. Значительный вклад в решение этих задач внесли О.В. Щербачев, И.А. Груздев, В.А. Масленников, В.А. Строев.

Дальнейшее развитие методов исследования динамических свойств электроэнергетической системы, выполненное профессором А.А. Рагозиным, было направлено не только на выявление условий устойчивого функционирования, но и на обнаружение признаков вырождения устойчивости на основе структурного подхода. Синтез устойчивых в колебательном отношении режимов цепочечных схем сложных ЭЭС, обоснованный в работах А.А. Рагозина и М.Г. Попова, основывается на главной динамической структуре, построенной при условии постоянства потокосцеплений обмоток возбуждения генераторов.

Однако в ряде случаев, как показано в настоящем диссертационном исследовании, область потенциальной устойчивости, определенная с помощью позиционной модели, может включать в себя режимы, характеризующиеся неустойчивым состоянием действительной энергосистемы с интенсивным управлением.

Целью работы является аналитический и расчетный поиск критериев, основанных на демпферных свойствах различных структурных моделей энергосистем, позволяющих

выполнить качественный и быстрый поиск области устойчивых режимов действительного протяженного энергообъединения с интенсивным управлением.

Основные решаемые задачи:

- Функциональный анализ признаков колебательного нарушения устойчивости упрощенных моделей электроэнергетической системы на основе качественного (структурного) исследования членов характеристического полинома.

- Разработка усовершенствованной методики исследования статической устойчивости протяженных энергообъединений на основе структурного подхода, заключающегося в поиске упрощенной модели, качественно отражающей относительное движение регулируемых энергосистем.

- Качественная оценка влияния демпферных моментов неконсервативных сил на устойчивость рассматриваемой энергосистемы вблизи границы области аperiodической устойчивости.

- Получение новых обобщенных выводов о допустимости применения упрощенных математических моделей синхронных машин при исследовании статической устойчивости сложных энергосистем.

- Выявление характерных признаков изменения свободного члена характеристического уравнения системы линеаризованных дифференциальных уравнений электромеханических переходных процессов при утяжелении режима работы электропередачи вплоть до предельного по условиям сходимости.

- Численный поиск критерия колебательного нарушения статической устойчивости и достоверное определение области устойчивых (стабилизируемых) режимов.

Научная новизна работы соискателя. Предложен и обоснован качественно новый критерий, который позволяет осуществить быстрый поиск (экспресс-анализ) области потенциально устойчивых режимов действительной регулируемой энергосистемы произвольной структуры с интенсивным управлением.

Теоретическая и практическая ценность результатов работы.

Обобщенные в диссертации результаты поисковых исследований качественно нового критерия колебательного нарушения статической устойчивости являются развитием теории исследования устойчивости энергосистем на основе структурного подхода.

Практическую ценность результатов диссертационной работы представляют разработанная методика оценки устойчивости энергосистем в краткосрочной перспективе, а также сформулированные в работе рекомендации по увеличению пропускной способности электропередачи за счет обоснованного и допустимого снижения требований к запасам по передаваемой мощности.

Предложенная методика апробирована на разработанном ООО «НПП «РТС-Электро» цифровом диагностическом комплексе программно-аппаратного моделирования ЦДК-РТ.

Методология и методы исследования.

Методология исследований заключается в анализе динамических свойств математической модели сложных энергосистем при вариации множества схемно-режимных расчетных условий.

Исследование динамических свойств сложных ЭЭС осуществлялось с привлечением методов анализа функций действительных и комплексных переменных, а также при использовании численных методов, реализованных в программном обеспечении DoRegim, Matlab, Mathcad.

Основные положения (тезисы) диссертации, выносимые на защиту:

1. Модифицированная методика исследования статической колебательной устойчивости ЭЭС, основанная на применении упрощенных моделей, которая позволяет выполнить первичную, качественную оценку предельных по передаваемой мощности режимов энергосистем различной структуры.
2. Структурный подход к формированию матрицы частных производных, отвечающий строгой постановке задачи исследования и не искажающий характер изменения якобиана.
3. Новый критерий колебательного нарушения статической устойчивости, основанный на контроле изменения свободного члена характеристического уравнения (A_n).
4. Новая методика достоверного определения области устойчивых режимов объединенных энергосистем, базирующаяся на контроле частной производной $\partial A_n / \partial \delta_{отн}$.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением классического математического описания переходных процессов в синхронных машинах и их системах возбуждения, а также сопоставлением результатов с ранее выполненными исследованиями статической устойчивости объединенных энергосистем. Решение систем алгебраических и дифференциальных уравнений переходных процессов осуществлялось с применением численных методов среды Matlab.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на I Всероссийском конгрессе молодых ученых (Санкт-Петербург, 2012 г.); Международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем», проводимой РНК CIGRE (Екатеринбург, 2013 г.; Сочи, 2015 г.); IV Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (Новочеркасск, 2013 г.); Научно-практической конференции с международным участием «Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург 2012, 2013 г.); семинарах «Кибернетика энергетических систем» по тематикам «Электроснабжение промышленных предприятий» (Новочеркасск, 2013 г.) и «Диагностика энергооборудования» (Новочеркасск, 2014 г.); XXI Международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах» (Санкт-Петербург, 2014 г.); IX Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (Чебоксары, 2014 г.). Работа выполнялась при поддержке Минобрнауки России в форме стипендии Правительства Российской Федерации аспирантам образовательных учреждений высшего профессионального образования, соответствующих приоритетным направлениям модернизации и технологического развития экономики России (приказ Минобрнауки России о назначении стипендии №154 от 28.02.2012 г.).

По теме диссертационной работы опубликовано 13 работ, в том числе 5 статей в изданиях, входящих в список рекомендуемых в перечне ВАК РФ.

Диссертация общим объемом 180 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка литературы из 132 источников на 16 страницах. Результаты исследований проиллюстрированы 57 рисунками и 20 таблицами. В Приложении А приведена справка о внедрении результатов диссертационной работы, в Приложении Б на 37 страницах приведена программная реализация разработанного алгоритма процедуры определения области потенциально устойчивых режимов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи, отражена научная новизна и практическая значимость диссертационных исследований.

В первой главе приведено математическое описание методики исследования статической устойчивости электроэнергетических систем с использованием структурного подхода при формировании полной системы линейаризованных дифференциально-алгебраических уравнений. Показано, что предложенная методика определения границы области потенциально устойчивых режимов обладает лучшими показателями быстродействия и позволяет сократить вычислительные затраты (процессорное время) более чем в 100 раз.

Трансформаторы, линии электропередачи и эквивалентная нагрузка представлялись общепринятыми пассивными элементами, двигатели и генераторы описывались уравнениями Горева-Парка, которые, в зависимости от постановки задачи, дополнялись уравнениями переходных процессов в системах возбуждения и их автоматических регуляторах. В связи с необходимостью решения одной из задач диссертации – анализа влияния структуры и параметров демпферной системы синхронных машин на устойчивость энергообъединения в работе применена методика формирования уравнений, которая учитывает неравенство сопротивлений генераторов в осях $q+jd$.

Формирование системы линейаризованных дифференциальных и алгебраических уравнений осуществлялось с привлечением специализированного программного обеспечения (DoRegim, Matlab, Mathcad). В частности, при представлении N -генераторов нерегулируемой моделью $U_f = \text{const}$ без демпферных контуров структура системы уравнений в матричной форме имеет вид:

$$\left(\begin{array}{ccc|ccc} C_p & -E_{N-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_p & 0 & C_{TJ} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{pT'd} & 0 & 0 & C_{Td0(\partial E_q / \partial U_{q \text{ сети}})} \\ \hline 0 & 0 & -\frac{\partial P_{\text{ген}}}{\partial E'_q} & E_N & 0 & -\frac{\partial P_{\text{ген}}}{\partial U_{q \text{ сети}}} & -\frac{\partial P_{\text{ген}}}{\partial U_{d \text{ сети}}} \\ 0 & 0 & -\frac{\partial Q_{\text{ген}}}{\partial E'_q} & 0 & E_N & -\frac{\partial Q_{\text{ген}}}{\partial U_{q \text{ сети}}} & -\frac{\partial Q_{\text{ген}}}{\partial U_{d \text{ сети}}} \\ \hline -\frac{\partial P_{\text{сети}}}{\partial \delta_{\text{ген отн}}} & 0 & \frac{\partial P_{\text{ген}}}{\partial E'_q} & 0 & 0 & \frac{\partial P_{\text{ген}}}{\partial U_{q \text{ сети}}} & -\frac{\partial P_{\text{сети}}}{\partial U_{q \text{ сети}}} & \frac{\partial P_{\text{ген}}}{\partial U_{d \text{ сети}}} & -\frac{\partial P_{\text{сети}}}{\partial U_{d \text{ сети}}} \\ \hline -\frac{\partial Q_{\text{сети}}}{\partial \delta_{\text{ген отн}}} & 0 & \frac{\partial Q_{\text{ген}}}{\partial E'_q} & 0 & 0 & \frac{\partial Q_{\text{ген}}}{\partial U_{q \text{ сети}}} & -\frac{\partial Q_{\text{сети}}}{\partial U_{q \text{ сети}}} & \frac{\partial Q_{\text{ген}}}{\partial U_{d \text{ сети}}} & -\frac{\partial Q_{\text{сети}}}{\partial U_{d \text{ сети}}} \end{array} \right) \times \begin{pmatrix} d\delta_{\text{ген отн}} \\ d\omega_{\text{ген отн}} \\ dE'_q \\ dP_{\text{ген}} \\ dQ_{\text{ген}} \\ dU_{q \text{ сети}} \\ dU_{d \text{ сети}} \end{pmatrix} = 0, \quad (1)$$

где C_p – диагональная подматрица порядка $(N-1)$, состоящая из символов дифференцирования по времени $p = d/dt$; E_{N-1} , E_N – единичные подматрицы порядка $(N-1)$ и N ; C_{TJ} – прямоугольная подматрица, содержащая инерционные постоянные; $C_{pT'd}$ – диагональная подматрица порядка N , содержащая символы дифференцирования и постоянные времени $T'd$; $C_{Td0(\partial E_q / \partial U_{q \text{ сети}})}$ – подматрица частных производных ЭДС по напряжению; $\partial P_{\text{сети}} / \partial \delta_{\text{ген отн}}$, $\partial Q_{\text{сети}} / \partial \delta_{\text{ген отн}}$, $\partial P_{\text{сети}} / \partial U_{q \text{ сети}}$, $\partial P_{\text{сети}} / \partial U_{d \text{ сети}}$, $\partial Q_{\text{сети}} / \partial U_{q \text{ сети}}$, $\partial Q_{\text{сети}} / \partial U_{d \text{ сети}}$ – подматрицы частных производных активной и реактивной мощности сети по относительному углу между ЭДС эквивалентных генераторов и по напряжению; $\partial P_{\text{ген}} / \partial E'_q$, $\partial Q_{\text{ген}} / \partial E'_q$, $\partial P_{\text{ген}} / \partial U_{q \text{ сети}}$, $\partial P_{\text{ген}} / \partial U_{d \text{ сети}}$, $\partial Q_{\text{ген}} / \partial U_{q \text{ сети}}$, $\partial Q_{\text{ген}} / \partial U_{d \text{ сети}}$ – подматрицы частных производных активной и реактивной мощности эквивалентных генераторов по их ЭДС и по напряжению на их выводах.

После исключения алгебраических переменных (напряжений в узлах электрической сети и мощностей) в выражении (1) система уравнений малых колебаний принимает вид:

$$\begin{pmatrix} C_p & -E_{N-1} & 0 \\ C_{21} & C_p & C_{23} \\ C_{31} & 0 & C_{pT'd} + C_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} d\delta_{ген\ отн} \\ d\omega_{ген\ отн} \\ dE'_q \end{pmatrix} = 0, \quad (2)$$

где C_{21} , C_{23} , C_{31} , C_{33} – подматрицы, полученные в ходе преобразований:

$$C_{21} = C_{TJ} \times \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ген}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial P_{ген}}{\partial U_{d\ сети}} \\ \frac{\partial Q_{ген}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial Q_{ген}}{\partial U_{d\ сети}} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ген}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial P_{сети}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial P_{ген}}{\partial U_{d\ сети}} & \frac{\partial P_{сети}}{\partial U_{d\ сети}} \\ \frac{\partial Q_{ген}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial Q_{сети}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial Q_{ген}}{\partial U_{d\ сети}} & \frac{\partial Q_{сети}}{\partial U_{d\ сети}} \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{сети}}{\partial \delta_{ген\ отн}} \\ \frac{\partial Q_{сети}}{\partial \delta_{ген\ отн}} \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$C_{23} = -C_{TJ} \times \left[\begin{pmatrix} -\frac{\partial P_{ген}}{\partial E'_q} \\ \frac{\partial Q_{ген}}{\partial E'_q} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ген}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial P_{ген}}{\partial U_{d\ сети}} \\ \frac{\partial Q_{ген}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial Q_{ген}}{\partial U_{d\ сети}} \end{pmatrix} \times \right. \\ \left. \times \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ген}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial P_{сети}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial P_{ген}}{\partial U_{d\ сети}} & \frac{\partial P_{сети}}{\partial U_{d\ сети}} \\ \frac{\partial Q_{ген}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial Q_{сети}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial Q_{ген}}{\partial U_{d\ сети}} & \frac{\partial Q_{сети}}{\partial U_{d\ сети}} \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ген}}{\partial E'_q} \\ \frac{\partial Q_{ген}}{\partial E'_q} \end{pmatrix} \right]; \quad (4)$$

$$C_{31} = C_{Td0(\partial E_q / \partial U_{q\ сети})} \times \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ген}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial P_{сети}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial P_{ген}}{\partial U_{d\ сети}} & \frac{\partial P_{сети}}{\partial U_{d\ сети}} \\ \frac{\partial Q_{ген}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial Q_{сети}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial Q_{ген}}{\partial U_{d\ сети}} & \frac{\partial Q_{сети}}{\partial U_{d\ сети}} \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{сети}}{\partial \delta_{ген\ отн}} \\ \frac{\partial Q_{сети}}{\partial \delta_{ген\ отн}} \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$C_{33} = -C_{Td0(\partial E_q / \partial U_{q\ сети})} \times \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ген}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial P_{сети}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial P_{ген}}{\partial U_{d\ сети}} & \frac{\partial P_{сети}}{\partial U_{d\ сети}} \\ \frac{\partial Q_{ген}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial Q_{сети}}{\partial U_{q\ сети}} & \frac{\partial Q_{ген}}{\partial U_{d\ сети}} & \frac{\partial Q_{сети}}{\partial U_{d\ сети}} \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ген}}{\partial E'_q} \\ \frac{\partial Q_{ген}}{\partial E'_q} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Свободный член характеристического уравнения системы (2) определяется по выражению:

$$A_{3N-2} = (-1)^{[3N-2]} \cdot \left| \begin{array}{c|c} C_{21} & C_{23} \\ \hline C_{31} & C_{T'd} + C_{33} \end{array} \right|, \quad (7)$$

Матрица коэффициентов эквивалентной системы уравнений малых колебаний при позиционном ($\psi_f = \text{const}$) представлении генераторов может быть получена отбрасыванием последних N -столбцов и N -строк в матрице коэффициентов выражения (2). Свободный член в этом случае:

$$A_{2(N-1)} = (-1)^{[2(N-1)]} \cdot |C_{21}|, \quad (8)$$

Вычисление свободного члена характеристического уравнения A_{3N-2} , $A_{2(N-1)}$ систем линеаризованных дифференциальных уравнений и определение его функциональной зависимости от угла электропередачи производилось как в простейших схемах, так и в более сложных схемах при различном сочетании схемно-расчетных условий (вариация параметров электрической сети и моделей синхронных машин) с целью обобщения выявленных в последующих главах признаков нарушения статической устойчивости.

Во второй главе выполнен качественный, функциональный анализ статической устойчивости простейших схем, приведены результаты аналитического исследования структурных свойств членов характеристического уравнения относительного движения системы. Произведен сопоставительный анализ характера изменения полиномиальных коэффициентов и определителей Гурвица.

Теоретическая взаимосвязь между статической устойчивостью регулируемой ЭЭС и ее позиционной моделью, построенной при постоянстве потокосцеплений обмоток возбуждения генераторов, позволяет выделить среди группы корней доминирующие, отвечающие слабодемпфированному составляющим относительного электромеханического движения и характеризующие устойчивое или неустойчивое состояние системы.

При постоянстве потокосцеплений ($\psi_f = \text{const}$) обмоток возбуждения "N" генераторов и замещении нагрузок постоянными сопротивлениями характеристическое уравнение объединенной ЭЭС содержит только четные степени оператора "p":

$$p^{2(N-1)} + A_2 \cdot p^{2(N-2)} + \dots + A_{2(N-k)} \cdot p^{2k} + \dots + A_{2(N-2)} \cdot p^2 + A_{2(N-1)} = 0 \quad (9)$$

Для обеспечения устойчивости такой системы необходимо и достаточно, чтобы все корни характеристического уравнения были мнимыми. Положительный знак $A_{2(N-1)}$ в выражении (9) является необходимым, но не достаточным условием сохранения устойчивости системы при ее позиционном представлении.

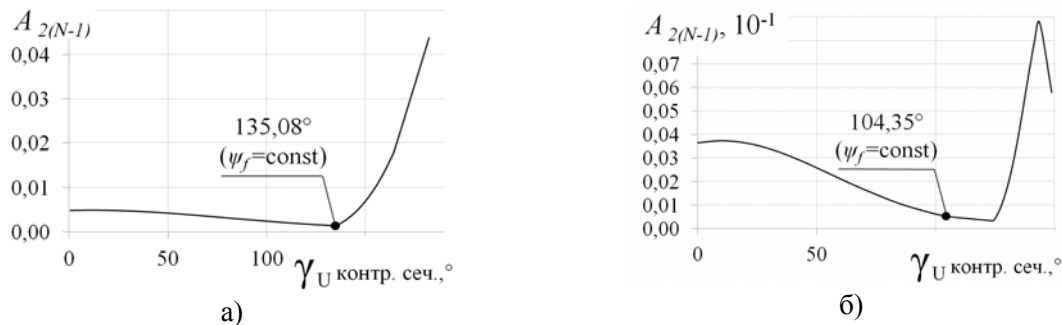


Рисунок 1 – Изменение свободного члена характеристического уравнения позиционной ЭЭС цепочечной (а) и кольцевой (б) структуры при загрузке контролируемого сечения

Дальнейшее утяжеление режима (увеличение угла электропередачи $\gamma_{отн} = \delta_{отн} + \theta_{отн}$, рисунок 1) может сопровождаться повторной сменой знака свободного члена $A_{2(N-1)}$ в связи с появлением второго положительного вещественного корня. При этом положительное значение определителя $|C_{21}|$ (якобиана (8)) системы линеаризованных дифференциальных уравнений малых колебаний ЭЭС будет отвечать неустойчивому состоянию позиционной системы.

Выполненный в работе анализ коэффициентов характеристического уравнения относительного движения позиционной системы выявил характерную зависимость изменения свободного члена $A_{2(N-1)}$ (рисунок 1) при распаде двух пар мнимых корней на пары

$(\alpha \pm j\omega)$ и $(-\alpha \pm j\omega)$. Это объясняется тем, что переход через границу распада корней при дальнейшем утяжелении режима сопровождается сравнительно быстрым ростом по абсолютной величине вещественных частей двух пар комплексно-сопряженных корней $(+\alpha \pm j\omega$ и $-\alpha \pm j\omega)$.

В общем случае при представлении N -генераторов нерегулируемой моделью $U_f = \text{const}$ без демпферных контуров и замещении нагрузок постоянными сопротивлениями характеристическое уравнение (10) системы уравнений малых колебаний (2) может быть получено при раскрытии определителя матрицы коэффициентов:

$$p^{3N-2} + A_1 \cdot p^{3N-3} + \dots + A_{k-2} \cdot p^{3N-k} + \dots + A_{3N-3} \cdot p^1 + A_{3N-2} = 0. \quad (10)$$

Анализ полиномиальных коэффициентов для двухмашинной ($N=2$) эквивалентной энергосистемы при представлении генераторов нерегулируемой моделью $U_f = \text{const}$ позволил выявить функциональную зависимость свободного члена характеристического уравнения от угла электропередачи:

$$A_4 = C_{1-f(E,U)}^1 \cdot \sin(\delta_{g21}) + C_{1-f(E,U)}^2 \cdot \cos(\delta_{g21}) + C_{0-f(E,U)}. \quad (11)$$

Как показали результаты исследований, характер изменения $A_4 = f(\delta_{g21})$ в значительной степени определяется коэффициентами подматриц $\partial P_{сету} / \partial \delta_{ген отн}$ и $\partial Q_{сету} / \partial \delta_{ген отн}$. Элементы подматриц $\partial P_{сету} / \partial U_{q сету}$, $\partial P_{сету} / \partial U_{d сету}$, $\partial Q_{сету} / \partial U_{q сету}$, $\partial Q_{сету} / \partial U_{d сету}$ в соответствии с выражениями (3) - (6) в результате преобразований и вычисления обратной матрицы образуют слагаемые m -ой кратности $C_{m-f(E,U)} \cdot (\sin(m \cdot \delta_{g21}) + \cos(m \cdot \delta_{g21}))$ и могут быть отброшены из рассмотрения в виду их малого влияния.

В выражении (11) коэффициенты $C_{1-f(E,U)}^1$, $C_{1-f(E,U)}^2$, $C_{0-f(E,U)}$ не являются постоянными, поскольку определяются начальным значением относительного угла между ЭДС генераторов δ_{g21} и зависят от ЭДС и напряжения. Функциональная характеристика A_4 при допущении постоянства коэффициентов $C_{1-f(E,U)}^1$, $C_{1-f(E,U)}^2$, $C_{0-f(E,U)}$, отвечающих границе области устойчивости нерегулируемой модели $U_f = \text{const}$ приведена на рисунке 2.

Произведение корней (A_4) характеристического уравнения для двухмашинной схемы кроме составляющих относительного движения $\Pi(\alpha_{3,4} \pm j\beta_{3,4})$ содержит аperiodические корни $(\alpha_{1,2})$, соответствующие частным решениям дифференциальных уравнений переходных процессов в обмотке возбуждения (рисунок 2, таблица 1). Указанные корни $(\alpha_{1,2})$ мало меняются по абсолютному значению (рисунок 2) и являются отрицательными во всей области рассматриваемых режимов.

В общем случае при нечетном числе эквивалентных генераторов график A_{3N-2} (7) будет располагаться ниже оси абсцисс в области отрицательных значений свободного члена. В области устойчивых режимов модели $U_f = \text{const}$ произведение доминирующих составляющих относительного движения $\Pi(\alpha_{3,4} \pm j\beta_{3,4})$ пропорционально изменению произведения всех корней характеристического уравнения. Изменение

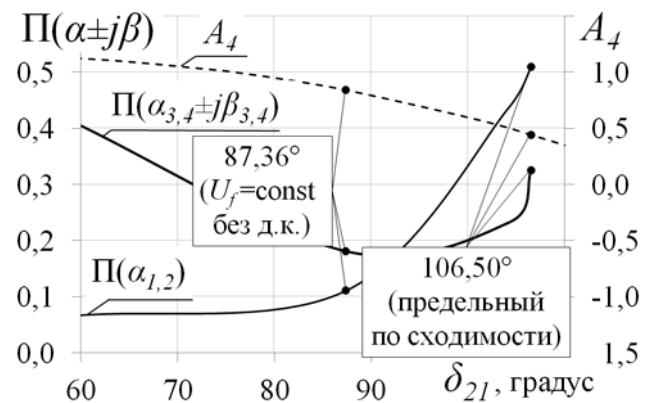


Рисунок 2 – Изменение произведения корней характеристического уравнения и свободного члена в функции относительного угла

указанного произведения $\Pi(a_{3,4} \pm j\beta_{3,4})$ также представлено на рисунке 2.

Вариация коэффициентов полинома (10) с учетом требований критерия Гурвица позволяет установить, что имеет место перераспределение вещественных частей среди доминирующих корней системы, которое сопровождается возрастанием затухания электромеханических составляющих движения (таблица 1). В стабилизированной системе принцип перераспределения вещественных частей корней характеристического уравнения оказывается еще более ярко выраженным.

Таблица 1 – Коэффициенты характеристического полинома нерегулируемой модели ($U_f = \text{const}$) и определители Гурвица

Угол между ЭДС / корни характеристического уравнения	Коэффициенты характеристического уравнения					Определители Гурвица			
	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4
$\delta_{g21}=58,75^\circ$ -0,314; -0,209; -0,074±j0,640	1,0	+0,670	+16,195	+8,409	+1,055	+0,670	+2,447	+20,108	+21,212
$\delta_{g21}=87,36^\circ$ -0,333; -0,333; -0,001±j0,425	1,0	+0,668	+7,260	+4,753	+0,814	+0,668	+0,095	+0,089	+0,073
$\delta_{g21}=106,50^\circ$ -1,743; -0,357; +0,714±j0,083	1,0	+0,672	-1,595	+0,754	+0,487	+0,672	-1,826	-1,570	-0,777

Сопоставление характера изменения корней характеристического уравнения (рисунок 2) и дополнительных миноров, полученных по алгебраическому критерию Гурвица, для эквивалентной двухмашинной схемы ЭЭС (таблица 1) подтверждает, что переход через найденную границу области устойчивости ($\delta_{g21}=87,36^\circ$) модели $U_f = \text{const}$ сопровождается появлением отрицательных значений определителей Гурвица. Данное положение также подтверждает допустимость принятых при анализе упрощений и достоверность полученных при этом результатов.

Аналогичные исследования для схем цепочечной электропередачи с тремя ($N=3$) эквивалентными генераторами показали, что при представлении генераторов нерегулируемой моделью $U_f = \text{const}$ без демпферных контуров и замещении нагрузок постоянными сопротивлениями свободный член A_7 является знакоопределенной (положительной) функцией и имеет экстремальную точку в области углов, отвечающих границе устойчивости энергосистемы (рисунок 3).

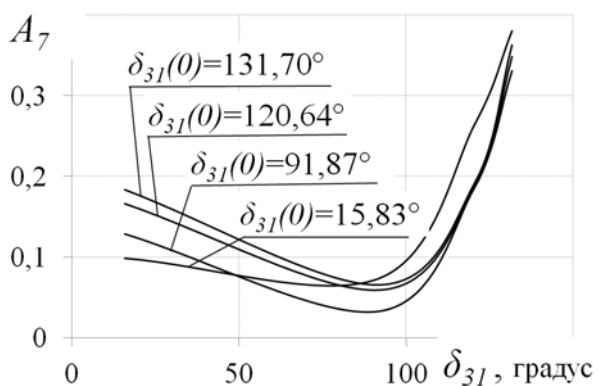


Рисунок 3 – Изменение свободного члена характеристического уравнения в функции относительного угла δ_{31}

малая относительная величина активных потерь мощности в сети при замещении ее элементов постоянными сопротивлениями меняется незначительно при последовательном

В результате анализа коэффициентов характеристического полинома системы дифференциальных уравнений объединенной ЭЭС, содержащей N эквивалентных генераторов установлено, что подматрицы частных производных мощности по напряжению и ЭДС а также ЭДС по напряжению $\partial P_{ген} / \partial U_q \text{ сети}, \partial P_{ген} / \partial U_d \text{ сети}, \partial Q_{ген} / \partial U_q \text{ сети}, \partial Q_{ген} / \partial U_d \text{ сети}, \partial P_{ген} / \partial E'_q, \partial Q_{ген} / \partial E'_q, C_{Td0} (\partial E_q / \partial U_q \text{ сети})$ не содержат тригонометрических функций относительного угла ЭДС $\delta_{ген \text{ отн}}$. При этом

утяжелении режима. В связи с этим при проведении первичного качественного анализа изменения свободного члена A_{3N-2} ЭДС, напряжения и проводимости, входящие в указанные подматрицы, могут быть приняты постоянными. С учетом принятых допущений можно заключить, что характер изменения свободного члена A_{3N-2} будет аналогичен представленному на рисунках 2, 3 и определяется величиной определителя матрицы коэффициентов (2), в которую входят подматрицы частных производных мощности по напряжению и относительному углу.

Выявленные в данной главе характерные признаки нарушения устойчивости, связанные с ними изменения полиномиальных коэффициентов, позволяют развить методы исследования динамических свойств объединенных энергосистем произвольной структуры и сформулировать на этой основе новые практические критерии оценки устойчивости.

В третьей главе осуществляется выбор и обоснование наиболее характерных упрощенных моделей ЭЭС различной структуры, отражающих доминирующие составляющие относительного электромеханического движения и позволяющих выполнить поиск области потенциально устойчивых режимов с приемлемой погрешностью.

Под потенциально устойчивым режимом понимаются условия функционирования объединенной энергосистемы, в которых она может быть устойчива при введении любого (ненулевого) стабилизационного воздействия через систему интенсивного управления возбуждением с невырожденной структурой. Координация настроек, усиление стабилизации в АРВ при этом может быть выполнена независимо, с целью некоторого (в большинстве случаев незначительного, как будет показано далее) расширения области устойчивости.

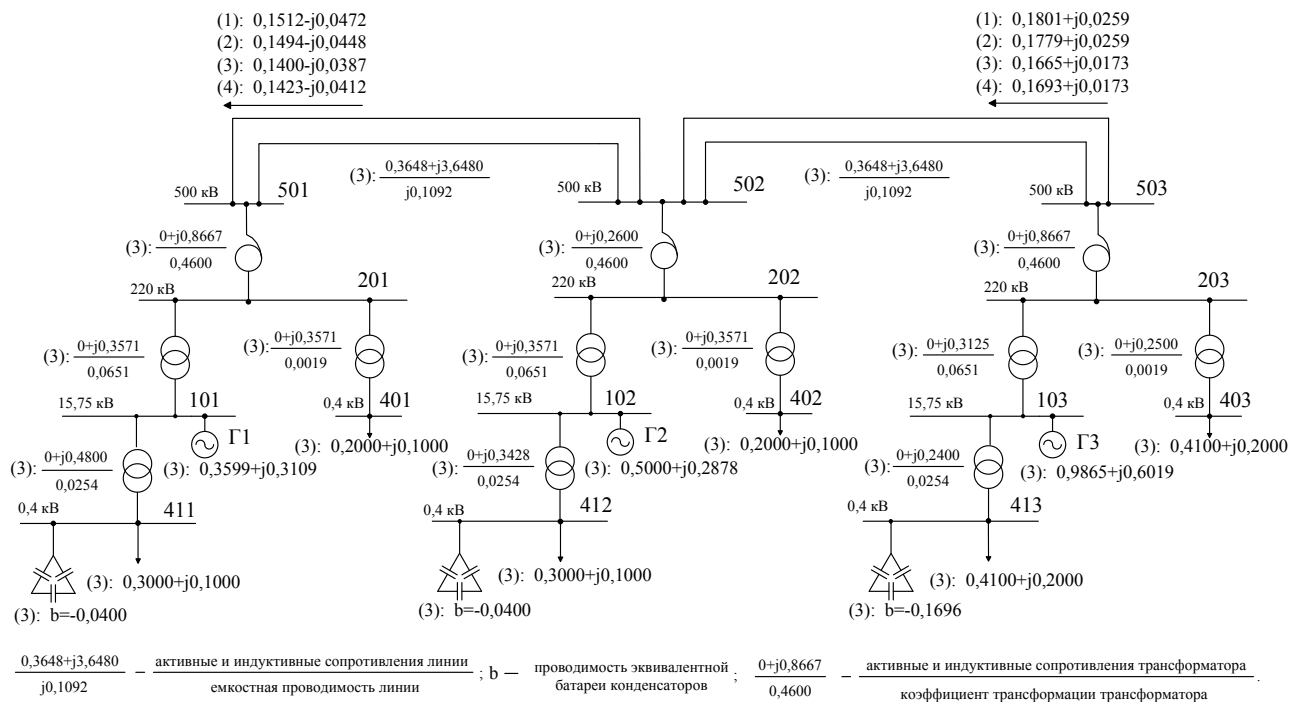


Рисунок 4 – Расчетная цепочечная схема энергосистемы при вариации соотношений установленных мощностей приемной и передающей частей ЭЭС.

Примечание:

(1) $P_{ном}^{(\Gamma 1)} = 0,25 \cdot S_{баз}$; $P_{ном}^{(\Gamma 2)} = P_{ном}^{(\Gamma 3)} = 0,5 \cdot S_{баз}$. (2) $P_{ном}^{(\Gamma 1)} = P_{ном}^{(\Gamma 2)} = P_{ном}^{(\Gamma 3)} = 0,5 \cdot S_{баз}$.
 (3) $P_{ном}^{(\Gamma 1)} = P_{ном}^{(\Gamma 2)} = 0,5 \cdot S_{баз}$; $P_{ном}^{(\Gamma 3)} = S_{баз}$. (4) $P_{ном}^{(\Gamma 1)} = 0,25 \cdot S_{баз}$; $P_{ном}^{(\Gamma 2)} = 0,5 \cdot S_{баз}$; $P_{ном}^{(\Gamma 3)} = S_{баз}$.

Таблица 2 – Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения различных моделей ЭЭС при $P_{ном}^{(r1)} = P_{ном}^{(r2)} = 0,5 \cdot S_{баз}$; $P_{ном}^{(r3)} = S_{баз}$

Обменная мощность в сечении 501 - 502, о.е./ угол электропередачи $\gamma_{503-501}$, градус	Запас мощности в сечении 501 - 502, %	Позиционная модель ЭЭС $\psi_f = \text{const}$	Нерегулируемая модель ЭЭС $U_f = \text{const}$		Модель ЭЭС с АРВ-ПД	Модель ЭЭС с АРВ-СД (со средневзв. настройками)	Модель ЭЭС с АРВ-СД (с макс. настройками)
			без д.к. ($x_{srd} = \infty$; $x_{srq} = \infty$)	д.к. в оси d ($x_{srd} = \infty$)			
двухцепное исполнение ($Z_{дл} = 0,3648 + j3,6480$ о.е.)							
0,99 / 92,63° (предельный по условиям сходимости)	1,06	0±j0,167 0±j0,529	+0,390± j0,208	+0,403± j0,202	+0,106± j0,376	+0,590; -0,492	+0,373; -0,312
			-0,165± j0,529	-0,185± j0,535	-0,199± j0,530	-0,512± j0,416	-1,110± j0,256
1,00 / 88,76° (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,39	0±j0,205 0±j0,547	+0,277± j0,226	+0,286± j0,221	+0,078± j0,375	+0,144; -0,162	-0,001± j0,002
			-0,158± j0,546	-0,180± j0,553	-0,161± j0,549	-0,531± j0,427	-1,166± j0,268
1,00 / 88,43° (АРВ-СД со средневзв. настройками)*	0,35	0±j0,208 0±j0,548	+0,268± j0,227	+0,276± j0,223	+0,076± j0,375	-0,016± j0,002	-0,021± j0,016
			-0,158± j0,547	-0,180± j0,554	-0,159± j0,550	-0,533± j0,427	-1,171± j0,269
0,99 / 74,99° ($U_f = \text{const}$ д.к. в оси d)*	0,77	0±j0,313 0±j0,604	+0,001± j0,313	-0,001± j0,313	+0,045± j0,384	-0,179± j0,175	-0,203± j0,106
			-0,144± j0,604	-0,171± j0,610	-0,086± j0,607	-0,601± j0,463	-1,332± j0,308
0,99 / 74,98° ($U_f = \text{const}$ без д.к.)*	0,78	0±j0,313 0±j0,604	-0,001± j0,313	-0,001± j0,313	+0,045± j0,384	-0,179± j0,175	-0,203± j0,106
			-0,144± j0,604	-0,171± j0,610	-0,086± j0,607	-0,601± j0,463	-1,332± j0,308

* В скобках указана модель ЭЭС, для которой указанная обменная мощность и угол электропередачи являются предельными.

Качественная оценка влияния демпферных моментов на устойчивость исследуемых цепочечных и кольцевых схем энергосистемы вблизи границы области ее устойчивости при различном соотношении установленных мощностей и вариации жесткости ЛЭП выполнялась посредством загрузки электропередачи в контролируемом сечении.

Область потенциальной устойчивости, найденная для упрощенной модели в виде постоянства потокосцеплений контуров ротора ($\psi_f = \text{const}$) цепочечных энергосистем протяженностью более 1200 км, с приемлемой погрешностью (от 0,31% до 3,22%) соответствует искомой границе колебательной устойчивости регулируемой системы. Применение модели $U_f = \text{const}$ может быть целесообразно лишь для цепочечных расчетных схем с межсистемными связями общей протяженностью до 1200 км.

Граница области потенциально устойчивых (стабилизируемых) в колебательном отношении режимов объединенных энергосистем кольцевой структуры отвечает их нерегулируемому ($U_f = \text{const}$ без демпферных контуров) представлению. Также в непосредственной близости к максимуму располагается предельный режим позиционной ($\psi_f = \text{const}$) модели (рисунок 5).

Обобщая результаты многочисленных расчетных исследований следует отметить, что область потенциально устойчивых режимов, отвечающая нерегулируемому ($U_f = \text{const}$) представлению эквивалентных генераторов, независимо от структуры и расчетных условий находится вблизи максимума угловой характеристики (запас от 0,01% до 10%) и характеризует наибольшее использование электропередачи.

Требуемым нормативным запасам в 8% и 20% отвечают режимы, располагающиеся внутри области потенциально устойчивых режимов, определенных с использованием предложенных структурных критериев и характеризующиеся при введении стабилизации декрементом затухания $\alpha = -0,3 \dots -0,4 \text{ с}^{-1}$.

Усиление стабилизации в системе управления возбуждением позволяет расширить область устойчивости относительно искомой границы потенциально устойчивых режимов не более чем на 0,02%...6,9% относительно максимума угловой характеристики. В этом случае величина запаса по передаваемой мощности составляет от 0,05% до 0,50%, что, несмотря на устойчивое состояние системы, не удовлетворяет требованиям Методических указаний.

Выполненные в данной главе исследования по определению границ области колебательной устойчивости протяженных ЭЭС различной структуры подтвердили обоснованность применения их позиционных ($\psi_f = \text{const}$) и нерегулируемых ($U_f = \text{const}$) моделей для проведения первичной, качественной оценки предельных режимов. На этой обобщенной основе в диссертационной работе выполнен поиск нового критерия статической устойчивости современных энергосистем.

В четвертой главе выполнено исследование характера изменения свободного члена характеристического уравнения относительного движения позиционной и нерегулируемой моделей ЭЭС при утяжелении режима ее работы. На основе анализа полученных зависимостей обоснован и сформулирован новый критерий колебательной статической устойчивости сложных энергосистем.

Известно, что

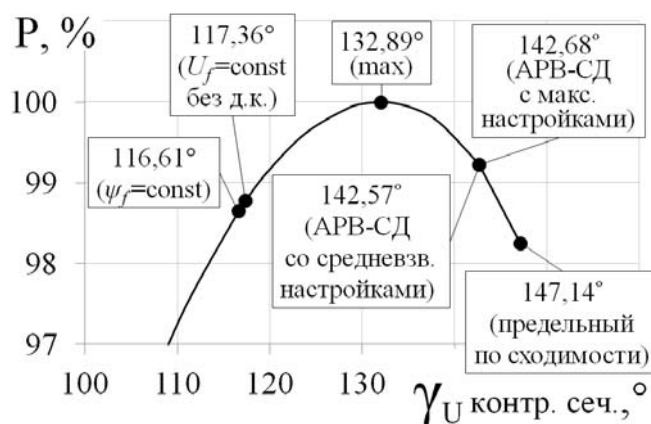


Рисунок 5 – Угловая характеристика кольцевой электропередачи при четырехкратном соотношении установленной мощности приемной и передающей частей ОЭС $P^{(Г2)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$; $P^{(Г1)} = P^{(Г3)} = P^{(Г4)} = P^{(Г5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$; $P^{(Г6)} = S_{\text{баз}}$

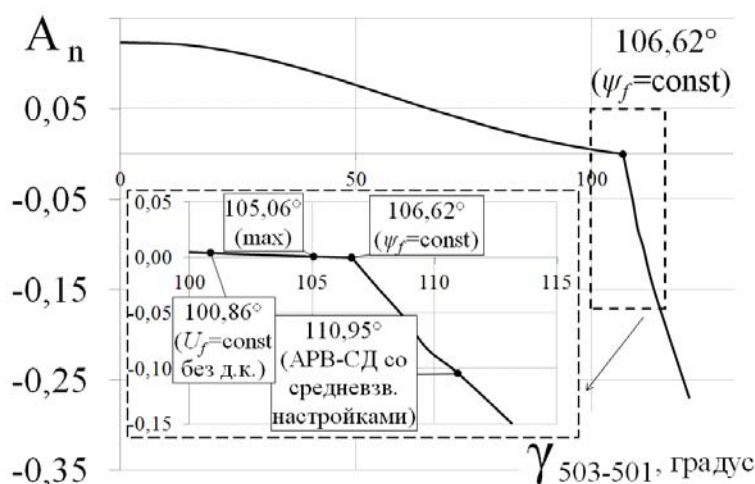


Рисунок 6 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы в процессе утяжеления режима при позиционном ($\psi_f = \text{const}$) представлении ЭЭС $P_{\text{ном}}^{(Г1)} = P_{\text{ном}}^{(Г2)} = P_{\text{ном}}^{(Г3)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ (одноцепное исполнение)

апериодическое нарушение устойчивости ЭЭС, в том числе и ее позиционной модели ($\psi_f = \text{const}$), характеризуется изменением знака свободного члена A_n (рисунок 6) характеристического уравнения системы.

Область устойчивых режимов позиционной модели ($\psi_f = \text{const}$) ЭЭС при двукратном и более соотношении установленных мощностей ее передающей и приемной частей, как показано в табл. 2 включает в себя предельный по условиям сходимости режим, а ее граница располагается относительно него в некотором отдалении (невозможно определить расчетным способом).

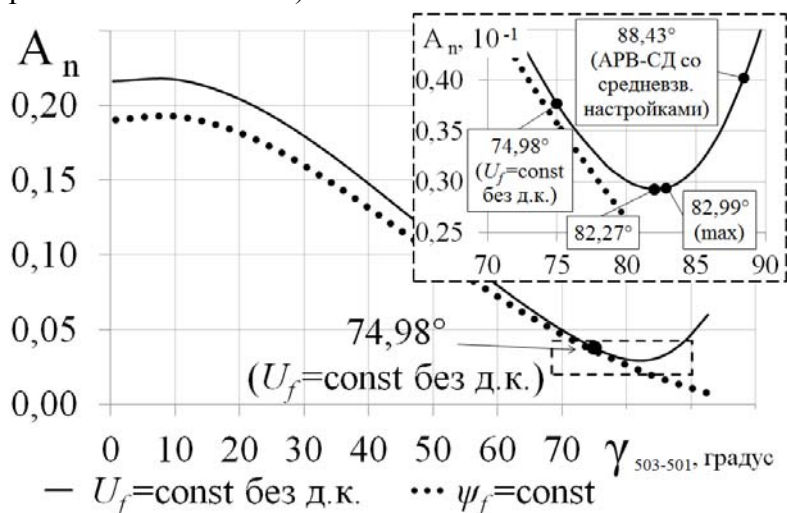


Рисунок 7 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы в процессе утяжеления режима при позиционном ($\psi_f = \text{const}$) и нерегулируемом ($U_f = \text{const}$) представлении ЭЭС $P^{(T1)} = P^{(T2)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$; $P^{(T3)} = S_{\text{баз}}$ (двухцепное исполнение)

На рисунке 7 пунктиром показано изменение свободного члена при последовательной загрузке контролируемого сечения. Определяющей для этих расчетных случаев является нерегулируемая модель $U_f = \text{const}$, для которой колебательное нарушение устойчивости характеризуется на рисунке 7 минимумом характеристики $A_n = f(\gamma_{\text{отн}})$.

Выполненными в диссертации расчетными исследованиями установлено, что область устойчивости, определяемая с помощью

предложенных в главе 3 упрощенных моделей $\psi_f = \text{const}$ и $U_f = \text{const}$, всегда находится левее минимума свободного члена A_n и позволяет достоверно определять стабилизируемые в колебательном отношении режимы.

Во всех исследуемых схемно-режимных условиях независимо от структуры (цепочечная или кольцевая) и жесткости электропередачи граница области статической колебательной устойчивости характеризуется минимумом зависимости $A_n = f(\delta_{\text{отн}})$ без смены знака свободного члена

На основе выполненного в диссертационной работе анализа изменения A_n сформулирован и обоснован новый критерий колебательного нарушения статической устойчивости – изменение знака первой производной (минимум характеристики) $\partial A_n / \partial \delta_{\text{отн}}$.

Для оценки эффективности предложенного алгоритма определения границы области потенциально устойчивых режимов выполнены исследования по оценке вычислительных затрат на ЭВМ с двухядерным процессором Core-i5 с тактовой частотой 2,50 ГГц в среде Matlab. Как показали результаты исследований, применение предложенного практического критерия позволяет значительно сократить вычислительные затраты даже для схем ЭЭС, характеризующихся незначительным порядком системы уравнений переходных процессов (таблица 3).

Время вычисления коэффициентов характеристического полинома и собственных значений матрицы коэффициентов эквивалентной системы линеаризованных уравнений переходных процессов в нерегулируемой модели $U_f = \text{const}$ на два порядка меньше

аналогичного времени расчета в полной системе дифференциально-алгебраических уравнений, что позволяет говорить об эффективности разработанного алгоритма.

Таблица 3 – Результаты оценки эффективности разработанного алгоритма

Наименование показателя	Нерегулируемая модель $U_f = \text{const}$		Г1, Г2, Г3 с АРВ-СД д.к. в осях q, d	
	полная система дифференциально-алгебраических уравнений	эквивалентная система дифференц. уравнений	полная система дифференциально-алгебраических уравнений	эквивалентная система дифференциально-алгебраических уравнений
Порядок системы уравнений	43	7	79	55
Число ненулевых элементов	192 (10,38%)	31 (63,27%)	336 (5,38%)	232 (7,67%)
Приведенное вычислительное время	0,074	0,006	1,000	0,355

Сформулированные в диссертации рекомендации по выбору упрощенной модели и критерии могут быть использованы проектными организациями, объединенными и региональными диспетчерскими управлениями для экспресс-анализа области устойчивости в современных энергосистемах произвольной структуры. Работа энергосистемы, в найденной с помощью предложенного критерия области устойчивых режимов, характеризуется наибольшим использованием электропередачи за счет научно обоснованного снижения требований к запасам по передаваемой мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате сравнительного анализа рассчитанных границ области колебательной устойчивости ЭЭС показана возможность применения упрощенных моделей, позволяющих выполнить первичную, качественную оценку предельных по передаваемой мощности режимов энергосистем.

2. Для энергосистем цепочечной структуры упрощенное представление генераторов при постоянстве потокосцеплений контуров ротора ($\psi_f = \text{const}$) характеризует искомую границу колебательной устойчивости. Применение модели $U_f = \text{const}$ может быть оправдано лишь для энергообъединений с жесткими межсистемными связями общей протяженностью до 1200 км.

Граница области стабилизируемых в колебательном отношении режимов объединенных энергосистем кольцевой структуры соответствует их нерегулируемому представлению ($U_f = \text{const}$ без демпферных контуров). Граница области устойчивости позиционной модели ($\psi_f = \text{const}$) ЭЭС такой структуры также находится в непосредственной близости предельных режимов нерегулируемой системы.

3. Показано, что введение быстродействующего управления возбуждением синхронных машин со средними настройками регуляторов сильного действия позволяет стабилизировать систему во всей найденной области потенциально устойчивых режимов, а также вплоть до зоны искусственной устойчивости. В отдельных случаях для достижения устойчивого состояния в зоне искусственной устойчивости требуется усиление стабилизации при максимальных значениях коэффициентов без решения задачи их оптимизации.

4. В результате компьютерных исследований характера изменения свободного члена характеристического уравнения относительного движения позиционной $\psi_f = \text{const}$ и

нерегулируемой $U_f = \text{const}$ моделей ЭЭС при утяжелении режима ее работы установлено, что во всех исследуемых схемно-режимных условиях независимо от структуры и жесткости электропередачи граница области статической колебательной устойчивости не характеризуется сменой знака свободного члена.

Граница области устойчивости, определяемая в пространстве относительных углов с помощью предложенных упрощенных моделей, всегда находится левее минимума свободного члена A_n и позволяет гарантированно определять стабилизируемые в колебательном отношении режимы с запасами по передаваемой мощности не более 10%.

5. Сформулирован и обоснован новый критерий колебательного нарушения статической устойчивости, основанный на контроле перехода через нуль частной производной $\partial A_n / \partial \delta_{отн} = 0$. Применение данного практического критерия позволяет выполнить быструю и достоверную оценку границы области устойчивых режимов протяженных энергообъединений с интенсивным управлением.

6. Работа энергосистемы в найденной с помощью предложенного критерия области устойчивых режимов характеризуется минимальными и допустимыми по условиям обеспечения устойчивости запасами по передаваемой мощности. Применение предложенного критерия $\partial A_n / \partial \delta_{отн} = 0$ контроля устойчивости объединенных энергосистем позволяет сформулировать методические рекомендации по научно обоснованному снижению требований к запасам по передаваемой мощности.

7. Разработана модифицированная методика исследования статической колебательной устойчивости ЭЭС, основанная на применении упрощенных моделей, которая позволяет выполнить первичную, качественную оценку предельных по передаваемой мощности режимов энергосистем различной структуры.

Выполнена оценка эффективности разработанного алгоритма определения границы области устойчивых режимов. Показано, что предложенная методика обладает лучшими показателями быстродействия и позволяет сократить вычислительные затраты.

8. Предложенная усовершенствованная методика оценки статической колебательной устойчивости может быть использована проектными организациями, объединенными и региональными диспетчерскими управлениями для экспресс-анализа области устойчивости в современных энергосистемах произвольной структуры и формулирования требований к быстродействию и селективности основных и резервных средств защиты и противоаварийной автоматики.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных в перечне ВАК РФ:

1. Захарова, Е.В. Исследование устойчивости объединенных энергосистем на основе структурного подхода / М.Г. Попов, Е.В. Захарова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2013. — № 3 (178). — с. 110 - 117.
2. Захарова, Е.В. Исследование статической устойчивости кольцевых объединенных энергосистем на основе структурных критериев / Е.В. Захарова, М.Г. Попов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2014. — № 3. — с. 15 - 21.

3. Захарова, Е.В. Обобщенный анализ статической устойчивости объединенных энергосистем произвольной структуры / М.Г. Попов, Е.В. Захарова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2014. — № 5-6. — с. 65 - 73.
4. Захарова, Е.В. Поисковые исследования структурных критериев статической устойчивости сложных объединенных энергосистем / М.Г. Попов, Е.В. Захарова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2015. — № 1 (537). — с. 37 - 44.
5. Захарова, Е.В. Исследование статической устойчивости сложных объединенных энергосистем произвольной структуры / М.Г. Попов, Е.В. Захарова, И.В. Синянский, К.С. Горячевский // Электрические станции. — 2015. — № 11. — с. 61 - 69.

Публикации в других изданиях:

6. Захарова, Е.В. Развитие методов исследований динамической устойчивости электроэнергетических систем / Е.В. Захарова, М.Г. Попов // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых, Выпуск 2. — СПб. : НИУ ИТМО, 2012. — с. 292 - 294.
7. Захарова, Е.В. Исследование устойчивости объединенных энергосистем на основе структурного подхода / М.Г. Попов, Е.В. Захарова // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сборник докладов. — Екатеринбург, 2013. — С.4.1-12. — с. 1 - 6.
8. Захарова, Е.В. Обобщенный анализ статической устойчивости объединенных энергосистем с цепочечной структурой / Е.В. Захарова, М.Г. Попов // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. IV междунар. науч.-техн. конф., т. 2. — Новочеркасск : Лик, 2013. — с. 225 - 229.
9. Захарова, Е.В. Структурные критерии устойчивости объединенных энергосистем / Е.В. Захарова, М.Г. Попов // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем СПбГПУ. ч. 1. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2014. — с. 35 - 38.
10. Захарова, Е.В. Поиск критериев статической устойчивости сложных объединенных энергосистем произвольной структуры / М.Г. Попов, Е.В. Захарова // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах: материалы Международной научно-методической конференции, т. 3. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2014. — с. 118 - 121.
11. Захарова, Е.В. Поисковые исследования критериев статической устойчивости на основе структурного подхода / М.Г. Попов, Е.В. Захарова // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы 9-й Всерос. науч.-техн. конф. — Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. — с. 314 - 316.
12. Захарова, Е.В. Структурные модели и критерии статической устойчивости протяженных энергообъединений / М.Г. Попов, Е.В. Захарова // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. — 2014. — № 4. — с. 8 - 19.
13. Захарова, Е.В. Структурные критерии статической устойчивости протяженных энергообъединений / М.Г. Попов, Е.В. Захарова // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сборник докладов. — Сочи, 2015. — С.П-13. — с. 1 - 6.