

Федеральное государственное  
автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

На правах рукописи



Захарова Елена Вячеславовна

КРИТЕРИЙ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ  
ОБЪЕДИНЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Попов Максим Георгиевич  
кандидат технических наук,  
доцент

Санкт-Петербург – 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение в проблему и общая постановка задачи исследований .....	4
1 Математическое описание и численные методы исследования статической устойчивости электроэнергетической системы .....	11
1.1 Математические модели линий электропередачи, трансформаторов и обобщенной нагрузки .....	12
1.2 Математическое описание синхронных машин, их систем возбуждения с автоматическими регуляторами и асинхронных двигателей .....	14
1.3 Формирование общей и эквивалентной систем алгебраических уравнений переходных процессов электрической сети .....	18
1.4 Методика определения границы области потенциально устойчивых режимов .....	21
1.4.1 Формирование матриц коэффициентов уравнений чувствительности позиционной модели электроэнергетической системы .....	25
1.4.2 Формирование матриц коэффициентов уравнений чувствительности нерегулируемой модели электроэнергетической системы .....	32
1.5 Разработка алгоритма определения границы области потенциально устойчивых режимов и оценка его эффективности .....	33
1.6 Выводы .....	39
2 Качественный анализ динамических свойств электроэнергетических систем .....	41
2.1 Анализ динамических свойств позиционной модели электроэнергетических систем .....	41
2.2 Анализ динамических свойств нерегулируемой модели электроэнергетической системы при колебательном характере нарушения устойчивости .....	43
2.2.1 Анализ полиномиальных коэффициентов характеристического уравнения двухмашинной эквивалентной энергосистемы .....	44
2.2.2 Анализ полиномиальных коэффициентов характеристического уравнения в трехмашинной схеме .....	51
2.2.3 Анализ полиномиальных коэффициентов характеристического уравнения в многомашинной схеме .....	55
2.3 Выводы .....	57

3	Исследование статической устойчивости объединенных энергосистем на основе структурного подхода.....	58
3.1	Исследование устойчивости объединенных энергосистем цепочечной структуры	59
3.2.1	Исследование статической устойчивости цепочечной электропередачи объединенной энергосистемы с тремя эквивалентными генераторами.....	60
3.2.2	Исследование статической устойчивости цепочечной электропередачи объединенной энергосистемы с пятью эквивалентными генераторами.....	75
3.2	Исследование устойчивости объединенных энергосистем кольцевой структуры.	87
3.3	Выводы.....	101
4	Обоснование структурного критерия статической устойчивости.....	102
4.1	Исследование характера изменения свободного члена характеристического уравнения системы электропередачи цепочечной структуры.....	102
4.2	Исследование характера изменения свободного члена характеристического уравнения системы электропередачи кольцевой структуры.....	117
4.3	Выводы.....	123
	Основные результаты работы.....	125
	Приложение А (обязательное) Справка о внедрении.....	128
	Приложение Б (справочное) Программная реализация алгоритма процедуры формирования матрицы, вычисления коэффициентов характеристического полинома и собственных значений матрицы коэффициентов системы линеаризованных дифференциальных уравнений.....	129
	Список литературы.....	165

## **ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМУ И ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.**

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 частично может быть решена созданием кольцевых схем питания, что, в свою очередь, в значительной мере усложняет задачу прогнозирования и управления режимами работы таких энергосистем [5, 8, 12, 18, 33, 59, 60, 61, 93, 116, 122, 125, 130].

Прогноз и оценка допустимости режимов выполняется при исследовании задачи устойчивости электрической сети, сложность и трудоемкость которой обусловлена многообразием схемно-режимных условий [15, 16, 19, 35, 72, 73, 100, 101, 102, 106, 113, 117, 124, 132]. Первые работы в этом направлении были выполнены в период создания Единой электроэнергетической системы страны в середине 30-х годов XX века. А.А. Горев [13, 14], П.С. Жданов [24, 25, 26] и С.А. Лебедев [38] заложили основы современных аналитических и численных методов исследования статической устойчивости электрических систем. Несколько позднее в работах И.М. Марковича [46, 47], И.С. Брука [17], С.А. Совалова [79, 80] были предложены практические критерии, основанные на контроле первых производных мощности по режимным параметрам. Способы предотвращения лавины напряжения и частоты средствами пропорционального регулирования возбуждения были рассмотрены в работах К.А. Смирнова [78], Д.И. Азарьева [1], И.А. Сыромятникова [84, 85]. Для обеспечения устойчивости дальних линий электропередачи Л.В. Цукерником [92],

Г.Р. Герценбергом [9], М.М. Ботвинником [2, 3, 4], М.В. Мееровым [50, 51], И.А. Глебовым [10, 11] и др. были предложены средства сильного регулирования возбуждения, которые позднее были развиты в исследованиях ВНИИ Электромашиностроения, МЭИ, ЛПИ, ВНИИЭ, СибНИИЭ и ряда других организаций, завершившихся разработкой унифицированных регуляторов возбуждения АРВ-СД.

Введение в практику эксплуатации сильного регулирования предопределило необходимость разработки методов исследований, учитывающих возможность самораскачивания вблизи предела по статической устойчивости, основанных на критериях Гурвица, Рауса, Михайлова [76, 77]. Первые эффективные методы для определения области устойчивости в простых эквивалентных схемах, содержащих две-три станции, изложены в работах И.В. Литкенс [44, 45], Г.В. Михневича [57, 58], И.Д. Урусова [88], О.В. Щербачева [96], М.Л. Левинштейна [39, 40, 41, 42, 43] и др. Укрупнение энергообъединений и включение их на параллельную работу потребовало разработки новых методов синтеза устойчивых режимов параллельной работы энергосистем [81, 82, 83, 87, 108, 114, 115, 129, 131]. Профессором А.А. Рагозиным [75] применительно к ЭЭС было введено понятие структурной устойчивости, отличное от принятого в теории регулирования для систем любой физической природы. Разработан и теоретически обоснован структурный подход к обеспечению устойчивых режимов сложных регулируемых ЭЭС.

Интенсивное развитие вычислительной техники способствовало внедрению в практику компьютерных исследований методов D-разбиения [32, 34] и матричных методов, основанных на оценке собственных значений и собственных векторов матриц для последующего выбора настроек регуляторов сильного действия [48, 49, 55, 56, 86, 89, 90, 91, 107, 128]. Структурный подход к исследованию динамических свойств энергосистем, использованный М.Г. Поповым вместе с усовершенствованными численными методами [69], позволил на предварительном этапе анализа без

детального математического моделирования определить область потенциально устойчивых режимов действительной энергосистемы с интенсивным управлением. Распознавание режимов, в которых регулируемая ЭЭС является потенциально устойчивой, т.е. обладает некоторой областью устойчивости в пространстве ненулевых параметров настройки АРВ, позволило значительно сократить объем первоначальных расчетов для определения слабых межсистемных связей и предельных по условиям колебательной устойчивости режимов. Дальнейшее развитие методов анализа динамических свойств электроэнергетической системы было направлено не только на выявление условий устойчивого функционирования, но и на обнаружение признаков вырождения структуры систем уравнений. Синтез устойчивых в колебательном отношении режимов цепочечных ЭЭС основывается на главной динамической структуре, построенной при условии постоянства потокосцеплений обмоток возбуждения генераторов. Расчетное обоснование существующего критерия структурной устойчивости ЭЭС базируется на контроле определителя матрицы коэффициентов чувствительности (якобиана), позволяющем выявлять все случаи нарушения неасимптотической статической устойчивости. Но вместе с тем применение позиционной модели не всегда позволяет качественно определять область потенциально устойчивых режимов энергосистем произвольной структуры. А постоянная верификация математических моделей приводит к повышению порядка дифференциальных уравнений. Все эти факторы значительно усложняют применение существующих количественных методов оценки запасов по устойчивости. Поэтому поиск и экспресс-анализ области устойчивых режимов с использованием упрощенных моделей сложных энергообъединений чрезвычайно актуален.

**Цели и задачи исследования.** Целью данной диссертационной работы является поиск критериев, основанных на демпферных свойствах различных моделей энергосистем. В диссертации выполнена качественная оценка влияния демпферных моментов неконсервативных сил на устойчивость

рассматриваемой энергосистемы вблизи области аperiodической устойчивости.

Быстрый и качественный поиск области потенциально устойчивых (стабилизируемых в колебательном отношении) режимов, полученных с использованием упрощенных моделей энергообъединения сложной структуры, чрезвычайно актуален для научных и практических исследований.

**Научная новизна работы.** 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 значимость работы.** Обобщенные в диссертации результаты поисковых исследований нового критерия колебательного нарушения статической устойчивости являются развитием теории устойчивости энергосистем на основе структурного подхода.

Практическую ценность результатов диссертационной работы представляют разработанная методика экспресс-оценки устойчивости энергосистем в краткосрочной перспективе, а также сформулированные в работе рекомендации по снижению требований к запасам по передаваемой мощности.

Предложенная методика апробирована и внедрена на разработанном «НПП «РТС-Электро» цифровом диагностическом комплексе программно-аппаратного моделирования ЦДК-РТ (Приложение А).

#### **Методология и методы диссертационного 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 полиномиальных функций и численных методов, реализованных в программном обеспечении DoRegim, Matlab,

Mathcad.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

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.

Структурный подход к формированию матрицы частных производных, отвечающий строгой постановке задачи исследования и не искажающий характер изменения якобиана.

Новый критерий колебательного нарушения статической устойчивости, основанный на контроле свободного члена характеристического уравнения ( $\partial A_n / \partial \delta_{отн}$ ).

Новая методика достоверного определения области потенциально устойчивых режимов объединенных энергосистем, базирующаяся на контроле частной производной  $\partial A_n / \partial \delta_{отн}$ .

**Степень достоверности и апробация результатов.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на I Всероссийском конгрессе молодых ученых (Санкт-Петербург, 2012 г.); 4-ой и 5-ой Международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» (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.

В первой главе приведены особенности математического описания и численных методов исследования статической устойчивости электроэнергетической системы. Изложена методика определения границы области потенциально устойчивых режимов и выполнена предварительная оценка эффективности предложенного алгоритма.

Во второй главе выполнены аналитические исследования структурных свойств членов характеристического уравнения относительного движения системы. На примере схем простейшей электропередачи выполнен качественный анализ динамических свойств ЭЭС и выявлены основные закономерности, определяющие характер нарушения устойчивости сложных энергосистем.

В третьей главе осуществляется анализ влияния моментов неконсервативных сил при вариации параметров демпферных контуров для последующего выбора соответствующей упрощенной модели (наиболее характерной из группы нерегулируемых). Окончательный выбор упрощенной модели, отвечающей условиям наибольшей близости к максимуму угловой характеристики и отождествляющей соответствующую границу области устойчивости, производится на основе сопоставления результатов расчета корней при всевозможных сочетаниях демпферных контуров синхронных

машин эквивалентных энергосистем.

В четвертой главе выполняется численное и аналитическое обоснование предлагаемого критерия колебательного нарушения устойчивости. Для чего осуществляется анализ изменения свободного члена  $A_n$ , вычисляемого как произведение собственных чисел матрицы коэффициентов системы линеаризованных дифференциальных уравнений электромеханических переходных процессов при утяжелении режима работы электропередачи вплоть до предельного по условиям сходимости. Показано, что в ряде расчетных случаев предложенный качественный критерий позволяет выявить колебательное нарушение устойчивости, которое невозможно определить с использованием упрощенных позиционных моделей ЭЭС.

Методом сопоставительного анализа рассчитанных границ области устойчивости, показана достаточность применения упрощенных моделей при первичной оценке предельных по передаваемой мощности режимов энергосистем. На основе полученных результатов сформулированы и обоснованы новые обобщенные критерии, базирующиеся на применении упрощенных математических моделей синхронных машин. Выявленные в диссертационной работе качественно новые признаки нарушения устойчивости, позволяют достоверно определять область потенциально устойчивых (стабилизируемых) режимов.

Обобщенные критерии устойчивости объединенных энергосистем могут быть использованы для первичной экспресс-оценки области устойчивых режимов действительной регулируемой энергосистемы. Предложенные критерии и методика исследований актуальны для решения научных и практических задач, поскольку позволяют на предварительном этапе без привлечения детального математического описания качественно и достоверно оценить предельные по условиям колебательной устойчивости режимы.

# **1 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Современный подход к решению задачи обеспечения устойчивости энергосистемы заключается в определении предельных по передаваемой мощности режимов и обеспечении нормированных запасов по устойчивости [6, 21, 22, 23, 31, 52, 53]. Исследование режимов работы энергосистемы и последующая оценка их допустимости в зависимости от постановки задачи выполняется с использованием статических или динамических моделей электроэнергетических систем [7, 20, 24, 25, 26, 29, 36, 37, 104]. Решение задачи исследования статической устойчивости некоторого установившегося режима с учетом общепринятых допущений требует составления линеаризованных дифференциальных уравнений малых колебаний для всех элементов системы и их регуляторов.

Достоверность определения нормативных запасов зависит в первую очередь от адекватности математического описания обобщенной нагрузки и силового электрооборудования, поэтому указанная количественная оценка нормативных запасов является приближенной даже при использовании достаточно сложных моделей высокого порядка [105]. Использование полной системы уравнений для описания поведения синхронных машин при анализе режимов работы энергосистем ведет к повышению вычислительных затрат и увеличению трудоемкости выполняемых расчетов. Тем не менее, как будет показано в главе 3, быстрый поиск области устойчивых режимов может выполняться с привлечением упрощенных моделей, достоверно отражающих электромеханическое движение генераторов. Далее в настоящей главе

изложено математическое описание переходных процессов синхронных машин, систем возбуждения, автоматических регуляторов возбуждения, трансформаторов, линий электропередачи, двигательной нагрузки и основные принципы формирования общей системы линеаризованных дифференциально-алгебраических уравнений их переходных процессов.

### 1.1 Математические модели линий электропередачи, трансформаторов и обобщенной нагрузки

Линии электропередачи представлялись в соответствии с общепринятыми П-образными схемами замещения продольными сопротивлениями и поперечными проводимостями:

$$\Delta I_{n\_cemu}^q = Y_{nn}^{Re} \cdot \Delta U_n^q - Y_{nn}^{Im} \cdot \Delta U_n^d + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \Delta(Y_{nk}^q \cdot U_k^q) - \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \Delta(Y_{nk}^d \cdot U_k^d), \quad (1.1)$$

$$\Delta I_{n\_cemu}^d = Y_{nn}^{Im} \cdot \Delta U_n^q + Y_{nn}^{Re} \cdot \Delta U_n^d + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \Delta(Y_{nk}^d \cdot U_k^q) + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \Delta(Y_{nk}^q \cdot U_k^d), \quad (1.2)$$

где  $\Delta I_{n\_cemu}^q$ ,  $\Delta I_{n\_cemu}^d$ ,  $\Delta U_n^q$ ,  $\Delta U_n^d$ ,  $\Delta U_k^q$ ,  $\Delta U_k^d$  – приращения проекций тока и напряжения,

$Y_{nn}^{Re}$ ,  $Y_{nn}^{Im}$ ,  $Y_{nk}^q$ ,  $Y_{nk}^d$  – собственные и взаимные проводимости узлов  $n$ ,  $k$ .

Трансформаторы и автотрансформаторы моделировались комплексными сопротивлениями без учета ветви намагничивания и идеальным коэффициентом трансформации  $k_m$ .

$$\Delta I_{n\_m}^q = Y_{nn}^{Re} \cdot \Delta U_n^q - Y_{nn}^{Im} \cdot \Delta U_n^d + \Delta(Y_{nk}^q \cdot U_k^q \cdot k_m) - \Delta(Y_{nk}^d \cdot U_k^d \cdot k_m), \quad (1.3)$$

$$\Delta I_{n\_m}^d = Y_{nn}^{Im} \cdot \Delta U_n^q + Y_{nn}^{Re} \cdot \Delta U_n^d + \Delta(Y_{nk}^d \cdot U_k^q \cdot k_m) + \Delta(Y_{nk}^q \cdot U_k^d \cdot k_m). \quad (1.4)$$

При замещении нагрузки шунтами постоянной проводимости с нормированным коэффициентом мощности  $\cos\varphi_{\text{норм}} = 0,92 \dots 0,93$ :

$$\Delta I_{n\_uu}^q = Y_{nn\_uu}^{\text{Re}} \cdot \Delta U_n^q - Y_{nn\_uu}^{\text{Im}} \cdot \Delta U_n^d, \quad (1.5)$$

$$\Delta I_{n\_uu}^d = Y_{nn\_uu}^{\text{Im}} \cdot \Delta U_n^q + Y_{nn\_uu}^{\text{Re}} \cdot \Delta U_n^d. \quad (1.6)$$

Нагрузка, представленная статическими характеристиками

$$P = P_0 \left( a_0 + a_1 \frac{|U|}{|U_0|} + a_2 \frac{|U|^2}{|U_0|^2} \right), \quad (1.7)$$

$$Q = Q_0 \left( b_0 + b_1 \frac{|U|}{|U_0|} + b_2 \frac{|U|^2}{|U_0|^2} \right), \quad (1.8)$$

$$a_0 + a_1 + a_2 = 1, \quad b_0 + b_1 + b_2 = 1, \quad (1.9)$$

где  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$  – типовые коэффициенты, полученные при аппроксимации экспериментальных зависимостей  $P_n = f(U), Q_n = f(U)$  (при номинальной частоте) полиномами второй степени. Линеаризованная запись для системы уравнений в форме баланса токов:

$$\Delta I_{n\_нагр}^q = \left[ P_{0\_n} \cdot \left( \frac{a_0}{|U_n|^2} \cdot \left( 1 - 2 \cdot \left( \frac{U_n^q}{|U_n|} \right)^2 \right) + \frac{a_1}{|U_{0\_n}|} \cdot \frac{1}{|U_n|} \cdot \left( 1 - \left( \frac{U_n^q}{|U_n|} \right)^2 \right) + \frac{a_2}{|U_{0\_n}|^2} \right) + \right. \\ \left. + Q_{0\_n} \cdot \frac{U_n^q \cdot U_n^d}{|U_n|^3} \cdot \left( -\frac{2 \cdot b_0}{|U_n|} - \frac{b_1}{|U_{0\_n}|} \right) \right] \cdot \Delta U_n^q + \quad (1.10)$$

$$+ \left[ P_{0\_n} \cdot \frac{U_n^q \cdot U_n^d}{|U_n|^3} \cdot \left( -\frac{2 \cdot a_0}{|U_n|} - \frac{a_1}{|U_{0\_n}|} \right) + \right. \\ \left. + Q_{0\_n} \cdot \left( \frac{b_0}{|U_n|^2} \cdot \left( 1 - 2 \cdot \left( \frac{U_n^d}{|U_n|} \right)^2 \right) + \frac{b_1}{|U_{0\_n}|} \cdot \frac{1}{|U_n|} \cdot \left( 1 - \left( \frac{U_n^d}{|U_n|} \right)^2 \right) + \frac{b_2}{|U_{0\_n}|^2} \right) \right] \cdot \Delta U_n^d$$

$$\Delta I_{n\_нагр}^d = \left[ P_{0\_n} \cdot \frac{U_n^q \cdot U_n^d}{|U_n|^3} \cdot \left( -\frac{2 \cdot a_0}{|U_n|} - \frac{a_1}{|U_{0\_n}|} \right) + \right. \\ \left. + Q_{0\_n} \cdot \left( \frac{b_0}{|U_n|^2} \cdot \left( 1 - 2 \cdot \left( \frac{U_n^q}{|U_n|} \right)^2 \right) + \frac{b_1}{|U_{0\_n}| \cdot |U_n|} \cdot \left( 1 - \left( \frac{U_n^q}{|U_n|} \right)^2 \right) + \frac{b_2}{|U_{0\_n}|^2} \right) \right] \cdot \Delta U_n^q + \\ + \left[ P_{0\_n} \cdot \left( \frac{a_0}{|U_n|^2} \cdot \left( 1 - 2 \cdot \left( \frac{U_n^d}{|U_n|} \right)^2 \right) + \frac{a_1}{|U_{0\_n}| \cdot |U_n|} \cdot \left( 1 - \left( \frac{U_n^d}{|U_n|} \right)^2 \right) + \frac{a_2}{|U_{0\_n}|^2} \right) + \right. \\ \left. + Q_{0\_n} \cdot \frac{U_n^q \cdot U_n^d}{|U_n|^3} \cdot \left( -\frac{2 \cdot b_0}{|U_n|} - \frac{b_1}{|U_{0\_n}|} \right) \right] \cdot \Delta U_n^d \quad (1.11)$$

Выражения (1.7), (1.8) и (1.10), (1.11) справедливы в диапазоне напряжений от  $U_{ном}$  до  $0,6 \cdot U_{ном}$ .

## 1.2 Математическое описание синхронных машин, их систем возбуждения с автоматическими регуляторами и асинхронных двигателей

Синхронные генераторы описывались уравнениями Горева-Парка, которые, в зависимости от постановки задачи, дополнялись уравнениями переходных процессов в системах возбуждения и их автоматических регуляторах:

$$x_{d\_gn} \cdot \Delta I_{gn}^d + \Delta E_{gn}^q + \Delta E_{r\_gn}^q = \Delta U_n^q, \quad (1.12)$$

$$x_{q\_gn} \cdot \Delta I_{gn}^q - \Delta E_{r\_gn}^d = -\Delta U_n^d, \quad (1.13)$$

$$T_{d0\_gn} \cdot p \Delta \psi_{f\_gn} + \Delta E_{gn}^q = \Delta U_{f\_gn}, \quad (1.14)$$

$$\mu_{d\_gn} \cdot x_{d\_gn} \cdot \Delta I_{gn}^d + \frac{x_{ad\_gn}}{x_{f\_gn}} \cdot \Delta E_{r\_gn}^q + \Delta E_{gn}^q = \Delta \psi_{f\_gn}, \quad (1.15)$$

$$T_{rd\_gn} \cdot p \Delta \psi_{r\_gn}^d = -\Delta E_{r\_gn}^q, \quad (1.16)$$

$$\mu'_{d\_gn} \cdot x_{d\_gn} \cdot \Delta I_{gn}^d + \frac{x_{ad\_gn}}{x_{rd\_gn}} \cdot \Delta E_{gn}^q + \Delta E_{r\_gn}^q = \Delta \psi_{r\_gn}^d, \quad (1.17)$$

$$T_{rq\_gn} \cdot p \Delta \psi_{r\_gn}^q = \Delta E_{r\_gn}^d, \quad (1.18)$$

$$\mu_{q\_gn} \cdot x_{q\_gn} \cdot \Delta I_{gn}^q - \Delta E_{r\_gn}^d = \Delta \psi_{r\_gn}^q, \quad (1.19)$$

$$T_{Jgn} \cdot p \Delta s_{gn} = \Delta P_{Tgn} - \Delta P_{egn}, \quad (1.20)$$

$$\Delta P_{egn} = U_n^q \cdot \Delta I_{gn}^q + \Delta U_n^q \cdot I_{gn}^q + U_n^d \cdot \Delta I_{gn}^d + \Delta U_n^d \cdot I_{gn}^d, \quad (1.21)$$

$$p \Delta \delta_{gn} = \omega_0 \cdot \Delta s_{gn}, \quad (1.22)$$

где  $\Delta I_{gn}^q$ ,  $\Delta I_{gn}^d$ ,  $\Delta U_{gn}^q$ ,  $\Delta U_{gn}^d$  – малые отклонения проекций тока и напряжения генератора на оси  $q$ ,  $d$  от установившихся значений  $I_{gn0}^q$ ,  $I_{gn0}^d$ ,  $U_{gn0}^q$ ,  $U_{gn0}^d$  в  $n$ -ом узле,

$\Delta E_{gn}^q$ ,  $\Delta E_{r\_gn}^q$ ,  $\Delta E_{r\_gn}^d$  – приращения ЭДС, индуцируемых в фазах статора токами обмотки возбуждения и демпферных контуров соответственно,

$\Delta \psi_{f\_gn}$ ,  $\Delta \psi_{r\_gn}^q$ ,  $\Delta \psi_{r\_gn}^d$  – приращения потокосцеплений обмотки возбуждения и демпферных контуров,

$\Delta U_{f\_gn}$  – отклонение напряжения возбуждения генератора от установившегося значения  $U_{f\_gn0}$ ,

$\Delta \delta_{gn}$ ,  $\Delta s_{gn}$  – приращение абсолютного угла и абсолютного скольжения генератора в  $n$ -ом узле,

$x_{d\_gn}$ ,  $x_{d\_gn}$  – синхронные сопротивления генератора,

$$\mu_{d\_gn} = \frac{x_{ad\_gn}^2}{x_{d\_gn} \cdot x_{f\_gn}}, \quad \mu'_{d\_gn} = \frac{x_{ad\_gn}^2}{x_{d\_gn} \cdot x_{rd\_gn}}, \quad \mu_{q\_gn} = \frac{x_{aq\_gn}^2}{x_{q\_gn} \cdot x_{rq\_gn}} \quad -$$

коэффициенты магнитной связи,

$T_{Jgn}$  – постоянная инерции агрегата в  $n$ -ом узле,

$\Delta P_{Tgn}$ ,  $\Delta P_{egn}$  – приращения мощности турбины и электромагнитной мощности генератора,

$p$  – символ дифференцирования по времени  $\frac{d}{dt}$ .

Линеаризованная модель электромашинной системы возбуждения и АРВ пропорционального действия:

$$\Delta U_{f\_gn}(1 + pT_{\epsilon\_gn}) = k_{0u\_gn} \cdot \frac{\Delta U_{gn}}{1 + pT_{\kappa\_gn}} + k_{0c\_gn} \cdot \frac{p\Delta U_{f\_gn}}{1 + pT_{oc\_gn}}, \quad (1.23)$$

$$\Delta U_{gn} = \frac{U_{gn0}^q}{U_{gn0}} \Delta U_{gn}^q + \frac{U_{gn0}^d}{U_{gn0}} \Delta U_{gn}^d, \quad (1.24)$$

где  $\Delta U_{gn}$  – отклонение напряжения на выводах генератора от установившегося значения  $U_{gn0}$ ,

$T_{\epsilon\_gn}$ ,  $T_{\kappa\_gn}$ ,  $T_{oc\_gn}$  – постоянные времени обмотки возбуждения возбудителя, корректора напряжения и гибкой отрицательной обратной связи,

$k_{0u\_gn}$ ,  $k_{0c\_gn}$  – коэффициенты усиления по каналам отклонения напряжения и гибкой отрицательной обратной связи.

Линеаризованная модель тиристорной системы возбуждения и АРВ-СД генератора:

$$\Delta U_{f\_gn}(1 + pT_{\epsilon\_gn})(1 + pT_{\Sigma\_gn}) = -k_{0u\_gn}\Delta U_{gn} - k_{1u\_gn} \cdot \frac{p\Delta U_{gn}}{1 + pT_{1u\_gn}} + \frac{\Delta\omega_{u\_gn}}{1 + pT_{\delta u\_gn}} \left( \frac{k_{0\omega\_gn} \cdot pT_{0\omega\_gn}}{1 + pT_{0\omega\_gn}} + \frac{k_{1\omega\_gn} \cdot p}{1 + pT_{1\omega\_gn}} \right) - \frac{k_{1f\_gn} \cdot p\Delta E_{gn}^q}{1 + pT_{1f\_gn}}, \quad (1.25)$$

$$\Delta\omega_{u\_gn} = \omega_0 \cdot s_{gn} + \frac{U_{gn0}^q}{U_{gn0}} p\Delta U_{gn}^d - \frac{U_{gn0}^d}{U_{gn0}} p\Delta U_{gn}^q, \quad (1.26)$$

где  $T_{\epsilon\_gn}$ ,  $T_{\Sigma\_gn}$ ,  $T_{\delta u\_gn}$ ,  $T_{0\omega\_gn}$ ,  $T_{1u\_gn}$ ,  $T_{1\omega\_gn}$ ,  $T_{1f\_gn}$  – постоянные времени тиристорного возбудителя, суммирующего усилителя, блока частоты напряжения, формирующего сигнал  $\Delta\omega_{u\_gn}$  и дифференцирующих звеньев, формирующих производные режимных параметров,

$k_{0u\_gn}$ ,  $k_{1u\_gn}$ ,  $k_{0\omega\_gn}$ ,  $k_{1\omega\_gn}$ ,  $k_{1f\_gn}$  – коэффициенты усиления по соответствующим каналам регулирования.



Уравнения переходных процессов нагрузки, представленной эквивалентным асинхронным двигателем с обобщенной моментной характеристикой механизма  $M_{мех} = M_{торм\_адв\_n0} + (1 - M_{торм\_адв\_n0}) \cdot (1 + s)^a$ :

$$-x_{адв\_n} \cdot \Delta I_{адв\_n}^d + \Delta E_{адв\_n}^q = \Delta U_n^q, \quad (1.27)$$

$$x_{адв\_n} \cdot \Delta I_{адв\_n}^q + \Delta E_{адв\_n}^d = -\Delta U_n^d, \quad (1.28)$$

$$T_{D\_n} \cdot p \Delta \psi_{r\_адв\_n}^d - \Delta E_{адв\_n}^d + T_{D\_n} \cdot \omega_0 \cdot \psi_{r\_адв0}^q \Delta s_{адв\_n} + T_{D\_n} \cdot \omega_0 \cdot s_{адв\_n0} \Delta \psi_{r\_адв\_n}^q = 0, \quad (1.29)$$

$$T_{D\_n} \cdot p \Delta \psi_{r\_адв\_n}^q + \Delta E_{адв\_n}^q - T_{D\_n} \cdot \omega_0 \cdot \psi_{r\_адв0}^d \Delta s_{адв\_n} - T_{D\_n} \cdot \omega_0 \cdot s_{адв\_n0} \Delta \psi_{r\_адв\_n}^d = 0, \quad (1.30)$$

$$\Delta \psi_{r\_адв\_n}^d = -\mu_{адв\_n} \cdot x_{адв\_n} \cdot \Delta I_{адв\_n}^q - \Delta E_{адв\_n}^d, \quad (1.31)$$

$$\Delta \psi_{r\_адв\_n}^q = -\mu_{адв\_n} \cdot x_{адв\_n} \cdot \Delta I_{адв\_n}^d + \Delta E_{адв\_n}^q, \quad (1.32)$$

$$T_{J\_адв\_n} \cdot p \Delta s_{адв\_n} = \Delta M_{мех} - \Delta M_{адв\_n}, \quad (1.33)$$

$$\Delta M_{мех} = \left( \frac{a}{1+s} \cdot (1 - M_{торм\_адв\_n0}) \cdot (1+s)^a \right) \Delta s, \quad (1.34)$$

$$\Delta M_{адв\_n} = U_n^q \cdot \Delta I_{адв\_n}^q + \Delta U_n^q \cdot I_{адв\_n}^q + U_n^d \cdot \Delta I_{адв\_n}^d + \Delta U_n^d \cdot I_{адв\_n}^d, \quad (1.35)$$

где  $\Delta I_{адв\_n}^q$ ,  $\Delta I_{адв\_n}^d$ ,  $\Delta E_{адв\_n}^q$ ,  $\Delta E_{адв\_n}^d$ ,  $\Delta \psi_{r\_адв\_n}^q$ ,  $\Delta \psi_{r\_адв\_n}^d$  – приращения проекций тока, ЭДС и потокосцепления двигателя,

$x_{адв\_n}$ ,  $\mu_{адв\_n}$  – сопротивление двигателя и коэффициент магнитной связи контуров,

$\Delta s_{адв\_n}$ ,  $s_{адв\_n0}$  – отклонение абсолютного скольжения двигателя и исходное значение скольжения двигателя,

$M_{торм\_адв\_n0}$  – тормозной момент двигателя в исходном режиме,

$$a = \frac{1+s}{M_{мех} - M_{торм\_адв\_n0}} \cdot \frac{\partial M_{мех}}{\partial s} \quad - \quad \text{показатель моментно-скоростной}$$

характеристики приводимого механизма,

$T_{D\_n}$ ,  $T_{J\_адв\_n}$  – постоянная времени роторных цепей и инерционная постоянная двигателя.

### 1.3 Формирование общей и эквивалентной систем алгебраических уравнений переходных процессов электрической сети

В связи с необходимостью решения одной из основных 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  $q+jd$ . Для удобства изложения в настоящем разделе алгебраические уравнения переходных процессов приведены в исходной (без линеаризации) форме. Линеаризованные уравнения эквивалентной системы описаны в следующем разделе.

Уравнения узловых напряжений электрической сети в этом случае:

$$\left[ \begin{aligned} & \left( Y_{nn}^{\text{Re}} \cdot U_n^q - Y_{nn}^{\text{Im}} \cdot U_n^d \right) + \left( \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N Y_{nk}^q \cdot U_k^q - \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N Y_{nk}^d \cdot U_k^d \right) \\ & + j \left[ \left( Y_{nn}^{\text{Im}} \cdot U_n^q + Y_{nn}^{\text{Re}} \cdot U_n^d \right) + \left( \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N Y_{nk}^d \cdot U_k^q + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N Y_{nk}^q \cdot U_k^d \right) \right] \end{aligned} \right] = I_{n\_cemu}^q + jI_{n\_cemu}^d, \quad (1.36)$$

$$\left[ \begin{aligned} & \left[ Y_{nn\_gn}^{11qd} \cdot (E_{gn}^q - U_n^q) + Y_{nn\_gn}^{12qd} \cdot (E_{gn}^d - U_n^d) \right] + \\ & + j \left[ Y_{nn\_gn}^{21qd} \cdot (E_{gn}^q - U_n^q) + Y_{nn\_gn}^{22qd} \cdot (E_{gn}^d - U_n^d) \right] \end{aligned} \right] = I_{n\_ген}^q + jI_{n\_ген}^d.$$

С учетом уравнений преобразования координат:

$$U_n^q = U_n^{\text{Re}} \cdot \cos \delta_{gn} + U_n^{\text{Im}} \cdot \sin \delta_{gn}, \quad U_n^d = U_n^{\text{Im}} \cdot \cos \delta_{gn} - U_n^{\text{Re}} \cdot \sin \delta_{gn}, \quad (1.37)$$

$$U_n^{\text{Re}} = U_n^q \cdot \cos \delta_{gn} - U_n^d \cdot \sin \delta_{gn}, \quad U_n^{\text{Im}} = U_n^d \cdot \cos \delta_{gn} + U_n^q \cdot \sin \delta_{gn}. \quad (1.38)$$

Проводимости в (1.36) определяются выражениями:

$$Y_{nk}^q = Y_{nk}^{\text{Re}} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{\text{Im}} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}), \quad (1.39)$$

$$Y_{nk}^d = Y_{nk}^{\text{Re}} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) + Y_{nk}^{\text{Im}} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}),$$

$$Y_{nn\_gn}^{11qd} = \frac{r_{d\_gn}}{r_{q\_gn} \cdot r_{d\_gn} + x_{q\_gn} \cdot x_{d\_gn}}, \quad Y_{nn\_gn}^{12qd} = \frac{x_{d\_gn}}{r_{q\_gn} \cdot r_{d\_gn} + x_{q\_gn} \cdot x_{d\_gn}}, \quad (1.40)$$

$$Y_{nn\_gn}^{21qd} = \frac{-x_{q\_gn}}{r_{q\_gn} \cdot r_{d\_gn} + x_{q\_gn} \cdot x_{d\_gn}}, \quad Y_{nn\_gn}^{22qd} = \frac{r_{q\_gn}}{r_{q\_gn} \cdot r_{d\_gn} + x_{q\_gn} \cdot x_{d\_gn}}. \quad (1.41)$$

Система (1.36) в матричной форме, дополненная уравнениями баланса токов в узлах:

$$\left( \begin{array}{c|c} Y_{ген}^{d,q} + Y_{сету}^{d,q} & -Y_{ген}^{q,d} \\ \hline -Y_{ген}^{d,q} & Y_{ген}^{q,d} \end{array} \right) \times \begin{pmatrix} U_{сету}^{d,q} \\ E_{ген}^{q,d} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ I_{ген}^{q,d} \end{pmatrix}, \quad (1.42)$$

где  $Y_{ген}^{q,d}$ ,  $Y_{ген}^{d,q}$ ,  $Y_{сету}^{d,q}$  – подматрицы собственных и взаимных узловых проводимостей,

$E_{ген}^{q,d}$ ,  $U_{сету}^{d,q}$ ,  $I_{ген}^{q,d}$  – вектор-столбец проекций ЭДС, напряжений и токов на оси  $q, d$ .

Подматрица собственных и взаимных узловых проводимостей сети:

$$Y_{сету}^{d,q} = \begin{pmatrix} -Y_{11}^{\text{Im}} & Y_{11}^{\text{Re}} & \dots & -Y_{1n}^d & Y_{1n}^q & \dots & -Y_{1k}^d & Y_{1k}^q & \dots & -Y_{1N}^d & Y_{1N}^q \\ Y_{11}^{\text{Re}} & Y_{11}^{\text{Im}} & \dots & Y_{1n}^q & Y_{1n}^d & \dots & Y_{1k}^q & Y_{1k}^d & \dots & Y_{1N}^q & Y_{1N}^d \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Y_{n1}^d & Y_{n1}^q & \dots & -Y_{nn}^{\text{Im}} & Y_{nn}^{\text{Re}} & \dots & -Y_{nk}^d & Y_{nk}^q & \dots & -Y_{nN}^d & Y_{nN}^q \\ Y_{n1}^q & Y_{n1}^d & \dots & Y_{nn}^{\text{Re}} & Y_{nn}^{\text{Im}} & \dots & Y_{nk}^q & Y_{nk}^d & \dots & Y_{nN}^q & Y_{nN}^d \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Y_{k1}^d & Y_{k1}^q & \dots & -Y_{kn}^d & Y_{kn}^q & \dots & -Y_{kk}^{\text{Im}} & Y_{kk}^{\text{Re}} & \dots & -Y_{kN}^d & Y_{kN}^q \\ Y_{k1}^q & Y_{k1}^d & \dots & Y_{kn}^q & Y_{kn}^d & \dots & Y_{kk}^{\text{Re}} & Y_{kk}^{\text{Im}} & \dots & Y_{kN}^q & Y_{kN}^d \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Y_{N1}^d & Y_{N1}^q & \dots & -Y_{Nn}^d & Y_{Nn}^q & \dots & -Y_{Nk}^d & Y_{Nk}^q & \dots & -Y_{NN}^{\text{Im}} & Y_{NN}^{\text{Re}} \\ Y_{N1}^q & Y_{N1}^d & \dots & Y_{Nn}^q & Y_{Nn}^d & \dots & Y_{Nk}^q & Y_{Nk}^d & \dots & Y_{NN}^{\text{Re}} & Y_{NN}^{\text{Im}} \end{pmatrix}. \quad (1.43)$$

Подматрицы собственных узловых проводимостей генераторов:

$$Y_{ген}^{d,q} = \begin{pmatrix} Y_{11\_g1}^{12qd} & Y_{11\_g1}^{11qd} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ Y_{11\_g1}^{22qd} & Y_{11\_g1}^{21qd} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & Y_{nn\_gn}^{12qd} & Y_{nn\_gn}^{11qd} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & Y_{nn\_gn}^{22qd} & Y_{nn\_gn}^{21qd} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & Y_{kk\_gk}^{12qd} & Y_{kk\_gk}^{11qd} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & Y_{kk\_gk}^{22qd} & Y_{kk\_gk}^{21qd} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & Y_{NN\_gN}^{12qd} & Y_{NN\_gN}^{11qd} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & Y_{NN\_gN}^{22qd} & Y_{NN\_gN}^{21qd} \end{pmatrix}, \quad (1.44)$$

$$Y_{ген}^{q,d} = \begin{pmatrix} Y_{11\_g1}^{11qd} & Y_{11\_g1}^{12qd} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ Y_{11\_g1}^{21qd} & Y_{11\_g1}^{22qd} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & Y_{nn\_gn}^{11qd} & Y_{nn\_gn}^{12qd} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & Y_{nn\_gn}^{21qd} & Y_{nn\_gn}^{22qd} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & Y_{kk\_gk}^{11qd} & Y_{kk\_gk}^{12qd} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & Y_{kk\_gk}^{21qd} & Y_{kk\_gk}^{22qd} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & Y_{NN\_gN}^{11qd} & Y_{NN\_gN}^{12qd} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & Y_{NN\_gN}^{21qd} & Y_{NN\_gN}^{22qd} \end{pmatrix}. \quad (1.45)$$

Вектор-столбец ЭДС, напряжений и токов:

$$E_{ген}^{q,d} = \begin{pmatrix} E_{g1}^q \\ E_{g1}^d \\ \dots \\ E_{gn}^q \\ E_{gn}^d \\ \dots \\ E_{gk}^q \\ E_{gk}^d \\ \dots \\ E_{gN}^q \\ E_{gN}^d \end{pmatrix}, \quad U_{сету}^{d,q} = \begin{pmatrix} U_1^d \\ U_1^q \\ \dots \\ U_n^d \\ U_n^q \\ \dots \\ U_k^d \\ U_k^q \\ \dots \\ U_N^d \\ U_N^q \end{pmatrix}, \quad I_{ген}^{q,d} = \begin{pmatrix} I_{1\_ген}^q \\ I_{1\_ген}^d \\ \dots \\ I_{n\_ген}^q \\ I_{n\_ген}^d \\ \dots \\ I_{k\_ген}^q \\ I_{k\_ген}^d \\ \dots \\ I_{N\_ген}^q \\ I_{N\_ген}^d \end{pmatrix}. \quad (1.46)$$

После формирования общей системы алгебраических уравнений вида (1.42) выполнялось понижение порядка (эквивалентирование) системы посредством исключения переменных (узловых напряжений электрической сети) методом Гаусса. Опуская промежуточные преобразования, выражения для проекций тока в  $n$ -ом узле имеют вид:

$$Y_{11}^n \cdot E_{gn}^q + Y_{12}^n \cdot E_{gn}^d + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N Y_{11}^{nk} \cdot E_{gk}^q + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N Y_{12}^{nk} \cdot E_{gk}^d = I_{n\_ген}^q, \quad (1.47)$$

$$Y_{21}^n \cdot E_{gn}^q + Y_{22}^n \cdot E_{gn}^d + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N Y_{21}^{nk} \cdot E_{gk}^q + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N Y_{22}^{nk} \cdot E_{gk}^d = I_{n\_ген}^d, \quad (1.48)$$

где  $Y_{11}^n$ ,  $Y_{12}^n$ ,  $Y_{21}^n$ ,  $Y_{22}^n$ ,  $Y_{11}^{nk}$ ,  $Y_{12}^{nk}$ ,  $Y_{21}^{nk}$ ,  $Y_{22}^{nk}$  – собственные и взаимные эквивалентные проводимости ветвей ЭДС.

Выражения электрической мощности синхронных генераторов в матричной форме записи:

$$\begin{aligned}
 U_{сети}^{d,q} \times (I_{ген}^{q,d})^* &= S_{ген}^{q,d}, \\
 U_{сети}^{d,q} &= (Y_{ген}^{d,q} + Y_{сети}^{d,q})^{-1} \times Y_{ген}^{q,d} \times E_{ген}^{q,d}, \\
 I_{ген}^{q,d} &= \left( Y_{ген}^{d,q} \times (Y_{ген}^{d,q} + Y_{сети}^{d,q})^{-1} \times (-Y_{ген}^{q,d}) + Y_{ген}^{q,d} \right) \times E_{ген}^{q,d},
 \end{aligned} \tag{1.49}$$

где  $(I_{ген}^{q,d})^*$  – вектор-столбец сопряженных токов,

$S_{ген}^{q,d}$  – вектор-столбец мощности, выдаваемой в сеть.

Полученные в результате эквивалентных преобразований алгебраические уравнения (1.47) - (1.49), дополненные линеаризованными дифференциальными уравнениями для относительных угловых скоростей и углов между ЭДС синхронных машин, могут быть использованы только при позиционном представлении эквивалентных генераторов моделью  $\psi_f = \text{const}$ . В общем случае для нерегулируемой ( $U_f = \text{const}$ ) и полной (с АРВ) моделей генераторов, как будет показано в последующих разделах, необходимо составление единой системы линеаризованных дифференциально-алгебраических уравнений и совместное исключение алгебраических переменных.

#### **1.4 Методика определения границы области потенциально устойчивых режимов**

Классическая постановка исследования задачи статической устойчивости требует совместного решения подсистем линеаризованных уравнений баланса электрической и механической мощностей (моментов) с использованием полных математических моделей генераторов и их систем управления возбуждением.

После эквивалентных преобразований пассивных элементов схемы до собственных и взаимных проводимостей узлов эквивалентных генераторов,

электрическая мощность, выдаваемая в сеть из  $n$ -ого узла с учетом выражений (1.36) и (1.39):

$$\left[ Y_{nn}^{\text{Re}} \cdot U_n^q - Y_{nn}^{\text{Im}} \cdot U_n^d + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{\text{Re}} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{\text{Im}} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^q + \right. \\ \left. + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( -Y_{nk}^{\text{Re}} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{\text{Im}} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^d \right] \cdot U_n^q +$$

(1.50)

$$\left[ Y_{nn}^{\text{Im}} \cdot U_n^q + Y_{nn}^{\text{Re}} \cdot U_n^d + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{\text{Re}} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) + Y_{nk}^{\text{Im}} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^q + \right. \\ \left. + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{\text{Re}} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{\text{Im}} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^d \right] \cdot U_n^d = P_{n\_cemu} ,$$

$$\left[ Y_{nn}^{\text{Im}} \cdot U_n^q + Y_{nn}^{\text{Re}} \cdot U_n^d + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{\text{Re}} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) + Y_{nk}^{\text{Im}} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^q + \right. \\ \left. + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{\text{Re}} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{\text{Im}} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^d \right] \cdot U_n^q +$$

(1.51)

$$\left[ Y_{nn}^{\text{Re}} \cdot U_n^q - Y_{nn}^{\text{Im}} \cdot U_n^d + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{\text{Re}} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{\text{Im}} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^q + \right. \\ \left. + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( -Y_{nk}^{\text{Re}} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{\text{Im}} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^d \right] \cdot U_n^d = Q_{n\_cemu} ,$$

$$\left[ Y_{nn\_gn}^{11qd} \cdot (E_n^q - U_n^q) + Y_{nn\_gn}^{12qd} \cdot (E_n^d - U_n^d) \right] \cdot U_n^q + \\ + \left[ Y_{nn\_gn}^{21qd} \cdot (E_n^q - U_n^q) + Y_{nn\_gn}^{22qd} \cdot (E_n^d - U_n^d) \right] \cdot U_n^d = P_{n\_ген} ,$$

(1.52)

$$\left[ Y_{nn\_gn}^{11qd} \cdot (E_n^q - U_n^q) + Y_{nn\_gn}^{12qd} \cdot (E_n^d - U_n^d) \right] \cdot U_n^d + \\ + \left[ -Y_{nn\_gn}^{21qd} \cdot (E_n^q - U_n^q) - Y_{nn\_gn}^{22qd} \cdot (E_n^d - U_n^d) \right] \cdot U_n^q = Q_{n\_ген} .$$

(1.53)

Учет электрической несимметрии синхронной машины в исследуемом режиме осуществляется соответствующим заданием ее сопротивлений по осям  $q$ ,  $d$ . В частности, для переходного режима синхронной машины с

продольной обмоткой возбуждения в выражениях (1.40) и (1.41) используются параметры  $x_q$  и  $x'_d$ .

Структура системы линеаризованных дифференциально-алгебраических уравнений малых колебаний в матричной форме при позиционном ( $\psi_f = \text{const}$ ) представлении  $N$ -генераторов:

$$\left( \begin{array}{cc|cc} C_p & -E_{N-1} & 0 & 0 \\ 0 & C_p & C_{TJ} & 0 \\ \hline 0 & 0 & E_{2N} & -\frac{\partial PQ_{ген}}{\partial U_{сети}^{q,d}} \\ \frac{\partial PQ_{сети}}{\partial \delta_{ген\ отн}} & 0 & 0 & \frac{\partial PQ_{ген}}{\partial U_{сети}^{q,d}} - \frac{\partial PQ_{сети}}{\partial U_{сети}^{q,d}} \end{array} \right) \times \begin{pmatrix} d\delta_{ген\ отн} \\ d\omega_{ген\ отн} \\ dPQ_{ген} \\ dU_{сети}^{q,d} \end{pmatrix} = 0, \quad (1.54)$$

где  $C_p$  – диагональная подматрица размерностью  $(N-1) \times (N-1)$  состоящая из символов дифференцирования по времени  $p$ ,

$E_{N-1}$ ,  $E_{2N}$  – единичные подматрицы размерностью  $(N-1) \times (N-1)$  и  $2N \times 2N$ ,

$$\frac{\partial PQ_{сети}}{\partial \delta_{ген\ отн}}, \quad \frac{\partial PQ_{сети}}{\partial U_{сети}^{q,d}}, \quad \frac{\partial PQ_{ген}}{\partial U_{сети}^{q,d}} \quad - \quad \text{подматрицы частных производных,}$$

полученные дифференцированием выражений (1.50), (1.51), (1.52) и (1.53).

Матричная форма записи эквивалентного преобразования системы (1.54):

$$\begin{pmatrix} C_p & -E_{N-1} \\ C_{21} & C_p \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} d\delta_{ген\ отн} \\ d\omega_{ген\ отн} \end{pmatrix} = 0, \quad (1.55)$$

где

$$C_{21} = C_{TJ} \times \frac{\partial PQ_{ген}}{\partial U_{сети}^{q,d}} \times \left( \frac{\partial PQ_{ген}}{\partial U_{сети}^{q,d}} - \frac{\partial PQ_{сети}}{\partial U_{сети}^{q,d}} \right)^{-1} \times \frac{\partial PQ_{сети}}{\partial \delta_{ген\ отн}}. \quad (1.56)$$

При представлении  $N$ -генераторов нерегулируемой моделью  $U_f = \text{const}$  без демпферных контуров система линеаризованных дифференциально-алгебраических уравнений малых колебаний аналогична (1.54):

$$\left( \begin{array}{ccc|cc} C_p & -E_{N-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_p & 0 & C_{TJ} & 0 \\ 0 & 0 & C_{pTd0} & 0 & C_{Td0}(\partial E_q / \partial U_{сети}^{q,d}) \\ \hline 0 & 0 & -\frac{\partial PQ_{ген}}{\partial E'_q} & E_{2N} & -\frac{\partial PQ_{ген}}{\partial U_{сети}^{q,d}} \\ -\frac{\partial PQ_{сети}}{\partial \delta_{ген\ отн}} & 0 & \frac{\partial PQ_{ген}}{\partial E'_q} & 0 & \frac{\partial PQ_{ген}}{\partial U_{сети}^{q,d}} - \frac{\partial PQ_{сети}}{\partial U_{сети}^{q,d}} \end{array} \right) \times \begin{pmatrix} d\delta_{ген\ отн} \\ d\omega_{ген\ отн} \\ dE'_q \\ dPQ_{ген} \\ dU_{сети}^{q,d} \end{pmatrix} = 0. \quad (1.57)$$

После исключения алгебраических переменных система линеаризованных дифференциальных уравнений малых колебаний:

$$\begin{pmatrix} C_p & -E_{N-1} & 0 \\ C_{21} & C_p & C_{23} \\ C_{31} & 0 & C_{pTd0} + C_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} d\delta_{ген\ отн} \\ d\omega_{ген\ отн} \\ dE'_q \end{pmatrix} = 0, \quad (1.58)$$

где  $C_{21}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{31}$ ,  $C_{33}$  – подматрицы, полученные в ходе исключения алгебраических переменных (мощности и напряжения) в выражении (1.57):

$$C_{21} = C_{TJ} \times \frac{\partial PQ_{ген}}{\partial U_{сети}^{q,d}} \times \left( \frac{\partial PQ_{ген}}{\partial U_{сети}^{q,d}} - \frac{\partial PQ_{сети}}{\partial U_{сети}^{q,d}} \right)^{-1} \times \frac{\partial PQ_{сети}}{\partial \delta_{ген\ отн}}, \quad (1.59)$$

$$C_{23} = -C_{TJ} \times \left[ -\frac{\partial PQ_{ген}}{\partial E'_q} + \frac{\partial PQ_{ген}}{\partial U_{сети}^{q,d}} \times \left( \frac{\partial PQ_{ген}}{\partial U_{сети}^{q,d}} - \frac{\partial PQ_{сети}}{\partial U_{сети}^{q,d}} \right)^{-1} \times \frac{\partial PQ_{ген}}{\partial E'_q} \right], \quad (1.60)$$

$$C_{31} = C_{Td0}(\partial E_q / \partial U_{сети}^{q,d}) \times \left( \frac{\partial PQ_{ген}}{\partial U_{сети}^{q,d}} - \frac{\partial PQ_{сети}}{\partial U_{сети}^{q,d}} \right)^{-1} \times \frac{\partial PQ_{сети}}{\partial \delta_{ген\ отн}}, \quad (1.61)$$

$$C_{33} = -C_{Td0}(\partial E_q / \partial U_{сети}^{q,d}) \times \left( \frac{\partial PQ_{ген}}{\partial U_{сети}^{q,d}} - \frac{\partial PQ_{сети}}{\partial U_{сети}^{q,d}} \right)^{-1} \times \frac{\partial PQ_{ген}}{\partial E'_q}. \quad (1.62)$$

Эквивалентные преобразования (1.55), (1.56) и (1.58), (1.59) - (1.62) производились с помощью прикладного программного обеспечения DoRegim и Mathcad. Вычисление собственных чисел матрицы коэффициентов (1.55), (1.58) эквивалентной системы линеаризованных дифференциальных уравнений (Matlab) производилось при различном сочетании расчетных условий с целью последующего обобщения структурных признаков нарушения статической устойчивости (Приложение Б).



**1.4.1 Формирование матриц коэффициентов  
уравнений чувствительности  
позиционной модели электроэнергетической системы**

Далее представлены развернутая структура и выражения для вычисления коэффициентов подматриц  $C_{TJ}$ ,  $\partial PQ_{сети} / \partial \delta_{ген\ отн}$ ,  $\partial PQ_{сети} / \partial U_{сети}^{q,d}$ ,  $\partial PQ_{ген} / \partial U_{сети}^{q,d}$ , системы линеаризованных дифференциально-алгебраических уравнений (1.54).

Прямоугольная подматрица  $C_{TJ}$ :

$$C_{TJ} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_{Jg\_баз}} & 0 & \frac{1}{T_{Jgm}} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{1}{T_{Jg\_баз}} & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{T_{Jgn}} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{1}{T_{Jg\_баз}} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{T_{Jgk}} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{1}{T_{Jg\_баз}} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{T_{JgN}} & 0 \end{pmatrix}. \quad (1.63)$$

Малые приращения напряжения и мощности, относительных угловых скоростей и углов ЭДС синхронных машин относительно базисного узла:

$$dU_{сети}^{q,d} = \begin{pmatrix} dU_1^q \\ dU_1^d \\ \dots \\ dU_n^q \\ dU_n^d \\ \dots \\ dU_k^q \\ dU_k^d \\ \dots \\ dU_N^q \\ dU_N^d \end{pmatrix}, \quad dPQ_{ген} = \begin{pmatrix} dP_{1\_ген} \\ dQ_{1\_ген} \\ \dots \\ dP_{n\_ген} \\ dQ_{n\_ген} \\ \dots \\ dP_{k\_ген} \\ dQ_{k\_ген} \\ \dots \\ dP_{N\_ген} \\ dQ_{N\_ген} \end{pmatrix}, \quad (1.64)$$

$$d\omega_{ген\ отн} = \begin{pmatrix} d(\omega_{gn} - \omega_{g\_баз}) \\ \dots \\ d(\omega_{gk} - \omega_{g\_баз}) \\ \dots \\ d(\omega_{gN} - \omega_{g\_баз}) \end{pmatrix}, \quad d\delta_{ген\ отн} = \begin{pmatrix} d(\delta_{gn} - \delta_{g\_баз}) \\ \dots \\ d(\delta_{gk} - \delta_{g\_баз}) \\ \dots \\ d(\delta_{gN} - \delta_{g\_баз}) \end{pmatrix}.$$

Частные производные активной и реактивной мощности сети по абсолютному углу генератора:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{n\_cemu}}{\partial \delta_{gn}} = & \left[ \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N (Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn})) \cdot U_k^q + \right. \\ & \left. + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N (Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn})) \cdot U_k^d \right] \cdot U_n^q + \\ & + \left[ \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N (-Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn})) \cdot U_k^q + \right. \\ & \left. + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N (Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn})) \cdot U_k^d \right] \cdot U_n^d, \end{aligned} \quad (1.65)$$

при  $1 \leq n \leq N$ ;

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{n\_cemu}}{\partial \delta_{gn}} = & \left[ \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N (-Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn})) \cdot U_k^q + \right. \\ & \left. + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N (Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn})) \cdot U_k^d \right] \cdot U_n^q + \\ & + \left[ \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N (Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn})) \cdot U_k^q + \right. \\ & \left. + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N (Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn})) \cdot U_k^d \right] \cdot U_n^d, \end{aligned} \quad (1.66)$$

при  $1 \leq n \leq N$ ;

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{n\_cemu}}{\partial \delta_{gk}} = & \left[ (-Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn})) \cdot U_k^q + \right. \\ & \left. + (-Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn})) \cdot U_k^d \right] \cdot U_n^q + \\ & + \left[ (Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn})) \cdot U_k^q + \right. \\ & \left. + (-Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn})) \cdot U_k^d \right] \cdot U_n^d, \end{aligned} \quad (1.67)$$

при  $1 \leq n \leq N$ ;

$$\frac{\partial Q_{n\_cemu}}{\partial \delta_{gk}} = - \left[ \begin{aligned} & \left( Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^q + \\ & + \left( -Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^d \end{aligned} \right] \cdot U_n^q +$$

$$+ \left[ \begin{aligned} & \left( -Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^q + \\ & + \left( -Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^d \end{aligned} \right] \cdot U_n^d ,$$

при  $1 \leq n \leq N$ ;

Частные производные активной и реактивной мощности сети по относительному углу генератора:

$$\frac{\partial P_{n\_cemu}}{\partial (\delta_{gn} - \delta_{g\_oa2})} = \left[ \begin{aligned} & \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( -Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gn} - \delta_{gk}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gn} - \delta_{gk}) \right) \cdot U_k^q + \\ & + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gn} - \delta_{gk}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gn} - \delta_{gk}) \right) \cdot U_k^d \end{aligned} \right] \cdot U_n^q +$$

$$+ \left[ \begin{aligned} & \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( -Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gn} - \delta_{gk}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gn} - \delta_{gk}) \right) \cdot U_k^q + \\ & + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( -Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gn} - \delta_{gk}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gn} - \delta_{gk}) \right) \cdot U_k^d \end{aligned} \right] \cdot U_n^d ,$$

при  $1 \leq n \leq N$ ;

$$\frac{\partial Q_{n\_cemu}}{\partial (\delta_{gn} - \delta_{g\_oa2})} = - \left[ \begin{aligned} & \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( -Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gn} - \delta_{gk}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gn} - \delta_{gk}) \right) \cdot U_k^q + \\ & + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( -Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gn} - \delta_{gk}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gn} - \delta_{gk}) \right) \cdot U_k^d \end{aligned} \right] \cdot U_n^q +$$

$$+ \left[ \begin{aligned} & \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( -Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gn} - \delta_{gk}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gn} - \delta_{gk}) \right) \cdot U_k^q + \\ & + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gn} - \delta_{gk}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gn} - \delta_{gk}) \right) \cdot U_k^d \end{aligned} \right] \cdot U_n^d ,$$

при  $1 \leq n \leq N$ ;

$$\frac{\partial P_{\bar{\delta}_{a3\_cemu}}}{\partial(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3})} = \left[ \begin{array}{l} (-Y_{\bar{\delta}_{a3\_k}}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3}) - Y_{\bar{\delta}_{a3\_k}}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3})) \cdot U_k^q + \\ + (-Y_{\bar{\delta}_{a3\_k}}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3}) + Y_{\bar{\delta}_{a3\_k}}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3})) \cdot U_k^d \end{array} \right] \cdot U_{\bar{\delta}_{a3}}^q +$$

$$+ \left[ \begin{array}{l} (Y_{\bar{\delta}_{a3\_k}}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3}) - Y_{\bar{\delta}_{a3\_k}}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3})) \cdot U_k^q + \\ + (-Y_{\bar{\delta}_{a3\_k}}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3}) - Y_{\bar{\delta}_{a3\_k}}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3})) \cdot U_k^d \end{array} \right] \cdot U_{\bar{\delta}_{a3}}^d, \quad (1.71)$$

при  $1 \leq n \leq N$ ;

$$\frac{\partial Q_{\bar{\delta}_{a3\_cemu}}}{\partial(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3})} = - \left[ \begin{array}{l} (Y_{\bar{\delta}_{a3\_k}}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3}) - Y_{\bar{\delta}_{a3\_k}}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3})) \cdot U_k^q + \\ + (-Y_{\bar{\delta}_{a3\_k}}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3}) - Y_{\bar{\delta}_{a3\_k}}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3})) \cdot U_k^d \end{array} \right] \cdot U_{\bar{\delta}_{a3}}^q +$$

$$+ \left[ \begin{array}{l} (-Y_{\bar{\delta}_{a3\_k}}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3}) - Y_{\bar{\delta}_{a3\_k}}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3})) \cdot U_k^q + \\ + (-Y_{\bar{\delta}_{a3\_k}}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3}) + Y_{\bar{\delta}_{a3\_k}}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3})) \cdot U_k^d \end{array} \right] \cdot U_{\bar{\delta}_{a3}}^d, \quad (1.72)$$

при  $1 \leq n \leq N$ .

Учитывая равенство выражений (1.65) и (1.69); (1.66) и (1.70); (1.67) и (1.71); (1.68) и (1.72) подматрица частных производных активной и реактивной мощности сети по относительным углам генераторов:

$$\frac{\partial P_{Q_{cemu}}}{\partial \delta_{ген\ отн}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{\bar{\delta}_{a3\_cemu}}}{\partial(\delta_{gn} - \delta_{g\_ba3})} & \dots & \frac{\partial P_{\bar{\delta}_{a3\_cemu}}}{\partial(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3})} & \dots & \frac{\partial P_{\bar{\delta}_{a3\_cemu}}}{\partial(\delta_{gN} - \delta_{g\_ba3})} \\ \frac{\partial Q_{\bar{\delta}_{a3\_cemu}}}{\partial(\delta_{gn} - \delta_{g\_ba3})} & \dots & \frac{\partial Q_{\bar{\delta}_{a3\_cemu}}}{\partial(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3})} & \dots & \frac{\partial Q_{\bar{\delta}_{a3\_cemu}}}{\partial(\delta_{gN} - \delta_{g\_ba3})} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_{n\_cemu}}{\partial(\delta_{gn} - \delta_{g\_ba3})} & \dots & \frac{\partial P_{n\_cemu}}{\partial(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3})} & \dots & \frac{\partial P_{n\_cemu}}{\partial(\delta_{gN} - \delta_{g\_ba3})} \\ \frac{\partial Q_{n\_cemu}}{\partial(\delta_{gn} - \delta_{g\_ba3})} & \dots & \frac{\partial Q_{n\_cemu}}{\partial(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3})} & \dots & \frac{\partial Q_{n\_cemu}}{\partial(\delta_{gN} - \delta_{g\_ba3})} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_{k\_cemu}}{\partial(\delta_{gn} - \delta_{g\_ba3})} & \dots & \frac{\partial P_{k\_cemu}}{\partial(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3})} & \dots & \frac{\partial P_{k\_cemu}}{\partial(\delta_{gN} - \delta_{g\_ba3})} \\ \frac{\partial Q_{k\_cemu}}{\partial(\delta_{gn} - \delta_{g\_ba3})} & \dots & \frac{\partial Q_{k\_cemu}}{\partial(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3})} & \dots & \frac{\partial Q_{k\_cemu}}{\partial(\delta_{gN} - \delta_{g\_ba3})} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_{N\_cemu}}{\partial(\delta_{gn} - \delta_{g\_ba3})} & \dots & \frac{\partial P_{N\_cemu}}{\partial(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3})} & \dots & \frac{\partial P_{N\_cemu}}{\partial(\delta_{gN} - \delta_{g\_ba3})} \\ \frac{\partial Q_{N\_cemu}}{\partial(\delta_{gn} - \delta_{g\_ba3})} & \dots & \frac{\partial Q_{N\_cemu}}{\partial(\delta_{gk} - \delta_{g\_ba3})} & \dots & \frac{\partial Q_{N\_cemu}}{\partial(\delta_{gN} - \delta_{g\_ba3})} \end{pmatrix}. \quad (1.73)$$

Подматрица частных производных активной и реактивной мощности сети по напряжению:

$$\frac{\partial PQ_{cemu}}{\partial U^{q,d}_{cemu}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{n\_cemu}}{\partial U_n^q} & \frac{\partial P_{n\_cemu}}{\partial U_n^d} & \dots & \frac{\partial P_{n\_cemu}}{\partial U_k^q} & \frac{\partial P_{n\_cemu}}{\partial U_k^d} & \dots & \frac{\partial P_{n\_cemu}}{\partial U_N^q} & \frac{\partial P_{n\_cemu}}{\partial U_N^d} \\ \frac{\partial Q_{n\_cemu}}{\partial U_n^q} & \frac{\partial Q_{n\_cemu}}{\partial U_n^d} & \dots & \frac{\partial Q_{n\_cemu}}{\partial U_k^q} & \frac{\partial Q_{n\_cemu}}{\partial U_k^d} & \dots & \frac{\partial Q_{n\_cemu}}{\partial U_N^q} & \frac{\partial Q_{n\_cemu}}{\partial U_N^d} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_{k\_cemu}}{\partial U_n^q} & \frac{\partial P_{k\_cemu}}{\partial U_n^d} & \dots & \frac{\partial P_{k\_cemu}}{\partial U_k^q} & \frac{\partial P_{k\_cemu}}{\partial U_k^d} & \dots & \frac{\partial P_{k\_cemu}}{\partial U_N^q} & \frac{\partial P_{k\_cemu}}{\partial U_N^d} \\ \frac{\partial Q_{k\_cemu}}{\partial U_n^q} & \frac{\partial Q_{k\_cemu}}{\partial U_n^d} & \dots & \frac{\partial Q_{k\_cemu}}{\partial U_k^q} & \frac{\partial Q_{k\_cemu}}{\partial U_k^d} & \dots & \frac{\partial Q_{k\_cemu}}{\partial U_N^q} & \frac{\partial Q_{k\_cemu}}{\partial U_N^d} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_{N\_cemu}}{\partial U_n^q} & \frac{\partial P_{N\_cemu}}{\partial U_n^d} & \dots & \frac{\partial P_{N\_cemu}}{\partial U_k^q} & \frac{\partial P_{N\_cemu}}{\partial U_k^d} & \dots & \frac{\partial P_{N\_cemu}}{\partial U_N^q} & \frac{\partial P_{N\_cemu}}{\partial U_N^d} \\ \frac{\partial Q_{N\_cemu}}{\partial U_n^q} & \frac{\partial Q_{N\_cemu}}{\partial U_n^d} & \dots & \frac{\partial Q_{N\_cemu}}{\partial U_k^q} & \frac{\partial Q_{N\_cemu}}{\partial U_k^d} & \dots & \frac{\partial Q_{N\_cemu}}{\partial U_N^q} & \frac{\partial Q_{N\_cemu}}{\partial U_N^d} \end{pmatrix}, \quad (1.74)$$

где

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{n\_cemu}}{\partial U_n^q} &= 2 \cdot Y_{nn}^{Re} \cdot U_n^q + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^q + \\ &+ \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( -Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^d, \end{aligned} \quad (1.75)$$

при  $1 \leq n \leq N$ ;

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{n\_cemu}}{\partial U_n^d} &= 2 \cdot Y_{nn}^{Re} \cdot U_n^d + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^q + \\ &+ \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^d, \end{aligned} \quad (1.76)$$

при  $1 \leq n \leq N$ ;

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{n\_cemu}}{\partial U_n^q} &= -2 \cdot Y_{nn}^{Im} \cdot U_n^q - \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^q + \\ &+ \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( -Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^d, \end{aligned} \quad (1.77)$$

при  $1 \leq n \leq N$ ;

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{n\_cemu}}{\partial U_n^d} &= -2 \cdot Y_{nn}^{Im} \cdot U_n^d + \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^q + \\ &+ \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( -Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_k^d, \end{aligned} \quad (1.78)$$

при  $1 \leq n \leq N$ ;

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{n\_cemu}}{\partial U_k^q} &= \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_n^q + \\ &+ \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_n^d, \end{aligned} \quad (1.79)$$

при  $1 \leq k \leq N, k \neq n$ ;

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{n\_cemu}}{\partial U_k^d} &= \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( -Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_n^q + \\ &+ \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_n^d, \end{aligned} \quad (1.80)$$

при  $1 \leq k \leq N, k \neq n$ ;

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{n\_cemu}}{\partial U_k^q} &= -\sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) + Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_n^q + \\ &+ \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_n^d, \end{aligned} \quad (1.81)$$

при  $1 \leq k \leq N, k \neq n$ ;

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{n\_cemu}}{\partial U_k^d} &= -\sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( Y_{nk}^{Re} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_n^q + \\ &+ \sum_{\substack{k=1 \\ n \neq k}}^N \left( -Y_{nk}^{Re} \cdot \sin(\delta_{gk} - \delta_{gn}) - Y_{nk}^{Im} \cdot \cos(\delta_{gk} - \delta_{gn}) \right) \cdot U_n^d, \end{aligned} \quad (1.82)$$

при  $1 \leq k \leq N, k \neq n$ .

Подматрица коэффициентов чувствительности активной и реактивной мощности генератора по напряжению:

$$\frac{\partial PQ_{ген}}{\partial U^{q,d}_{сети}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{1-ген}}{\partial U_1^q} & \frac{\partial P_{1-ген}}{\partial U_1^d} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \frac{\partial Q_{1-ген}}{\partial U_1^q} & \frac{\partial Q_{1-ген}}{\partial U_1^d} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\partial P_{n-ген}}{\partial U_n^q} & \frac{\partial P_{n-ген}}{\partial U_n^d} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\partial Q_{n-ген}}{\partial U_n^q} & \frac{\partial Q_{n-ген}}{\partial U_n^d} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial P_{k-ген}}{\partial U_k^q} & \frac{\partial P_{k-ген}}{\partial U_k^d} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial Q_{k-ген}}{\partial U_k^q} & \frac{\partial Q_{k-ген}}{\partial U_k^d} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial P_{N-ген}}{\partial U_N^q} & \frac{\partial P_{N-ген}}{\partial U_N^d} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial Q_{N-ген}}{\partial U_N^q} & \frac{\partial Q_{N-ген}}{\partial U_N^d} \end{pmatrix}, \quad (1.83)$$

где

$$\frac{\partial P_{n-ген}}{\partial U_n^q} = Y_{nn-гн}^{11qd} \cdot (E_n^q - U_n^q) + Y_{nn-гн}^{12qd} \cdot (E_n^d - U_n^d) - Y_{nn-гн}^{11qd} \cdot U_n^q - Y_{nn-гн}^{21qd} \cdot U_n^d, \quad (1.84)$$

$$\frac{\partial P_{n-ген}}{\partial U_n^d} = Y_{nn-гн}^{21qd} \cdot (E_n^q - U_n^q) + Y_{nn-гн}^{22qd} \cdot (E_n^d - U_n^d) - Y_{nn-гн}^{12qd} \cdot U_n^q - Y_{nn-гн}^{22qd} \cdot U_n^d, \quad (1.85)$$

$$\frac{\partial Q_{n-ген}}{\partial U_n^q} = -Y_{nn-гн}^{21qd} \cdot (E_n^q - U_n^q) - Y_{nn-гн}^{22qd} \cdot (E_n^d - U_n^d) - Y_{nn-гн}^{11qd} \cdot U_n^d + Y_{nn-гн}^{21qd} \cdot U_n^q, \quad (1.86)$$

$$\frac{\partial Q_{n-ген}}{\partial U_n^d} = Y_{nn-гн}^{11qd} \cdot (E_n^q - U_n^q) + Y_{nn-гн}^{12qd} \cdot (E_n^d - U_n^d) - Y_{nn-гн}^{12qd} \cdot U_n^d + Y_{nn-гн}^{22qd} \cdot U_n^q. \quad (1.87)$$

Аналогичным образом (1.73) - (1.83) осуществляется вычисление подматриц коэффициентов чувствительности  $\frac{\partial PQ_{сети}}{\partial \delta_{ген\ отн}}$ ,  $\frac{\partial PQ_{сети}}{\partial U_{сети}^{q,d}}$ ,  $\frac{\partial PQ_{ген}}{\partial U_{сети}^{q,d}}$  для нерегулируемой модели ( $U_f = \text{const}$ ), построенной при постоянстве напряжения возбуждения.

**1.4.2 Формирование матриц коэффициентов  
уравнений чувствительности  
нерегулируемой модели электроэнергетической системы**

Ниже представлены выражения для формирования матрицы коэффициентов системы линеаризованных дифференциально-алгебраических уравнений вида (1.57).

Подматрица  $C_{pTd0}$ :

$$C_{pTd0} = \begin{pmatrix} p + \frac{1}{T_{d0\_g1}} \cdot \frac{x_{d\_g1}}{x'_{d\_g1}} & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & p + \frac{1}{T_{d0\_gn}} \cdot \frac{x_{d\_gn}}{x'_{d\_gn}} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & p + \frac{1}{T_{d0\_gk}} \cdot \frac{x_{d\_gk}}{x'_{d\_gk}} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & p + \frac{1}{T_{d0\_gN}} \cdot \frac{x_{d\_gN}}{x'_{d\_gN}} \end{pmatrix}. \quad (1.88)$$

Подматрица частных производных активной и реактивной мощности генераторов по ЭДС:

$$\frac{\partial PQ_{ген}}{\partial E'_{q}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{1\_ген}}{\partial E'_{q1}} & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \frac{\partial Q_{1\_ген}}{\partial E'_{q1}} & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \frac{\partial P_{n\_ген}}{\partial E'_{qn}} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \frac{\partial Q_{n\_ген}}{\partial E'_{qn}} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \frac{\partial P_{k\_ген}}{\partial E'_{qk}} & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \frac{\partial Q_{k\_ген}}{\partial E'_{qk}} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & \frac{\partial P_{N\_ген}}{\partial E'_{qN}} \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & \frac{\partial Q_{N\_ген}}{\partial E'_{qN}} \end{pmatrix}, \quad (1.89)$$



где

$$\frac{\partial P_{n\_ген}}{\partial E'_{gn}{}^q} = Y_{nn\_gn}^{11qd} \cdot U_n^q + Y_{nn\_gn}^{21qd} \cdot U_n^d, \quad (1.90)$$

$$\frac{\partial Q_{n\_ген}}{\partial E'_{gn}{}^q} = Y_{nn\_gn}^{11qd} \cdot U_n^d - Y_{nn\_gn}^{21qd} \cdot U_n^q. \quad (1.91)$$

Подматрица коэффициентов уравнений чувствительности ЭДС синхронных генераторов:

$$C \frac{\partial E_q}{T_{d0} \partial U_{сети}^{q,d}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{T_{d0\_g1}} \cdot \frac{\partial E_{g1}^q}{\partial U_1^q} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{T_{d0\_gn}} \cdot \frac{\partial E_{gn}^q}{\partial U_n^q} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{T_{d0\_gk}} \cdot \frac{\partial E_{gk}^q}{\partial U_k^q} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{T_{d0\_gN}} \cdot \frac{\partial E_{gN}^q}{\partial U_N^q} & 0 \end{pmatrix}, \quad (1.92)$$

где

$$\frac{\partial E_{gn}^q}{\partial U_n^q} = 1 - \frac{x_{d\_gn}}{x'_{d\_gn}}. \quad (1.93)$$

Далее изложены основные аспекты разработки алгоритма определения области потенциально устойчивых режимов.

### 1.5 Разработка алгоритма определения границы области потенциально устойчивых режимов и оценка его эффективности

Предложенная методика достоверного определения области потенциально устойчивых режимов базируется на контроле частной производной  $\partial A_n / \partial \delta_{отн}$  и состоит из следующей последовательности операций:

– формирование системы алгебраических уравнений узловых напряжений электрической сети;

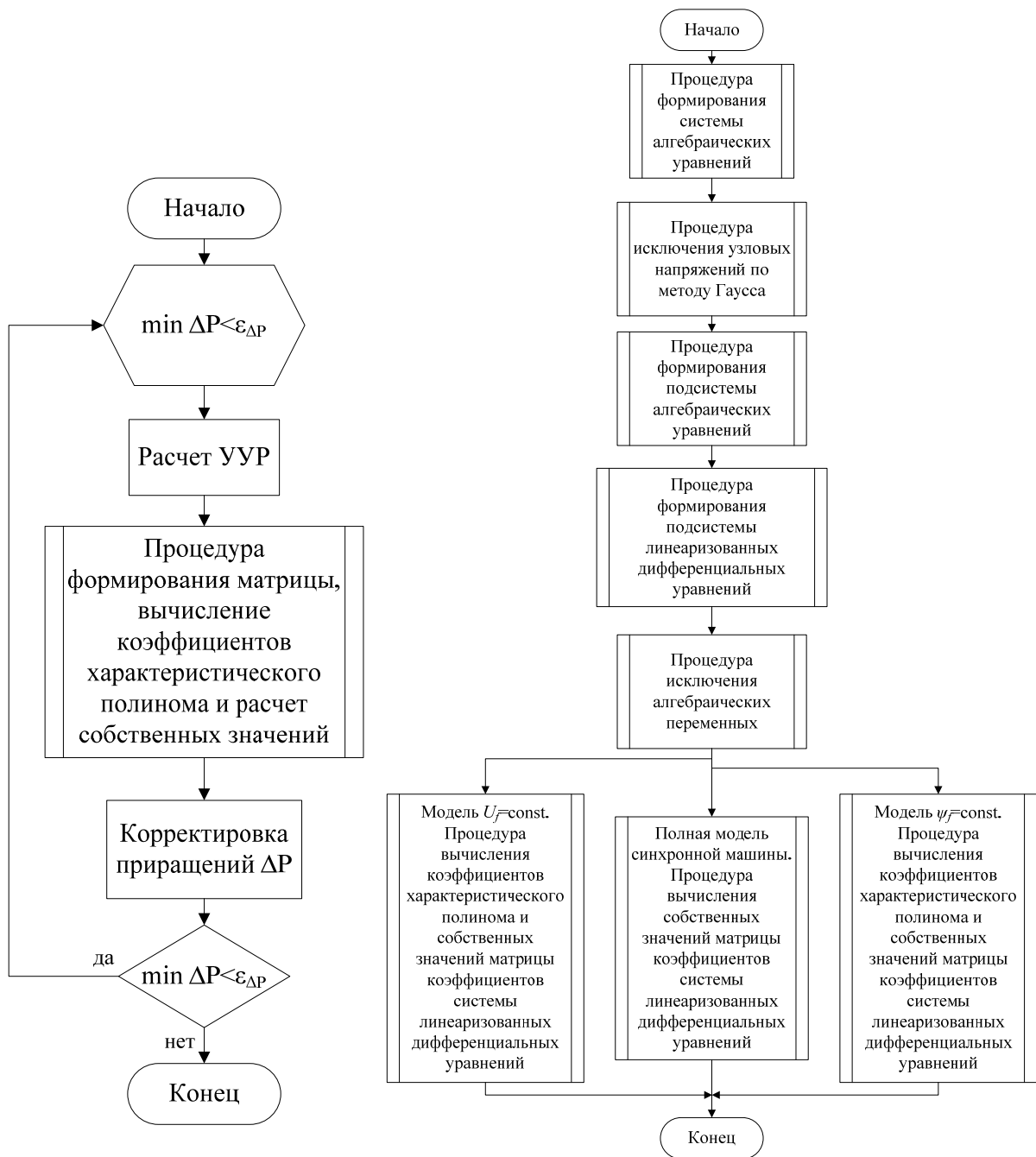


Рисунок 1.1 – Алгоритм процедуры определения границы области потенциально устойчивых режимов

Рисунок 1.2 – Алгоритм процедуры формирования матрицы, вычисления коэффициентов характеристического полинома и собственных значений матрицы коэффициентов системы линеаризованных дифференциальных уравнений

- понижение порядка (эквивалентирование) подсистемы алгебраических уравнений посредством исключения переменных (узловых напряжений электрической сети) методом Гаусса;
- формирование выражений для электрической мощности в узлах;
- формирование подсистемы линеаризованных дифференциальных уравнений относительного электромеханического движения синхронных машин;
- вычисление собственных значений матрицы коэффициентов полной системы линеаризованных дифференциальных уравнений переходных процессов в синхронных генераторах, системах возбуждения и их автоматических регуляторах;
- вычисление собственных значений матрицы коэффициентов системы линеаризованных дифференциальных уравнений в упрощенных моделях (позиционная модель  $\psi_f = \text{const}$  и нерегулируемая модель без АРВ  $U_f = \text{const}$ );
- численный анализ свободного члена, корней характеристического уравнения и определение области устойчивых режимов.

Оценка эффективности и быстродействия разработанного алгоритма осуществляется с использованием стандартных инструментов среды Matlab. Результаты вычислительных экспериментов расчета коэффициентов характеристического уравнения путем раскрытия определителя системы при различных условиях управления возбуждением синхронных машин приведены в таблице 1.1.

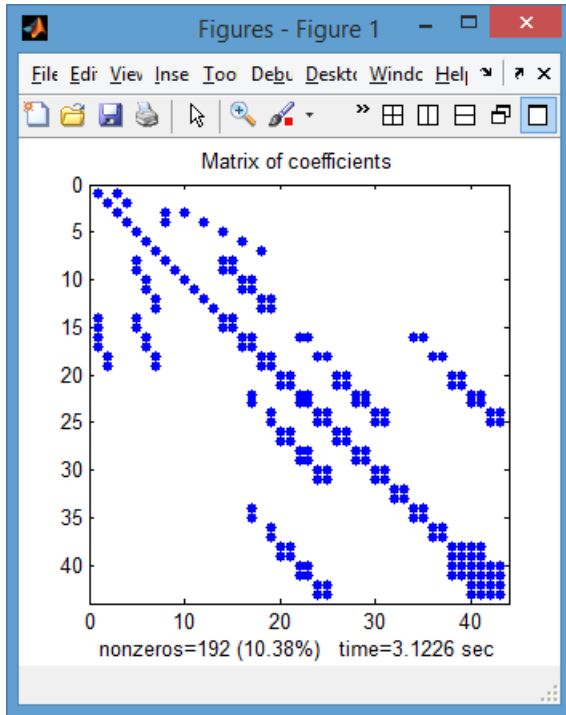


Рисунок 1.3 – Структура матрицы коэффициентов для нерегулируемой модели  $U_f = \text{const}$

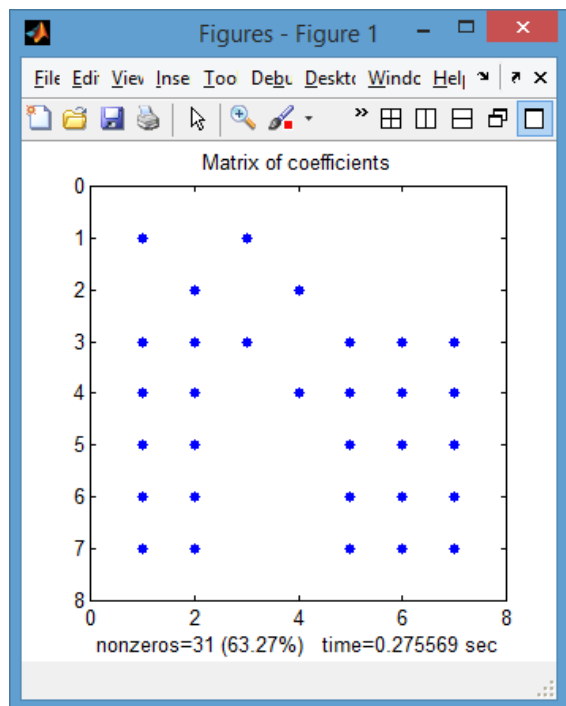


Рисунок 1.4 – Структура эквивалентированной матрицы коэффициентов для нерегулируемой модели  $U_f = \text{const}$

Оценка времени вычисления коэффициентов характеристического полинома производилась с помощью m-функции tic/toc с его графического отображения.

Как было показано в разделе 1.4, матрица коэффициентов системы линеаризованных дифференциально-алгебраических уравнений малых колебаний, составленная в соответствии с описанной ранее методикой определения границы области потенциально устойчивых режимов, содержит большое количество нулевых элементов (1.57). В частности, для схемы цепочечной электропередачи (рисунок 3.1) с тремя эквивалентными генераторами соизмеримой мощности

$$P_{\text{НОМ}}^{(\Gamma 1)} = P_{\text{НОМ}}^{(\Gamma 2)} = P_{\text{НОМ}}^{(\Gamma 3)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}},$$

представленных нерегулируемой моделью  $U_f = \text{const}$ , распределение ненулевых элементов в матрице коэффициентов с помощью стандартных инструментов

визуализации разреженных матриц представлено на рисунке 1.3.

Приведенная на рисунке 1.3 квадратная матрица 43 порядка содержит всего 192 (из 1849) ненулевых элемента, что составляет около 10%. Согласно

предложенной методике, для сокращения вычислительных затрат после формирования общей системы уравнений вида (1.57) выполнялось понижение порядка (эквивалентирование) системы посредством исключения алгебраических переменных (узловых напряжений и электрической мощности) методом Гаусса. Эквивалентированная матрица коэффициентов (1.58) седьмого порядка (рисунок 1.4) содержит всего 18 нулевых элементов, что составляет менее 37%.

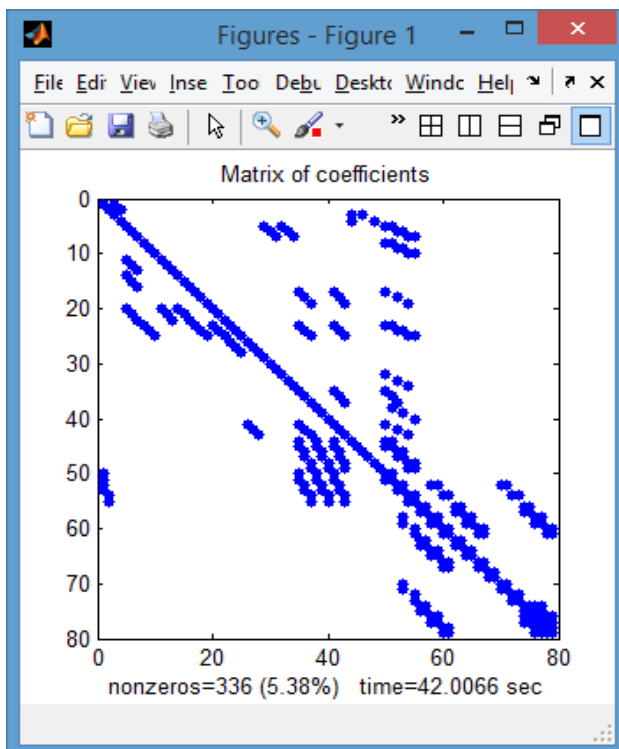


Рисунок 1.5 – Структура матрицы коэффициентов для полной модели с АРВ-СД

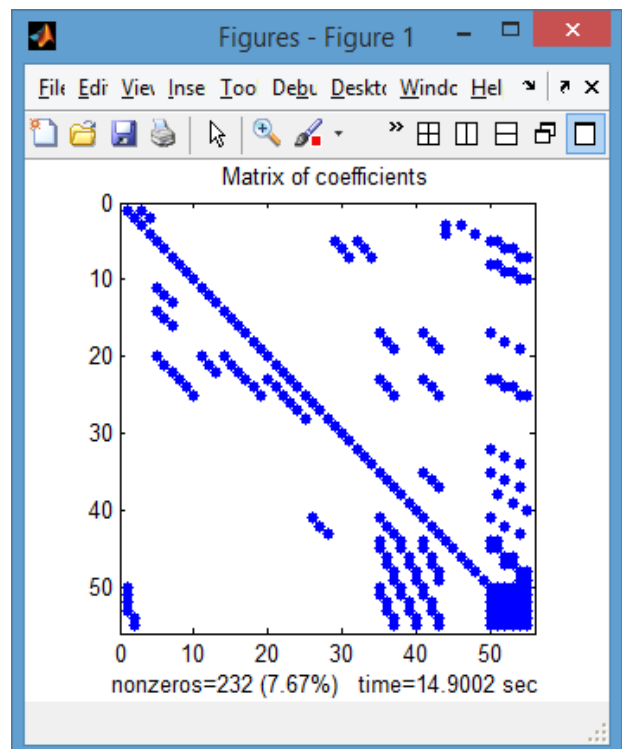


Рисунок 1.6 – Структура эквивалентированной матрицы коэффициентов для полной модели с АРВ-СД

Оценка приведенных вычислительных затрат в различных расчетных случаях производилась при сопоставлении результатов относительно максимального значения, указанного в таблице 1.1.

Как показали результаты исследований, применение разработанной методики определения границы области потенциально устойчивых режимов позволяет значительно сократить вычислительные затраты даже для схем ЭЭС, характеризующихся незначительным порядком системы уравнений переходных процессов (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – 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%)
Вычислительное время, с / пр.е.	3,12 с / 0,074	0,27 с / 0,006	42,01 с / 1,000	14,90 с / 0,355

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 (0,27 с / 0,006) меньше аналогичного времени расчета в полной системе дифференциально-алгебраических уравнений (42,01 с / 1,000), что позволяет говорить об эффективности разработанного алгоритма.

Быстродействие разработанной методики определяется выбором алгоритма для вычисления собственных значений матрицы коэффициентов системы линеаризованных уравнений. Например, для стандартного QR-алгоритма число выполняемых арифметических операций (при допущении двух итераций алгоритма на каждое собственное число) в зависимости от размерности матрицы  $N$  выражается формулой [171]:

$$m = \frac{25}{6} \cdot N^3 + 47 \cdot N^2 + 3 \cdot N - 182. \quad (1.94)$$

Для действительных протяженных энергообъединений зависимость длительности расчета от размерности матрицы коэффициентов носит степенной характер с показателем близким к трем [171].

Матрица коэффициентов системы линеаризованных уравнений расчетной схемы ОЭС Северо-Запада с общим количеством узлов принятым

равным 739 (из них 52 эквивалентных генератора) для нерегулируемой модели  $U_f = \text{const}$  имеет размерность  $154 \times 154$  и состоит из 23 716 элементов (согласно формуле 2.23). Для полной модели аналогичная матрица коэффициентов будет содержать 2 627 641 элемент и имеет ранг равный 1621.

Согласно выражению (1.94) количество арифметических операций, необходимых для вычисления собственных значений матрицы коэффициентов нерегулируемой модели  $U_f = \text{const}$  (ранг 154), будет в 10 раз меньше количества арифметических операций для полной модели (матрица ранга 1 621), что подтверждает закономерности, выявленные в таблице 1.1.

Как показали результаты исследований, применение упрощенных моделей синхронных машин совместно с понижением порядка подсистемы алгебраических уравнений, учитывающим слабую заполненность матрицы собственных и взаимных проводимостей электрической сети, позволяет существенно сократить вычислительные затраты.

Разработанный алгоритм реализован в среде Matlab, предложенная методика апробирована и внедрена на разработанном «НПП «РТС-Электро» цифровом диагностическом комплексе программно-аппаратного моделирования ЦДК-РТ (Приложение А).

## 1.6 Выводы

1. Показана возможность применения упрощенных моделей, позволяющих выполнить первичную оценку предельных по передаваемой мощности режимов энергосистем.

2. Приведены основные соотношения, позволяющие выполнить последующий численный анализ собственных значений матрицы коэффициентов системы линеаризованных дифференциальных уравнений электромеханических переходных процессов.

3. 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.

4. Выполнена оценка эффективности разработанного алгоритма определения границы области потенциально устойчивых режимов. Показано, что предложенная методика обладает лучшими показателями быстродействия и позволяет сократить вычислительные затраты более чем в 100 раз.



## **2 КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Обеспечение устойчивой параллельной работы протяженных энергообъединений неразрывно связано с выполнением трудоемких исследований с привлечением различных математических моделей силового оборудования и его систем управления [94, 95, 97, 98, 99, 103, 111, 118, 119, 127]. Быстрый и качественный поиск области потенциально устойчивых (стабилизируемых в колебательном отношении) режимов, полученных с использованием упрощенных моделей энергообъединения сложной структуры чрезвычайно актуален для научных и практических исследований [109, 110, 112, 120, 121, 123, 126]. Задача исследования устойчивости в такой постановке требует поиска и теоретического обоснования качественно новых, структурных критериев устойчивости электроэнергетических систем. В данной главе отражены результаты исследования динамических свойств электроэнергетической системы простой структуры [69, 74, 75] и приведен ряд важных в практическом отношении положений о критериях статической колебательной устойчивости электроэнергетической системы.

### **2.1 Анализ динамических свойств позиционной модели электроэнергетических систем**

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 слабодемпфированным 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 ЭЭС содержит только четные степени "p":

$$p^{2(N-1)} + A_2 \cdot p^{2(N-2)} + \dots + A_{2(k-1)} \cdot p^{2(N-k)} + \dots + A_{2(N-2)} \cdot p^2 + A_{2(N-1)} = 0 \quad (2.1)$$

Для обеспечения устойчивости такой системы необходимо и достаточно, чтобы все характеристические корни были мнимыми. Положительный знак  $A_{2(N-1)}$  в выражении (2.1) не отождествляет устойчивое состояние позиционной системы при ее самораскачивании.

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

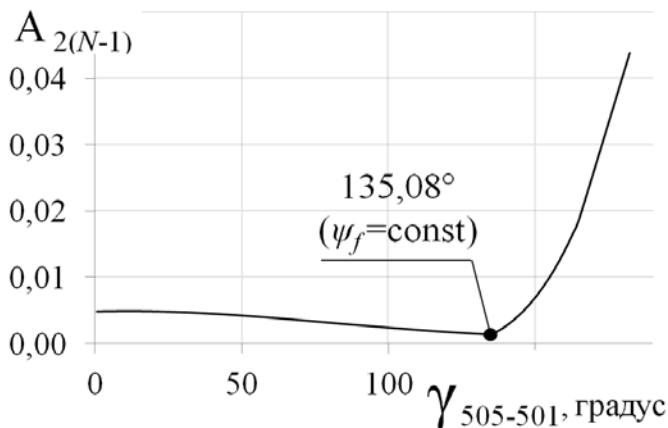


Рисунок 2.1 – Изменение свободного члена характеристического уравнения позиционной ЭЭС цепочечной структуры при загрузке контролируемого сечения

В работах А.А. Рагозина и М.Г. Попова [69, 74, 75] было показано, что в области неустойчивых режимов ЭЭС решениями характеристического уравнения (2.1) могут быть не только положительные вещественные корни, но и комплексно-сопряженные корни с

положительной вещественной частью.

Анализ характеристического уравнения относительного движения позиционной системы выявил характерную зависимость изменения свободного члена  $A_{2(N-1)}$  (рисунок 2.1, 2.2) при распаде двух пар мнимых

корней на пары  $(\alpha \pm j\omega)$  и  $(-\alpha \pm j\omega)$ .

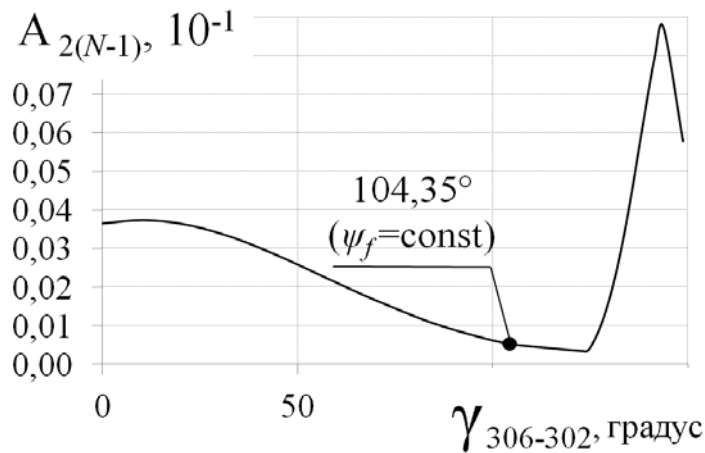


Рисунок 2.2 – Изменение свободного члена характеристического уравнения позиционной ЭЭС кольцевой структуры при загрузке контролируемого сечения

В [69, 74] 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  $(-\alpha \pm j\omega)$ .

Вариация коэффициентов полинома с учетом требований критерия Гурвица позволяет установить [75], что имеет место перераспределение вещественных частей среди доминирующих корней системы, которое сопровождается возрастанием затухания электромеханических составляющих движения. В стабилизированной системе принцип перераспределения вещественных частей корней характеристического уравнения оказывается еще более ярко выраженным. Однако, как показано в [27; 28; 30; 62 - 68; 70; 71], применение позиционной модели не всегда позволяет качественно определять область потенциально устойчивых (стабилизируемых) режимов энергосистем произвольной структуры.

## 2.2 Анализ динамических свойств нерегулируемой модели электроэнергетической системы при колебательном характере нарушения устойчивости

В настоящем разделе производится структурный анализ коэффициентов характеристического полинома для энергосистем простой

структуры (двух и трехмашинный эквивалент электропередачи) при представлении генераторов нерегулируемой моделью ( $U_f = \text{const}$ ). На основе выявленных характерных свойств нарушения статической колебательной устойчивости указанных систем формулируются тезисы о способе контроля устойчивого состояния сложных многомашинных электромеханических систем, которые расширены и обобщены на основе результатов расчетных исследований, изложенных в последующих главах.

### **2.2.1 Анализ полиномиальных коэффициентов характеристического уравнения двухмашинной эквивалентной энергосистемы**

Для установления функциональной зависимости свободного члена характеристического уравнения выполним подробный анализ его коэффициентов в простейшей схеме, содержащей два эквивалентных генератора (структура электропередачи аналогична представленной на рисунке 3.1). Справочные данные о параметрах элементов схемы и используемых моделях подробно изложены в разделе 3.1. Система уравнений малых колебаний (1.57) при представлении генераторов нерегулируемой моделью  $U_f = \text{const}$ :

$$p\Delta\delta_{g2\_g1} - \Delta\omega_{g2\_g1} = 0, \quad (2.2)$$

$$p\Delta\omega_{g2\_g1} + \frac{1}{T_{Jg2}} \cdot \Delta P_{2\_ген} - \frac{1}{T_{Jg1}} \cdot \Delta P_{1\_ген} = 0, \quad (2.3)$$

$$\left( p + \frac{1}{T_{d0\_g1}} \cdot \frac{x_{d\_g1}}{x'_{d\_g1}} \right) \cdot \Delta E'_{g1}{}^q + \frac{1}{T_{d0\_g1}} \cdot \frac{x'_{d\_g1} - x_{d\_g1}}{x'_{d\_g1}} \cdot \Delta U_1^q = 0, \quad (2.4)$$

$$\left( p + \frac{1}{T_{d0\_g2}} \cdot \frac{x_{d\_g2}}{x'_{d\_g2}} \right) \cdot \Delta E'_{g2}{}^q + \frac{1}{T_{d0\_g2}} \cdot \frac{x'_{d\_g2} - x_{d\_g2}}{x'_{d\_g2}} \cdot \Delta U_2^q = 0, \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{1\_zeh} &= \left( Y_{11\_g1}^{11qd} \cdot U_1^q + Y_{11\_g1}^{21qd} \cdot U_1^d \right) \cdot \Delta E'_{g1}{}^q + \left( -Y_{11\_g1}^{12qd} \cdot U_1^d - Y_{11\_g1}^{21qd} \cdot U_1^q \right) \cdot \Delta U_1^q + \\ &+ \left( -Y_{11\_g1}^{12qd} \cdot U_1^q + Y_{11\_g1}^{21qd} \cdot \left( E'_{g1}{}^q - U_1^q \right) \right) \cdot \Delta U_1^d, \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{1\_zeh} &= \left( Y_{11\_g1}^{11qd} \cdot U_1^d - Y_{11\_g1}^{21qd} \cdot U_1^q \right) \cdot \Delta E'_{g1}{}^q + \left( Y_{11\_g1}^{21qd} \cdot U_1^q - Y_{11\_g1}^{21qd} \cdot \left( E'_{g1}{}^q - U_1^q \right) \right) \cdot \Delta U_1^q + \\ &+ \left( -2 \cdot Y_{11\_g1}^{12qd} \cdot U_1^d \right) \cdot \Delta U_1^d, \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{2\_zeh} &= \left( Y_{22\_g2}^{11qd} \cdot U_2^q + Y_{22\_g2}^{21qd} \cdot U_2^d \right) \cdot \Delta E'_{g2}{}^q + \left( -Y_{22\_g2}^{12qd} \cdot U_2^d - Y_{22\_g2}^{21qd} \cdot U_2^q \right) \cdot \Delta U_2^q + \\ &+ \left( -Y_{22\_g2}^{12qd} \cdot U_2^q + Y_{22\_g2}^{21qd} \cdot \left( E'_{g2}{}^q - U_2^q \right) \right) \cdot \Delta U_2^d, \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{2\_zeh} &= \left( Y_{22\_g2}^{11qd} \cdot U_2^d - Y_{22\_g2}^{21qd} \cdot U_2^q \right) \cdot \Delta E'_{g2}{}^q + \left( Y_{22\_g2}^{21qd} \cdot U_2^q - Y_{22\_g2}^{21qd} \cdot \left( E'_{g2}{}^q - U_2^q \right) \right) \cdot \Delta U_2^q + \\ &+ \left( -2 \cdot Y_{22\_g2}^{12qd} \cdot U_2^d \right) \cdot \Delta U_2^d, \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{1\_cemu} &= \left( 2 \cdot Y_{11}^{Re} \cdot U_1^q + \left( Y_{12}^{Re} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) - Y_{12}^{Im} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_2^q + \right. \\ &\left. + \left( -Y_{12}^{Re} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) - Y_{12}^{Im} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_2^d \right) \cdot \Delta U_1^q + \\ &+ \left( 2 \cdot Y_{11}^{Re} \cdot U_1^d + \left( Y_{12}^{Re} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) + Y_{12}^{Im} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_2^q + \right. \\ &\left. + \left( Y_{12}^{Re} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) - Y_{12}^{Im} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_2^d \right) \cdot \Delta U_1^d + \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} &+ \left( Y_{12}^{Re} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) - Y_{12}^{Im} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_1^q + \\ &+ \left( Y_{12}^{Re} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) + Y_{12}^{Im} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_1^d \right) \cdot \Delta U_2^q + \\ &+ \left( -Y_{12}^{Re} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) - Y_{12}^{Im} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_1^q + \\ &+ \left( Y_{12}^{Re} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) - Y_{12}^{Im} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_1^d \right) \cdot \Delta U_2^d, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{1\_cemu} &= \left( -2 \cdot Y_{11}^{Im} \cdot U_1^q - \left( Y_{12}^{Re} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) + Y_{12}^{Im} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_2^q + \right. \\ &\left. + \left( -Y_{12}^{Re} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) + Y_{12}^{Im} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_2^d \right) \cdot \Delta U_1^q + \\ &+ \left( -2 \cdot Y_{11}^{Im} \cdot U_1^d + \left( Y_{12}^{Re} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) - Y_{12}^{Im} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_2^q + \right. \\ &\left. + \left( -Y_{12}^{Re} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) - Y_{12}^{Im} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_2^d \right) \cdot \Delta U_1^d + \\ &+ \left( -Y_{12}^{Re} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) + Y_{12}^{Im} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_1^q + \\ &+ \left( Y_{12}^{Re} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) - Y_{12}^{Im} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_1^d \right) \cdot \Delta U_2^q + \\ &+ \left( -Y_{12}^{Re} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) - Y_{12}^{Im} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_1^q + \\ &+ \left( -Y_{12}^{Re} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) - Y_{12}^{Im} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_1^d \right) \cdot \Delta U_2^d, \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned}
\Delta P_{2\_cemu} = & \left( \left( Y_{21}^{\text{Re}} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) + Y_{21}^{\text{Im}} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_2^q + \right. \\
& \left. + \left( -Y_{21}^{\text{Re}} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) + Y_{21}^{\text{Im}} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_2^d \right) \cdot \Delta U_1^q + \\
& + \left( \left( Y_{21}^{\text{Re}} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) - Y_{21}^{\text{Im}} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_2^q + \right. \\
& \left. + \left( Y_{21}^{\text{Re}} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) + Y_{21}^{\text{Im}} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_2^d \right) \cdot \Delta U_1^d + \\
& + \left( 2 \cdot Y_{22}^{\text{Re}} \cdot U_2^q + \left( Y_{21}^{\text{Re}} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) + Y_{21}^{\text{Im}} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_1^q + \right. \\
& \left. + \left( Y_{21}^{\text{Re}} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) - Y_{21}^{\text{Im}} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_1^d \right) \cdot \Delta U_2^q + \\
& + \left( 2 \cdot Y_{22}^{\text{Re}} \cdot U_2^d + \left( -Y_{21}^{\text{Re}} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) + Y_{21}^{\text{Im}} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_1^q + \right. \\
& \left. + \left( Y_{21}^{\text{Re}} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) + Y_{21}^{\text{Im}} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_1^d \right) \cdot \Delta U_2^d,
\end{aligned} \tag{2.12}$$

$$\begin{aligned}
\Delta Q_{2\_cemu} = & \left( - \left( -Y_{21}^{\text{Re}} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) + Y_{21}^{\text{Im}} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_2^q + \right. \\
& \left. + \left( Y_{21}^{\text{Re}} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) + Y_{21}^{\text{Im}} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_2^d \right) \cdot \Delta U_1^q + \\
& + \left( - \left( Y_{21}^{\text{Re}} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) + Y_{21}^{\text{Im}} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_2^q + \right. \\
& \left. + \left( Y_{21}^{\text{Re}} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) - Y_{21}^{\text{Im}} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_2^d \right) \cdot \Delta U_1^d + \\
& + \left( -2 \cdot Y_{22}^{\text{Im}} \cdot U_2^q - \left( -Y_{21}^{\text{Re}} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) + Y_{21}^{\text{Im}} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_1^q + \right. \\
& \left. + \left( -Y_{21}^{\text{Re}} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) - Y_{21}^{\text{Im}} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_1^d \right) \cdot \Delta U_2^q + \\
& + \left( -2 \cdot Y_{22}^{\text{Im}} \cdot U_2^d + \left( Y_{21}^{\text{Re}} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) + Y_{21}^{\text{Im}} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_1^q + \right. \\
& \left. + \left( Y_{21}^{\text{Re}} \cdot \sin(\delta_{g2} - \delta_{g1}) - Y_{21}^{\text{Im}} \cdot \cos(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \right) \cdot U_1^d \right) \cdot \Delta U_2^d,
\end{aligned} \tag{2.13}$$

где  $Y_{11}^{\text{Re}}$ ,  $Y_{11}^{\text{Im}}$ ,  $Y_{22}^{\text{Re}}$ ,  $Y_{22}^{\text{Im}}$ ,  $Y_{12}^{\text{Re}} = Y_{21}^{\text{Re}}$ ,  $Y_{12}^{\text{Im}} = Y_{21}^{\text{Im}}$  – собственные и взаимные проводимости узлов эквивалентной схемы, полученные после исключения узлов с пассивными элементами.

В приведенных выше выражениях (2.2) – (2.13) проводимости  $Y_{11\_g1}^{12qd}$ ,  $Y_{11\_g1}^{21qd}$ ,  $Y_{22\_g2}^{12qd}$ ,  $Y_{22\_g2}^{21qd}$  определены по уравнениям (1.40) – (1.41) без учета активного сопротивления фазных обмоток и обмотки возбуждения:

$$\begin{aligned}
Y_{11\_g1}^{12qd} = 1/x_{q\_g1}, \quad Y_{11\_g1}^{21qd} = -1/x_{d\_g1}, \quad Y_{11\_g1}^{11qd} = Y_{11\_g1}^{22qd} = 0; \quad Y_{22\_g2}^{12qd} = 1/x_{q\_g2}, \\
Y_{22\_g2}^{21qd} = -1/x_{d\_g2}, \quad Y_{22\_g2}^{11qd} = Y_{22\_g2}^{22qd} = 0.
\end{aligned}$$

Система уравнений (2.2) – (2.13) должна быть дополнена уравнениями баланса мощности и приведена к виду (1.58). В свою очередь характеристическое уравнение получено при раскрытии определителя матрицы коэффициентов (2.14):

$$\begin{pmatrix} p & -1 & 0 & 0 \\ C_{21} & p & C_{23\_1} & C_{23\_2} \\ C_{31\_1} & 0 & p + \frac{1}{T_{d0\_g1}} \cdot \frac{x_{d\_g1}}{x'_{d\_g1}} + C_{33\_11} & C_{33\_12} \\ C_{31\_2} & 0 & C_{33\_21} & p + \frac{1}{T_{d0\_g2}} \cdot \frac{x_{d\_g2}}{x'_{d\_g2}} + C_{33\_22} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} d(\delta_{g2} - \delta_{g1}) \\ d(\omega_{g2} - \omega_{g1}) \\ dE'_{g1} \\ dE'_{g2} \end{pmatrix} = 0, \quad (2.14)$$

$$\text{где } C_{21} = C_{TJ} \times \frac{\partial PQ_{ген}}{\partial U_{сети}^{q,d}} \times \left( \frac{\partial PQ_{ген}}{\partial U_{сети}^{q,d}} - \frac{\partial PQ_{сети}}{\partial U_{сети}^{q,d}} \right)^{-1} \times \frac{\partial PQ_{сети}}{\partial \delta_{ген\ отн}} \text{ согласно (1.59).}$$

Как отмечалось ранее (раздел 1.4), вектор-строка  $C_{23}$ , вектор-столбец  $C_{31}$  и подматрица  $C_{33}$  получены в ходе исключения алгебраических переменных (мощности и напряжения) с учетом выражений (1.59) – (1.62):

$$C_{23} = (C_{23\_1} \quad C_{23\_2}), \quad C_{31} = \begin{pmatrix} C_{31\_1} \\ C_{31\_2} \end{pmatrix}, \quad C_{33} = \begin{pmatrix} C_{33\_11} & C_{33\_12} \\ C_{33\_21} & C_{33\_22} \end{pmatrix}. \quad (2.15)$$

Тогда коэффициенты характеристического уравнения системы (2.14) для эквивалентной двухмашинной схемы электропередачи

$$p^4 + A_1 \cdot p^3 + A_2 \cdot p^2 + A_3 \cdot p^1 + A_4 = 0 \quad (2.16)$$

определяются как:

$$A_1 = \left( \frac{1}{T_{d0\_g1}} \cdot \frac{x_{d\_g1}}{x'_{d\_g1}} + C_{33\_11} \right) + \left( \frac{1}{T_{d0\_g2}} \cdot \frac{x_{d\_g2}}{x'_{d\_g2}} + C_{33\_22} \right), \quad (2.17)$$

$$A_2 = \left( \frac{1}{T_{d0\_g1}} \cdot \frac{x_{d\_g1}}{x'_{d\_g1}} + C_{33\_11} \right) \cdot \left( \frac{1}{T_{d0\_g2}} \cdot \frac{x_{d\_g2}}{x'_{d\_g2}} + C_{33\_22} \right) - C_{33\_12} \cdot C_{33\_21} + C_{21}, \quad (2.18)$$

$$A_3 = C_{21} \cdot A_1 - C_{23\_1} \cdot C_{31\_1} - C_{23\_2} \cdot C_{31\_2}, \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned}
A_4 = & C_{21} \cdot \left( \frac{1}{T_{d0\_g1}} \cdot \frac{x_{d\_g1}}{x'_{d\_g1}} + C_{33\_11} \right) \cdot \left( \frac{1}{T_{d0\_g2}} \cdot \frac{x_{d\_g2}}{x'_{d\_g2}} + C_{33\_22} \right) + \\
& + C_{23\_1} \cdot \left( C_{33\_12} \cdot C_{31\_2} - C_{31\_1} \cdot \left( \frac{1}{T_{d0\_g2}} \cdot \frac{x_{d\_g2}}{x'_{d\_g2}} + C_{33\_22} \right) \right) + \\
& + C_{23\_2} \cdot \left( C_{31\_1} \cdot C_{33\_21} - \left( \frac{1}{T_{d0\_g1}} \cdot \frac{x_{d\_g1}}{x'_{d\_g1}} + C_{33\_11} \right) \cdot C_{31\_2} \right). \tag{2.20}
\end{aligned}$$

После подстановки начальных условий (угол электропередачи около  $\gamma_U \approx 40^\circ$ ,  $\delta_{g21} = 58,75^\circ$ ) и выполненных округлений выражение (2.20) для свободного члена  $A_4$  принимает вид:

$$A_4 = \frac{\left[ \begin{aligned} & [3,801 \cdot \sin(6 \cdot \delta_{g21}) - 4,362 \cdot \cos(6 \cdot \delta_{g21})] \cdot 10^{-53} + \\ & + [-0,709 \cdot \sin(5 \cdot \delta_{g21}) - 1,024 \cdot \cos(5 \cdot \delta_{g21})] \cdot 10^{-35} + \\ & + [6,783 \cdot \sin(4 \cdot \delta_{g21}) + 9,886 \cdot \cos(4 \cdot \delta_{g21})] \cdot 10^{-19} + \\ & + 0,170 \cdot \sin(3 \cdot \delta_{g21}) - 0,125 \cdot \cos(3 \cdot \delta_{g21}) + \\ & + 2,875 \cdot \sin(2 \cdot \delta_{g21}) + 0,245 \cdot \cos(2 \cdot \delta_{g21}) + \\ & + 6,620 \cdot \sin(\delta_{g21}) + 6,897 \cdot \cos(\delta_{g21}) - 0,306 \end{aligned} \right]}{\left[ \begin{aligned} & [-5,652 \cdot \sin(6 \cdot \delta_{g21}) + 2,702 \cdot \cos(6 \cdot \delta_{g21})] \cdot 10^{-54} + \\ & + [-0,085 \cdot \sin(5 \cdot \delta_{g21}) + 3,126 \cdot \cos(5 \cdot \delta_{g21})] \cdot 10^{-36} + \\ & + [4,568 \cdot \sin(4 \cdot \delta_{g21}) + 2,496 \cdot \cos(4 \cdot \delta_{g21})] \cdot 10^{-19} + \\ & + 0,024 \cdot \sin(3 \cdot \delta_{g21}) - 0,016 \cdot \cos(3 \cdot \delta_{g21}) + \\ & + 0,612 \cdot \sin(2 \cdot \delta_{g21}) - 0,077 \cdot \cos(2 \cdot \delta_{g21}) + \\ & + 2,960 \cdot \sin(\delta_{g21}) + 3,356 \cdot \cos(\delta_{g21}) + 5,823 \end{aligned} \right]}.$$

Следует отметить, что остальные коэффициенты ( $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$ ) характеристического уравнения также содержат тригонометрические функции относительного угла с максимальной кратностью равной шести. Не учитывая слагаемые с малыми амплитудами, получим:



$$A_4 = \frac{\left[ \begin{array}{l} 0,170 \cdot \sin(3 \cdot \delta_{g21}) - 0,125 \cdot \cos(3 \cdot \delta_{g21}) + \\ + 2,875 \cdot \sin(2 \cdot \delta_{g21}) + 0,245 \cdot \cos(2 \cdot \delta_{g21}) + \\ + 6,620 \cdot \sin(\delta_{g21}) + 6,897 \cdot \cos(\delta_{g21}) - 0,306 \end{array} \right]}{\left[ \begin{array}{l} 0,024 \cdot \sin(3 \cdot \delta_{g21}) - 0,016 \cdot \cos(3 \cdot \delta_{g21}) + \\ + 0,612 \cdot \sin(2 \cdot \delta_{g21}) - 0,077 \cdot \cos(2 \cdot \delta_{g21}) + \\ + 2,960 \cdot \sin(\delta_{g21}) + 3,356 \cdot \cos(\delta_{g21}) + 5,823 \end{array} \right]} \cdot \cdot$$

Аналогичным образом вычислим коэффициенты при тригонометрических функциях, соответствующие границе области устойчивости ( $\delta_{g21} = 87,36^\circ$ ):

$$A_4 = \frac{\left[ \begin{array}{l} [-0,673 \cdot \sin(6 \cdot \delta_{g21}) - 0,747 \cdot \cos(6 \cdot \delta_{g21})] \cdot 10^{-53} + \\ + [-0,421 \cdot \sin(5 \cdot \delta_{g21}) + 1,370 \cdot \cos(5 \cdot \delta_{g21})] \cdot 10^{-36} + \\ + [7,276 \cdot \sin(4 \cdot \delta_{g21}) + 0,406 \cdot \cos(4 \cdot \delta_{g21})] \cdot 10^{-19} + \\ + 0,048 \cdot \sin(3 \cdot \delta_{g21}) - 0,048 \cdot \cos(3 \cdot \delta_{g21}) + \\ + 0,986 \cdot \sin(2 \cdot \delta_{g21}) - 0,036 \cdot \cos(2 \cdot \delta_{g21}) + \\ + 2,649 \cdot \sin(\delta_{g21}) + 2,244 \cdot \cos(\delta_{g21}) - 0,162 \end{array} \right]}{\left[ \begin{array}{l} [0,041 \cdot \sin(6 \cdot \delta_{g21}) + 0,267 \cdot \cos(6 \cdot \delta_{g21})] \cdot 10^{-53} + \\ + [9,047 \cdot \sin(5 \cdot \delta_{g21}) + 7,923 \cdot \cos(5 \cdot \delta_{g21})] \cdot 10^{-37} + \\ + [1,782 \cdot \sin(4 \cdot \delta_{g21}) + 0,038 \cdot \cos(4 \cdot \delta_{g21})] \cdot 10^{-19} + \\ + 0,007 \cdot \sin(3 \cdot \delta_{g21}) - 0,005 \cdot \cos(3 \cdot \delta_{g21}) + \\ + 0,199 \cdot \sin(2 \cdot \delta_{g21}) + 0,014 \cdot \cos(2 \cdot \delta_{g21}) + \\ + 1,042 \cdot \sin(\delta_{g21}) + 1,120 \cdot \cos(\delta_{g21}) + 2,089 \end{array} \right]} \cdot \cdot$$

Также не учитывая слагаемые с малыми амплитудами:

$$A_4 = \frac{\left[ \begin{array}{l} 0,048 \cdot \sin(3 \cdot \delta_{g21}) - 0,048 \cdot \cos(3 \cdot \delta_{g21}) + \\ + 0,986 \cdot \sin(2 \cdot \delta_{g21}) - 0,036 \cdot \cos(2 \cdot \delta_{g21}) + \\ + 2,649 \cdot \sin(\delta_{g21}) + 2,244 \cdot \cos(\delta_{g21}) - 0,162 \end{array} \right]}{\left[ \begin{array}{l} 0,007 \cdot \sin(3 \cdot \delta_{g21}) - 0,005 \cdot \cos(3 \cdot \delta_{g21}) + \\ + 0,199 \cdot \sin(2 \cdot \delta_{g21}) + 0,014 \cdot \cos(2 \cdot \delta_{g21}) + \\ + 1,042 \cdot \sin(\delta_{g21}) + 1,120 \cdot \cos(\delta_{g21}) + 2,089 \end{array} \right]} \cdot \cdot$$

Важно отметить, что при увеличении загрузки электропередачи происходит значительное снижение амплитудных коэффициентов при соответствующих тригонометрических функциях удвоенной и утроенной кратности угла  $\delta_{g21}$ . Пренебрегая этими слагаемыми получим обобщенное выражение для свободного члена  $A_4$ :

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

Коэффициенты  $C_{1-f(E,U)}^1$ ,  $C_{1-f(E,U)}^2$ ,  $C_{0-f(E,U)}$  не являются постоянными, определяются начальным значением относительного угла между ЭДС генераторов  $\delta_{g21}$  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 2.3.

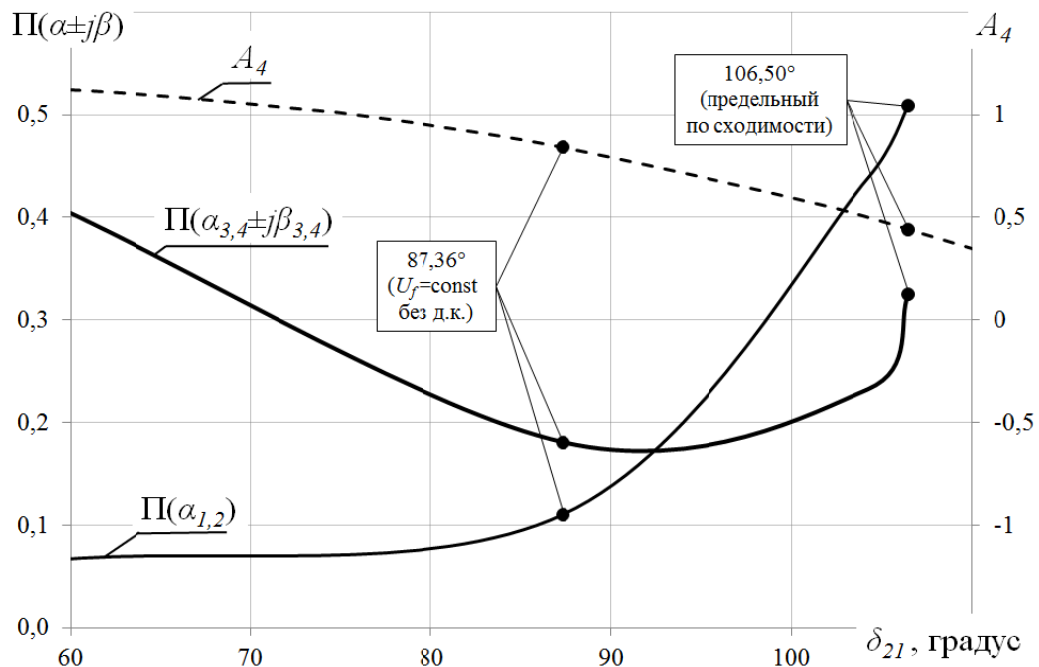


Рисунок 2.3 – Изменение произведения корней характеристического уравнения и свободного члена в функции относительного угла

Таблица 2.1 – Собственные значения матрицы коэффициентов системы линеаризованных дифференциальных уравнений эквивалентной двухмашинной электропередачи

$\delta_{g21}=58,75^\circ$	$\delta_{g21}=87,36^\circ$	$\delta_{g21}=106,50^\circ$
-0,314; -0,209;	-0,333; -0,333;	-1,743; -0,357;
-0,074±j0,640	-0,001±j0,425	<b>+0,714±j0,083</b>

Воспользуемся формулой Виета для свободного члена

характеристического уравнения четвертой степени эквивалентной двухмашинной электропередачи:

$$A_4 = (-1)^4 \cdot \prod_{i=1}^4 p_i . \quad (2.21)$$

Произведение корней характеристического уравнения кроме составляющих относительного электромеханического движения содержит апериодические корни (таблица 2.1), соответствующие частным решениям дифференциальных уравнений переходных процессов в обмотке возбуждения. Указанные корни мало меняются по абсолютному значению и являются отрицательными во всей области устойчивых режимов. В общем случае при нечетном числе эквивалентных генераторов график  $A_n$  на рисунке 2.3 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 пропорционально изменению свободного члена. Изменение указанного произведения  $\Pi(\alpha_{3,4} \pm \beta_{3,4})$  также представлено на рисунке 2.3.

Как показали результаты исследований, характер изменения  $A_4 = f(\delta_{g21})$  на рисунке 2.3 в значительной степени определяется коэффициентами подматрицы  $\partial PQ_{сети} / \partial \delta_{ген\ отн}$ . Элементы подматрицы  $\partial PQ_{сети} / \partial U_{сети}^{q,d}$  в соответствии с выражениями (1.59) - (1.62) в результате преобразований и вычисления обратной матрицы образуют слагаемые  $m$ -ой кратности  $C_{m-f(E,U)}(\sin(m \cdot \delta_{g21}) + \cos(m \cdot \delta_{g21}))$  и могут быть отброшены.

### **2.2.2 Анализ полиномиальных коэффициентов характеристического уравнения в трехмашинной схеме**

Выполним аналогичные исследования для схемы цепочечной

электропередачи (рисунок 3.1) с тремя эквивалентными генераторами соизмеримой мощности  $P_{ном}^{(\Gamma 1)} = P_{ном}^{(\Gamma 2)} = P_{ном}^{(\Gamma 3)} = 0,5 \cdot S_{баз}$  в виде нерегулируемой модели  $U_f = \text{const}$ . Справочные данные о параметрах элементов и используемых моделях также подробно изложены в разделе 3.1. Подматрицы коэффициентов системы линеаризованных дифференциальных уравнений малых колебаний (1.58) определяются выражениями (1.59) - (1.62). В соответствии с методикой определения области потенциально устойчивых режимов описанной в разделе 1.4, матрицы коэффициентов уравнений чувствительности нерегулируемой модели ЭЭС для режима электропередачи на границе области устойчивости согласно выражениям (1.63) - (1.93):

$$C_{TJ} = 10^{-8} \times \begin{pmatrix} -0,763 & 0 & 0,763 & 0 & 0 & 0 \\ -0,763 & 0 & 0 & 0 & 0,763 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\frac{\partial P Q_{cemu}}{\partial U_{cemu}^{q,d}} = 10^5 \times \begin{pmatrix} 4,894 & -3,185 & -0,500 & -0,006 & -0,076 & 0,161 \\ 2,869 & -2,717 & -0,006 & 0,499 & 0,161 & 0,076 \\ 0,204 & -0,455 & 5,108 & -3,767 & -0,496 & 0,056 \\ -0,455 & -0,204 & 3,046 & -2,643 & 0,056 & 0,496 \\ 0,176 & -0,031 & 0,211 & -0,452 & 4,291 & -3,705 \\ -0,031 & -0,176 & -0,452 & -0,211 & 2,906 & -1,789 \end{pmatrix},$$

$$\frac{\partial P Q_{ген}}{\partial U_{cemu}^{q,d}} = 10^5 \times \begin{pmatrix} -6,761 & -4,544 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -7,912 & 2,177 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -7,654 & -4,809 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6,708 & 2,465 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -7,767 & -4,692 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -6,693 & 2,501 \end{pmatrix},$$

$$\frac{\partial P Q_{ген}}{\partial E'_q} = 10^6 \times \begin{pmatrix} 0,785 & 0 & 0 \\ 1,094 & 0 & 0 \\ 0 & 0,888 & 0 \\ 0 & 1,011 & 0 \\ 0 & 0 & 0,902 \\ 0 & 0 & 0,999 \end{pmatrix},$$

$$C_{T\Delta 0}(\partial E_q / \partial U_{cemu}^{q,d}) = \begin{pmatrix} -0,887 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,887 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,887 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\frac{\partial PQ_{сети}}{\partial \delta_{ген отн}} = 10^9 \cdot \begin{pmatrix} -0,770 \cos(\delta_{g21}) - 0,157 \sin(\delta_{g21}) & -0,278 \cos(\delta_{g31}) - 0,038 \sin(\delta_{g31}) \\ 0,770 \sin(\delta_{g21}) - 0,157 \cos(\delta_{g21}) & 0,278 \sin(\delta_{g31}) - 0,038 \cos(\delta_{g31}) \\ 0,786 \cos(\delta_{g21}) - 0,004 \sin(\delta_{g21}) + & -0,780 \cos(\delta_{g32}) - 0,091 \sin(\delta_{g32}) \\ + 0,780 \cos(\delta_{g32}) + 0,091 \sin(\delta_{g32}) & \\ 0,004 \cos(\delta_{g21}) + 0,091 \cos(\delta_{g32}) + & 0,780 \sin(\delta_{g32}) - 0,091 \cos(\delta_{g32}) \\ + 0,786 \sin(\delta_{g21}) - 0,780 \sin(\delta_{g32}) & \\ 0,071 \sin(\delta_{g32}) - 0,782 \cos(\delta_{g32}) & 0,280 \cos(\delta_{g31}) + 0,782 \cos(\delta_{g32}) + \\ & + 0,024 \sin(\delta_{g31}) - 0,071 \sin(\delta_{g32}) \\ -0,071 \cos(\delta_{g32}) - 0,782 \sin(\delta_{g32}) & 0,071 \cos(\delta_{g32}) - 0,024 \cos(\delta_{g31}) + \\ & + 0,280 \sin(\delta_{g31}) + 0,782 \sin(\delta_{g32}) \end{pmatrix}.$$

Коэффициенты  $C_{21}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{31}$ ,  $C_{33}$  в соответствии с выражениями (1.59) - (1.62):

$$C_{21} = 10^{-8} \times \begin{pmatrix} -0,863 & 0,416 & 0,814 & -0,514 & 0,071 & -0,057 \\ -0,903 & 0,480 & -0,055 & -0,024 & 0,984 & -0,637 \end{pmatrix} \times \frac{\partial PQ_{сети}}{\partial \delta_{ген отн}},$$

$$C_{23} = \begin{pmatrix} -0,004 & 0,005 & -0,001 \\ -0,004 & 0,001 & 0,004 \end{pmatrix},$$

$$C_{31} = 10^{-6} \times \begin{pmatrix} 0,608 & 0,166 & 0,011 & 0,018 & -0,017 & 0,024 \\ 0,041 & -0,051 & 0,608 & 0,117 & 0,006 & 0,024 \\ -0,002 & -0,011 & 0,036 & -0,055 & 0,628 & 0,138 \end{pmatrix} \times \frac{\partial PQ_{сети}}{\partial \delta_{ген отн}},$$

$$C_{33} = \begin{pmatrix} -0,659 & -0,028 & -0,009 \\ 0,023 & -0,659 & -0,030 \\ 0,013 & 0,023 & -0,704 \end{pmatrix}.$$

Характеристическое уравнение системы (1.58) для эквивалентной трехмашинной схемы электропередачи:

$$p^7 + A_1 \cdot p^6 + A_2 \cdot p^5 + A_3 \cdot p^4 + A_4 \cdot p^3 + A_5 \cdot p^2 + A_6 \cdot p^1 + A_7 = 0. \quad (2.22)$$

Для режима электропередачи, соответствующего границе области устойчивости ( $\delta_{g31} = 120,64^\circ$ ):

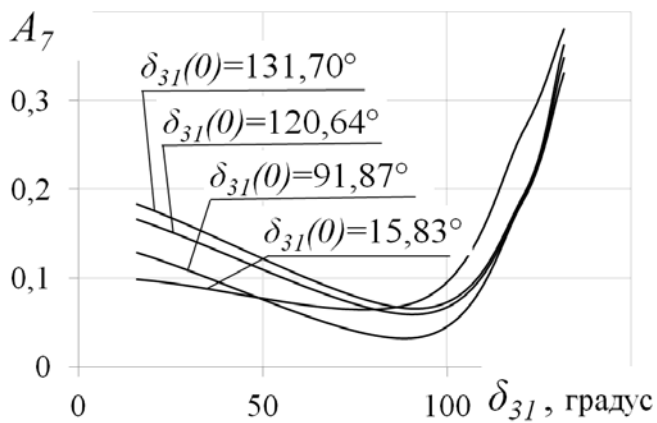
$$A_7 = 1,417 \sin(\delta_{g21}) \sin(\delta_{g32}) - 0,489 \sin(\delta_{g21}) \sin(\delta_{g31}) - 0,495 \sin(\delta_{g31}) \sin(\delta_{g32}) + \\ + 0,072 \cos(\delta_{g21}) \cos(\delta_{g31}) + 0,092 \cos(\delta_{g21}) \cos(\delta_{g32}) + 0,035 \cos(\delta_{g31}) \cos(\delta_{g32}) + \\ + 0,022 \cos(\delta_{g21}) \sin(\delta_{g31}) - 0,111 \cos(\delta_{g31}) \sin(\delta_{g21}) - 0,531 \cos(\delta_{g21}) \sin(\delta_{g32}) + \\ + 0,084 \cos(\delta_{g32}) \sin(\delta_{g21}) + 0,093 \cos(\delta_{g31}) \sin(\delta_{g32}) + 0,101 \cos(\delta_{g32}) \sin(\delta_{g31}).$$

Аналогично для режима электропередачи, отвечающего запасу около 8%, выражение для свободного члена имеет вид ( $\delta_{g31} = 91,87^\circ$ ):

$$\begin{aligned}
 A_7 = & 1,290 \sin(\delta_{g21}) \sin(\delta_{g32}) - 0,446 \sin(\delta_{g21}) \sin(\delta_{g31}) - 0,447 \sin(\delta_{g31}) \sin(\delta_{g32}) + \\
 & + 0,056 \cos(\delta_{g21}) \cos(\delta_{g31}) + 0,062 \cos(\delta_{g21}) \cos(\delta_{g32}) + 0,030 \cos(\delta_{g31}) \cos(\delta_{g32}) + \\
 & + 0,017 \cos(\delta_{g21}) \sin(\delta_{g31}) - 0,084 \cos(\delta_{g31}) \sin(\delta_{g21}) - 0,433 \cos(\delta_{g21}) \sin(\delta_{g32}) + \\
 & + 0,111 \cos(\delta_{g32}) \sin(\delta_{g21}) + 0,093 \cos(\delta_{g31}) \sin(\delta_{g32}) + 0,077 \cos(\delta_{g32}) \sin(\delta_{g31}).
 \end{aligned}$$

Для режима электропередачи, характеризующегося нулевой обменной мощностью ( $\delta_{g31} = 15,83^\circ$ ):

$$\begin{aligned}
 A_7 = & 1,117 \sin(\delta_{g21}) \sin(\delta_{g32}) - 0,039 \sin(\delta_{g21}) \sin(\delta_{g31}) - 0,376 \sin(\delta_{g31}) \sin(\delta_{g32}) + \\
 & + 0,028 \cos(\delta_{g21}) \cos(\delta_{g31}) + 0,026 \cos(\delta_{g21}) \cos(\delta_{g32}) + 0,034 \cos(\delta_{g31}) \cos(\delta_{g32}) + \\
 & - 0,005 \cos(\delta_{g21}) \sin(\delta_{g31}) - 0,065 \cos(\delta_{g31}) \sin(\delta_{g21}) - 0,201 \cos(\delta_{g21}) \sin(\delta_{g32}) + \\
 & + 0,208 \cos(\delta_{g32}) \sin(\delta_{g21}) + 0,081 \cos(\delta_{g31}) \sin(\delta_{g32}) + 0,041 \cos(\delta_{g32}) \sin(\delta_{g31}).
 \end{aligned}$$



На рисунках 2.4 - 2.6 представлено изменение свободного члена при вариации амплитудных коэффициентов при тригонометрических функциях относительного угла  $\delta_{ген\ отн}$ .

Рисунок 2.4 – Изменение свободного члена характеристического уравнения в функции относительного угла  $\delta_{31}$

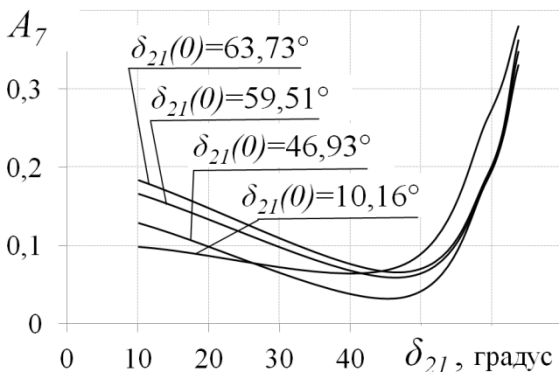


Рисунок 2.5 – Изменение свободного члена характеристического уравнения в функции относительного угла  $\delta_{21}$

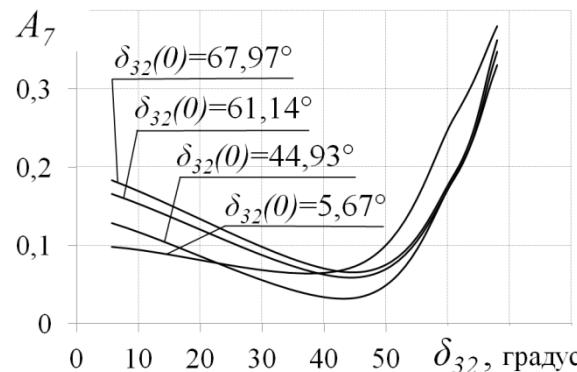


Рисунок 2.6 – Изменение свободного члена характеристического уравнения в функции относительного угла  $\delta_{32}$

Из анализа характера изменения  $A_7 = f(\delta_{ген\ отн})$  также следует наличие

ярко выраженного экстремума (минимума) функции в области углов, отвечающих границе устойчивости энергосистемы с моделью  $U_f = \text{const}$ .

Это позволяет сформулировать важный в практическом отношении тезис о том, что в качестве нового качественного критерия колебательного нарушения статической устойчивости может быть использован переход через нуль частной производной  $\partial A_n / \partial \delta_{отн} = 0$ .

### **2.2.3 Анализ полиномиальных коэффициентов характеристического уравнения в многомашиной схеме**

В общем случае при представлении  $N$ -генераторов нерегулируемой моделью  $U_f = \text{const}$  без демпферных контуров и замещении нагрузок постоянными сопротивлениями характеристическое уравнение (2.23) системы уравнений малых колебаний (1.58) может быть получено при раскрытии определителя матрицы коэффициентов:

$$p^{3N-2} + A_1 \cdot p^{3N-3} + \dots + A_{k-2} \cdot p^{3N-k} + \dots + A_{3N-3} \cdot p^1 + A_{3N-2} = 0. \quad (2.23)$$

Используя разложение Лапласа по первым  $(N-1)$  строкам:

$$\begin{aligned} & \begin{vmatrix} C_p & -E_{N-1} & 0 \\ C_{21} & C_p & C_{23} \\ C_{31} & 0 & C_{pTd0} + C_{33} \end{vmatrix} = \\ & = |C_p| \cdot (-1)^{1+2+\dots+(N-1)+1+2+\dots+(N-1)} \cdot \begin{vmatrix} C_p & C_{23} \\ 0 & C_{pTd0} + C_{33} \end{vmatrix} + \\ & + |-E_{N-1}| \cdot (-1)^{1+2+\dots+(N-1)+N+\dots+2(N-1)} \cdot \begin{vmatrix} C_{21} & C_{23} \\ C_{31} & C_{pTd0} + C_{33} \end{vmatrix} = \\ & = p^{2(N-1)} \cdot |C_{pTd0} + C_{33}| + \\ & + |-E_{N-1}| \cdot (-1)^{1+2+\dots+(N-1)+N+\dots+2(N-1)} \cdot \begin{vmatrix} C_{21} & C_{23} \\ C_{31} & C_{pTd0} + C_{33} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (2.24)$$

где  $C_p$  – диагональная подматрица порядка  $(N-1)$  состоящая из символов дифференцирования по времени,

$E_{N-1}$ , – единичная подматрица порядка  $(N-1)$ ,

$C_{21}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{31}$ ,  $C_{33}$ – подматрицы, полученные в ходе преобразований исходной системы уравнений (1.57) и не содержащие символа “ $p$ ”.

Формирование коэффициентов при старших степенях “ $p$ ” в выражении (2.23) будет происходить при раскрытии произведения определителей  $|C_p| \cdot |C_p| \cdot |C_{pTd0} + C_{33}|$ , а формирование свободного члена  $A_{3N-2}$  в результате преобразований второго слагаемого в выражении (2.24). Подматрицы частных производных мощности по напряжению и ЭДС а также ЭДС по напряжению  $\partial PQ_{ген} / \partial U_{сети}^{q,d}$ ,  $\partial PQ_{ген} / \partial E'_q$ ,  $C_{Td0}(\partial E_q / \partial U_{сети}^{q,d})$  в соответствии с выражениями (1.63) - (1.93) не содержат тригонометрических функций относительного угла ЭДС  $\delta_{ген\ отн}$ . Собственные и взаимные проводимости при представлении нагрузки шунтами постоянной проводимости и ввиду малости активных потерь на распределение мало меняются при последовательном утяжелении режима. 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 выше допущений можно заключить, что характер изменения свободного члена  $A_{3N-2}$  аналогичен представленному на рисунках 2.4 - 2.6 и определяется величиной определителя матрицы (1.58), в которую входят подматрицы  $\partial PQ_{сети} / \partial U_{сети}^{q,d}$  и  $\partial PQ_{сети} / \partial \delta_{ген\ отн}$  частных производных мощности по напряжению и относительному углу.

Результаты выполненного в этой главе анализа полиномиальных коэффициентов и выявленные качественные закономерности колебательного нарушения устойчивости электроэнергетической системы позволяют развить теорию исследования динамических свойств протяженных сложных



энергосистем произвольной структуры и сформулировать на этой основе новые практические критерии.

### 2.3 Выводы

1. Выполнен качественный, функциональный анализ статической устойчивости двухмашинной схемы, приведены результаты аналитического исследования структурных свойств членов характеристического уравнения относительного движения системы. Выявлено, что в области устойчивых режимов модели  $U_f = \text{const}$  произведение доминирующих составляющих относительного движения пропорционально изменению свободного члена. Показано, что характер изменения  $A_4 = f(\delta_{g21})$  в значительной степени определяется коэффициентами подматрицы  $\partial PQ_{\text{сети}} / \partial \delta_{\text{ген отн}}$ .

2. Выполнен структурный анализ свободного члена характеристического уравнения трехмашинной электропередачи. Показано, что при представлении генераторов нерегулируемой моделью  $U_f = \text{const}$  без демпферных контуров и замещении нагрузок постоянными сопротивлениями свободный член является знакоопределенной (положительной) функцией и имеет экстремальную точку.

3. Установлено, что характер изменения свободного члена сложных энергосистем определяется изменением коэффициентов подматрицы  $\partial PQ_{\text{сети}} / \partial U_{\text{сети}}^{q,d}$  и  $\partial PQ_{\text{сети}} / \partial \delta_{\text{ген отн}}$  частных производных мощности по напряжению и относительному углу.

### **3 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБЪЕДИНЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНОГО ПОДХОДА**

Исследование рассматриваемой в настоящей главе задачи заключается в поиске предельных режимов по обменной мощности, удовлетворяющих условиям обеспечения статической апериодической и колебательной устойчивости объединенных энергосистем. Следует понимать, что количественная оценка искомых численным способом запасов устойчивости [52, 53] носит приближенный характер, поскольку достоверность полученных результатов зависит от адекватности математического описания нагрузки и силового оборудования. Тем не менее, поиск области потенциально устойчивых режимов может осуществляться с применением упрощенных моделей, отражающих доминирующие составляющие относительного движения с приемлемой погрешностью [65, 69]. Здесь и в последующих разделах под потенциально устойчивым режимом понимаются условия функционирования объединенной энергосистемы, в которых она может быть устойчива при введении любого (ненулевого) стабилизационного воздействия через АРВ-СД с невырожденной структурой управления. Координация настроек, усиление стабилизации АРВ при этом может быть выполнена независимо с целью некоторого (в большинстве случаев незначительного, как будет показано далее) расширения области устойчивости.

Для решения указанных задач использовалось специализированное программное обеспечение (Matlab, Mathcad, DoRegim), предназначенное для исследования динамических свойств объединенных энергосистем и позволяющее выполнить расчет собственных чисел матрицы коэффициентов

системы уравнений, которые характеризуют частоты и затухания маловозмущенного свободного движения эквивалентных генераторов [71].

В этой главе осуществляется поиск критериев, основанных на демпферных свойствах различных моделей энергосистем, формулируются некоторые обобщенные критерии, основанные на применении упрощенных математических моделей синхронных машин. Предлагаемые критерии позволяют достоверно определять область потенциально устойчивых, легко стабилизируемых в колебательном отношении режимов.

### **3.1 Исследование устойчивости объединенных энергосистем цепочечной структуры**

В этом разделе рассматриваются схемы цепочечной структуры с различным соотношением установленных мощностей [63, 64]. Производится качественная оценка влияния демпферных моментов на устойчивость рассматриваемой энергосистемы вблизи границы области апериодической устойчивости [28]. Исследование устойчивости выполняется при проведении численного анализа характера изменения корней, отвечающих электромеханическому движению при последовательном утяжелении режима работы электропередачи вплоть до предельного по условиям сходимости.

Компьютерные исследования проводились применительно к расчетным схемам электропередачи, содержащим три ( $G_1, G_2, G_3$ ) или пять ( $G_1, G_2, G_3, G_4$  и  $G_5$ ) эквивалентных энергосистем. Направление потока обменной мощности задавалось снижением объема генерации в приемной части ОЭС при сбалансированной нагрузке промежуточных эквивалентных энергосистем ( $G_2$  и др.). На рисунках 3.1, 3.4, 3.9, 3.15 представлены режимы, соответствующие предельным по условиям сходимости, все параметры указаны в приведенных единицах по отношению к базисной мощности  $S_{\text{баз}}=10000$  МВА. Справочные данные о параметрах эквивалентных

генераторов:  $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,85$ ;  $x_d = x_q = 2,00$ ;  $x_s = 0,13$ ;  $x_{fs} = 0,16$ ;  $x_{srd} = 0,17$ ;  $x_{srq} = 0,08$ ;  $x'_d = 0,28$ ;  $x''_d = x''_q = 0,21$ ;  $T_J = 5,95$  с;  $T_{d0} = 7,00$  с;  $T_{rd} = 0,50$  с;  $T_{rq} = 0,50$  с.

Параметры систем возбуждения с АРВ-ПД принимались равными:  $k_{0u} = 20$  ед.возб.ном./ед.напр.стат.;  $k_{0c} = 2,0$  дел.;  $T_B = 0,3$  с;  $T_{oc} = 0,1$  с. Средневзвешенные настройки АРВ-СД были приняты соответственно:  $k_{0u} = 50$  ед.возб.ном./ед.напр.стат.;  $k_{1u} = 5,0$  дел.;  $k_{0\omega} = 2,0$  дел.;  $k_{1\omega} = 5,0$  дел.;  $k_{1if} = 2,0$  дел. Максимальные значения коэффициентов усиления каналов стабилизации по производной напряжения  $k_{1u}$ , отклонению частоты  $k_{0\omega}$ , производной частоты  $k_{1\omega}$ , и производной тока возбуждения  $k_{1if}$ , соответствовали конечному десятому делению ( $k_{1u} = 0 \dots 7,2$  ед.возб.ном./ед.напр.стат.·с);  $k_{0\omega} = 0 \dots 2,3$  ед.возб.ном./рад/с);  $k_{1\omega} = 0 \dots 0,88$  ед.возб.ном./рад/с<sup>2</sup>);  $k_{1if} = 0 \dots 2$  ед.возб.ном./ед.тока.возб.).

Во всех режимах нагрузка моделировалась шунтами постоянной проводимости с нормированным коэффициентом мощности  $\cos\varphi_{\text{норм}} = 0,92 \dots 0,93$ . Для упрощенного представления генераторов использовались позиционная модель  $\psi_f = \text{const}$  и модель без АРВ  $U_f = \text{const}$ . Поиск структурных критериев осуществлялся сопоставлением границ области устойчивости, полученных при использовании упрощенных и полных моделей со средневзвешенными (неоптимальными) настройками АРВ-ПД и АРВ-СД.

### **3.2.1 Исследование статической устойчивости цепочечной электропередачи объединенной энергосистемы с тремя эквивалентными генераторами**

Обобщение искомым критериев для цепочечных ОЭС проводилось в результате анализа типовых структурных схем с протяженными межсистемными связями (рисунок 3.1, 3.4) при вариации их жесткости и

установленных мощностей эквивалентных энергосистем. На рисунке 3.1 избыточной является энергосистема, представленная эквивалентным генератором Г3, промежуточная энергосистема (Г2) полагается сбалансированной. Обменная мощность в ОЭС задавалась от избыточной части (узлы 103-503, рисунок 3.1) в направлении дефицитной части (узлы 101-501, рисунок 3.1). Установленные мощности эквивалентов ЭС на рисунке 3.1 были приняты соответственно  $P^{(Г1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(Г2)} = P^{(Г3)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$  (в примечании к рисунку 3.1 указаны возможные вариации установленных мощностей эквивалентов энергообъединений).

В таблицах 3.1, 3.2 и 3.3 приведены рассчитанные с помощью программного обеспечения собственные числа матрицы коэффициентов системы линеаризованных дифференциальных уравнений электромеханических переходных процессов при утяжелении режима работы энергосистемы с одноцепными связями и различном представлении в осях  $q$ ,  $d$  демпферных систем эквивалентных генераторов. Вариация демпферных контуров осуществлялась в ходе исследования для последующего выбора соответствующей упрощенной (наиболее характерной из группы нерегулируемых) модели при постоянстве потокосцеплений и постоянстве напряжений. Окончательный выбор модели, отвечающей условиям наибольшей близости в окрестности максимума угловой характеристики и отождествляющей соответствующий структурный критерий устойчивости, производился на основе сопоставления результатов расчета корней при всевозможных сочетаниях демпферных контуров синхронных машин эквивалентных энергосистем.

Нарушение устойчивости при утяжелении режима в позиционной модели (постоянство потокосцеплений контуров ротора,  $\psi_f = \text{const}$ ) имеет апериодический характер и сопровождается распадом пары комплексно-сопряженных корней на два действительных корня ( $\alpha_1 = +0,688$ ;  $\alpha_2 = -0,688$ , таблица 3.1). При представлении генераторов без АРВ (нерегулируемая модель,  $U_f = \text{const}$ ) независимо (см. столбец “ $U_f = \text{const}$  без д.к.” таблицы 3.1)

от параметров демпферных контуров исследуемой системы (учет успокоительных обмоток по продольной  $d$  и поперечной  $q$  осям) нарушение устойчивости сопровождается образованием колебательной пары (например,  $\alpha_{1,2} = +0,154 \pm j0,175$  и др., таблица 3.1). Учет в нерегулируемой модели ( $U_f = \text{const}$ ) демпферных контуров только по поперечной оси ( $x_{srd} = \infty$ ) или демпферных контуров по обеим  $q, d$  осям работа ЭЭС характеризуется наличием корней с положительной вещественной частью даже при нулевом значении обменной активной мощности ( $\alpha_{1,2} = +0,065 \pm j0,577$  и др., см. столбцы “ $U_f = \text{const}$  д.к. в оси  $q$ ” и “ $U_f = \text{const}$  д.к. в осях  $q, d$ ”, таблица 3.1).

Следует отметить, что при оснащении генераторов АРВ-СД система является стабилизируемой (см. строка “ $U_f = \text{const}$  без д.к.”, таблица 3.2) в области режимов, где указанная ранее нерегулируемая модель ( $U_f = \text{const}$ ) ЭЭС с демпферными обмотками только в поперечной или в обеих осях  $q, d$  являлась неустойчивой (см. столбцы в этой же строке “ $U_f = \text{const}$  без д.к.”, таблица 3.1). Аналогичный характер изменения корней наблюдается во всех расчетных схемах. С учетом этого следует заключить об используемых в дальнейших исследованиях упрощенных моделях ЭЭС. Это позиционные модели ЭЭС при постоянстве потокосцеплений всех обмоток ротора ( $\psi_f = \text{const}$ ) и нерегулируемые модели ( $U_f = \text{const}$ ) без демпферных контуров. В этой связи в таблицах результатов в дальнейшем будут представлены только эти две указанные упрощенные модели, а также полные модели с АРВ.

Обобщение характерных, структурных признаков нарушения устойчивости производилось при сопоставлении результатов, полученных при использовании упрощенных и полных моделей со средневзвешенными или максимальными настройками автоматических регуляторов возбуждения без их оптимизации (см. таблицы 3.3, 3.4 и 3.5, где в первом столбце в скобках указана модель ЭЭС, для которой обменная мощность и угол электропередачи являются предельными).

Предельный режим, определенный по условиям сходимости, в эквивалентной трехмашинной схеме электропередачи располагается в области углов  $92..121^\circ$  ( $119,48^\circ$  рисунок 3.2;  $120,62^\circ$  рисунок 3.3;  $117,02^\circ$  рисунок 3.5;  $92,63^\circ$  рисунок 3.6;  $115,70^\circ$  рисунок 3.7;  $92,26^\circ$  рисунок 3.8).

Область устойчивости, определенная с помощью позиционной модели ( $\psi_f = \text{const}$ ) в трехмашинной схеме при двукратном ( $P_{ном}^{(\Gamma 1)} = P_{ном}^{(\Gamma 2)} = 0,5 \cdot S_{баз}$ ;  $P_{ном}^{(\Gamma 3)} = S_{баз}$ ) и четырехкратном ( $P_{ном}^{(\Gamma 1)} = 0,25 \cdot S_{баз}$ ;  $P_{ном}^{(\Gamma 2)} = 0,5 \cdot S_{баз}$ ;  $P_{ном}^{(\Gamma 3)} = S_{баз}$ ) соотношении установленных мощностей передающей и приемной частей ОЭС, включает в себя предельный по условиям сходимости режим, а ее граница располагается относительно него в некотором (невозможно определить расчетным способом) отдалении и поэтому не указана на рисунках 3.5 - 3.8.

При сниженной установленной мощности приемной части ( $P_{ном}^{(\Gamma 1)} = 0,25 \cdot S_{баз}$ ;  $P_{ном}^{(\Gamma 2)} = P_{ном}^{(\Gamma 3)} = 0,5 \cdot S_{баз}$ ) так же, как и для эквивалентной схемы содержащей энергообъединения соизмеримых установленных мощностей ( $P_{ном}^{(\Gamma 1)} = P_{ном}^{(\Gamma 2)} = P_{ном}^{(\Gamma 3)} = 0,5 \cdot S_{баз}$ ), граница области потенциально устойчивых режимов, определенная с помощью позиционной модели ( $\psi_f = \text{const}$ ) находится вблизи максимума угловой характеристики и отвечает запасам до 1% (таблица 3.3; рисунки 3.2, 3.3).

Нарушение устойчивости при представлении эквивалентных генераторов без АРВ ( $U_f = \text{const}$ ) и одноцепном исполнении межсистемной

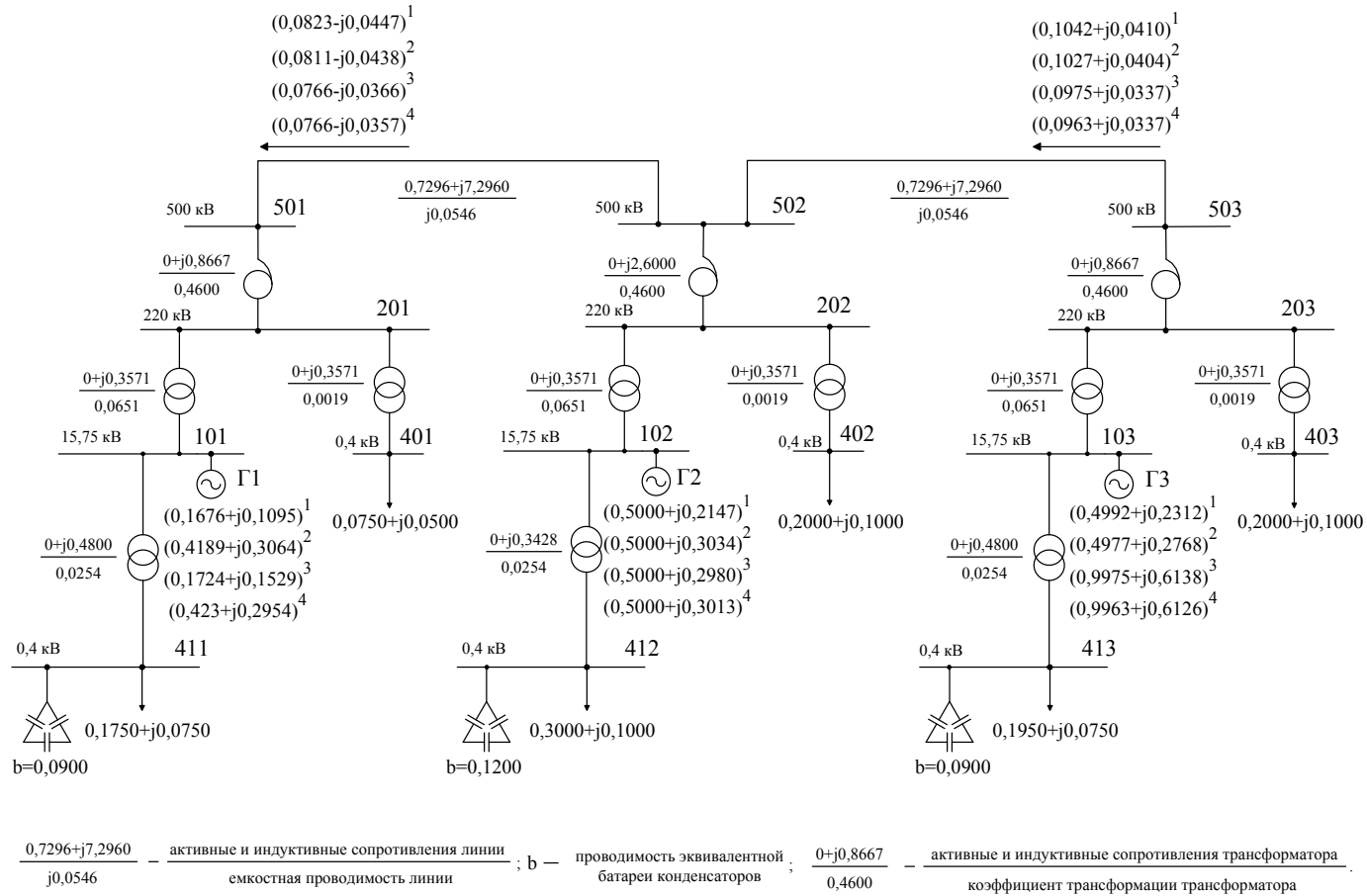


Рисунок 3.1 – Расчетная схема рассматриваемой энергосистемы при различных соотношениях установленной мощности приемной и передающей частей ЭЭС

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 3.1 – Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения в позиционной ( $\psi_f = \text{const}$ ) и нерегулируемой ( $U_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС при  $P_{\text{ном}}^{(\Gamma 1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P_{\text{ном}}^{(\Gamma 2)} = P_{\text{ном}}^{(\Gamma 3)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$

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 ЭЭС $U_f = \text{const}$			
			без д.к. ( $x_{srd} = \infty$ ; $x_{srq} = \infty$ )	д.к. в оси $d$ ( $x_{srq} = \infty$ )	д.к. в оси $q$ ( $x_{srd} = \infty$ )	д.к. в осях $q, d$
0,98 / 119,48° (пределный по сходимости)	1,99	<b>+0,688; -0,688</b> 0±j0,469	<b>+0,472±j0,125</b> -0,121±j0,468	<b>+0,439±j0,120</b> -0,134±j0,472	<b>+0,556±j0,116</b> -0,078±j0,474	<b>+0,573±j0,110</b> -0,083±j0,478
0,99 / 116,43° ( $\psi_f = \text{const}$ )*	1,30	0±j0,007 0±j0,484	<b>+0,364±j0,140</b> -0,117±j0,482	<b>+0,383±j0,136</b> -0,131±j0,486	<b>+0,459±j0,132</b> -0,066±j0,486	<b>+0,475±j0,128</b> -0,072±j0,491
1,00 / 110,79° (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,40	0±j0,149 0±j0,510	<b>+0,160±j0,174</b> -0,113±j0,509	<b>+0,173±j0,171</b> -0,128±j0,513	<b>+0,280±j0,168</b> -0,044±j0,510	<b>+0,292±j0,165</b> -0,051±j0,514
1,00 / 110,63° (АРВ-СД со средневзв. настройками)*	0,38	0±j0,151 0±j0,511	<b>+0,154±j0,175</b> -0,113±j0,510	<b>+0,167±j0,173</b> -0,128±j0,514	<b>+0,275±j0,169</b> -0,043±j0,511	<b>+0,287±j0,166</b> -0,050±j0,515
1,00 / 105,09° ( $U_f = \text{const}$ без д.к.)*	0,01	0±j0,212 0±j0,537	-0,001±j0,217 -0,110±j0,535	<b>+0,007±j0,217</b> -0,127±j0,540	<b>+0,142±j0,210</b> -0,023±j0,533	<b>+0,151±j0,209</b> -0,031±j0,538
1,00 / 104,76° ( $U_f = \text{const}$ д.к. в оси $d$ )*	0,01	0±j0,215 0±j0,538	-0,007±j0,220 -0,110±j0,537	-0,001±j0,220 -0,127±j0,542	<b>+0,136±j0,212</b> -0,022±j0,535	<b>+0,145±j0,212</b> -0,030±j0,539
0,92 / 74,34°	8,00	0±j0,418 0±j0,662	-0,182±j0,417 -0,117±j0,661	-0,192±j0,423 -0,144±j0,667	<b>+0,008±j0,401</b> <b>+0,062±j0,642</b>	<b>+0,010±j0,406</b> <b>+0,049±j0,648</b>
0,80 / 57,88°	20,00	0±j0,492 0±j0,716	-0,189±j0,492 -0,131±j0,715	-0,207±j0,499 -0,166±j0,723	<b>+0,027±j0,471</b> <b>+0,098±j0,686</b>	<b>+0,023±j0,477</b> <b>+0,082±j0,693</b>
0,70 / 47,88°	30,00	0±j0,528 0±j0,743	-0,187±j0,528 -0,140±j0,742	-0,210±j0,535 -0,181±j0,751	<b>+0,041±j0,505</b> <b>+0,117±j0,707</b>	<b>+0,034±j0,511</b> <b>+0,097±j0,715</b>
0,50 / 31,85°	50,00	0±j0,573 0±j0,772	-0,182±j0,572 -0,158±j0,772	-0,210±j0,580 -0,207±j0,782	<b>+0,060±j0,545</b> <b>+0,131±j0,729</b>	<b>+0,050±j0,553</b> <b>+0,108±j0,739</b>
0,25 / 15,22°	75,00	0±j0,599 0±j0,778	-0,174±j0,599 -0,177±j0,778	-0,204±j0,607 -0,232±j0,790	<b>+0,071±j0,570</b> <b>+0,113±j0,735</b>	<b>+0,060±j0,578</b> <b>+0,086±j0,746</b>
0,00 / 0,17°	100,00	0±j0,605 0±j0,760	-0,167±j0,604 -0,193±j0,760	-0,197±j0,612 -0,251±j0,772	<b>+0,065±j0,577</b> <b>+0,062±j0,725</b>	<b>+0,053±j0,584</b> <b>+0,032±j0,736</b>

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

Таблица 3.2 – Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения ЭЭС при средневзвешенных настройках АРВ-СД при  $P_{ном}^{(\Gamma 1)} = 0,25 \cdot S_{баз}$ ;  $P_{ном}^{(\Gamma 2)} = P_{ном}^{(\Gamma 3)} = 0,5 \cdot S_{баз}$

Обменная мощность в сечении 501 - 502, о.е./ угол электропередачи $\gamma_{503-501}$ , градус	Запас мощности в сечении 501 - 502, %	Г1, Г2, Г3 с АРВ-СД (со средневзв. настройками)			
		без д.к. ( $x_{srd} = \infty$ ; $x_{srq} = \infty$ )	д.к. в оси $d$ ( $x_{srq} = \infty$ )	д.к. в оси $q$ ( $x_{srd} = \infty$ )	д.к. в осях $q, d$
0,98 / 119,48° (предельный по сходимости)	1,99	<b>+0,857; -0,624</b> -0,387±j0,346	<b>+0,858; -0,624</b> -0,397±j0,343	<b>+0,858; -0,624</b> -0,423±j0,347	<b>+0,859; -0,624</b> -0,436±j0,345
0,99 / 116,43° ( $\psi_f = \text{const}$ )*	1,30	<b>+0,683; -0,539</b> -0,396±j0,355	<b>+0,683; -0,539</b> -0,407±j0,352	<b>+0,684; -0,539</b> -0,436±j0,357	<b>+0,685; -0,539</b> -0,449±j0,354
1,00 / 110,79° (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,40	<b>+0,101; -0,115</b> -0,414±j0,371	<b>+0,101; -0,115</b> -0,427±j0,368	<b>+0,101; -0,115</b> -0,460±j0,373	<b>+0,101; -0,116</b> -0,476±j0,370
1,00 / 110,63° (АРВ-СД со средневзв. настройками)*	0,38	<b>+0,006; -0,022</b> -0,415±j0,372	<b>+0,004±j0,001</b> -0,427±j0,368	<b>+0,008±j0,002</b> -0,461±j0,374	-0,013±j0,001 -0,476±j0,371
1,00 / 105,09° ( $U_f = \text{const}$ без д.к.)*	0,01	-0,079±j0,102 -0,433±j0,387	-0,080±j0,102 -0,446±j0,383	-0,080±j0,102 -0,486±j0,390	-0,081±j0,102 -0,503±j0,386
1,00 / 104,76° ( $U_f = \text{const}$ д.к. в оси $d$ )*	0,01	-0,083±j0,105 -0,434±j0,388	-0,083±j0,105 -0,448±j0,384	-0,084±j0,105 -0,487±j0,391	-0,085±j0,105 -0,505±j0,387
0,92 / 74,34°	8,00	-0,296±j0,287 -0,526±j0,460	-0,302±j0,285 -0,548±j0,453	-0,312±j0,288 -0,626±j0,464	-0,320±j0,287 -0,656±j0,457
0,80 / 57,88°	20,00	-0,360±j0,346 -0,571±j0,489	-0,370±j0,343 -0,598±j0,480	-0,384±j0,349 -0,691±j0,495	-0,397±j0,346 -0,729±j0,485
0,70 / 47,88°	30,00	-0,390±j0,374 -0,596±j0,504	-0,402±j0,371 -0,625±j0,495	-0,419±j0,377 -0,723±j0,510	-0,434±j0,374 -0,764±j0,500
0,50 / 31,85°	50,00	-0,425±j0,407 -0,628±j0,525	-0,440±j0,403 -0,661±j0,514	-0,459±j0,410 -0,751±j0,531	-0,478±j0,406 -0,797±j0,520
0,25 / 15,22°	75,00	-0,443±j0,428 -0,645±j0,542	-0,460±j0,423 -0,681±j0,531	-0,483±j0,431 -0,748±j0,547	-0,504±j0,426 -0,795±j0,535
0,00 / 0,17°	100,00	-0,445±j0,435 -0,640±j0,552	-0,462±j0,430 -0,675±j0,542	-0,491±j0,438 -0,719±j0,555	-0,512±j0,433 -0,763±j0,544

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

Таблица 3.3 – Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения различных моделей ЭЭС

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 ЭЭС $U_f = \text{const}$		АРВ-ПД д.к. в осях $q, d$	АРВ-СД (со средневзв. настройками) д.к. в осях $q, d$	АРВ-СД (с макс. настройками) д.к. в осях $q, d$
			без д.к. ( $x_{srq} = \infty; x_{srq} = \infty$ )	д.к. в оси $d$ ( $x_{srq} = \infty$ )			
$P_{\text{ном}}^{(\Gamma 1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}; P_{\text{ном}}^{(\Gamma 2)} = P_{\text{ном}}^{(\Gamma 3)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$							
0,98 / 119,48° (предельный по сходимости)	1,99	<b>+0,688;-0,688</b> 0±j0,469	<b>+0,472±j0,125</b> -0,121±j0,468	<b>+0,493±j0,120</b> -0,134±j0,472	<b>+1,056;-1,294</b> -0,239±j,480	<b>+0,859;-0,624</b> -0,436±j0,345	<b>+0,580;-0,411</b> -0,760±j0,198
0,99 / 116,43° ( $\psi_f = \text{const}$ )*	1,30	0±j0,007 0±j0,484	<b>+0,364±j0,140</b> -0,117±j0,482	<b>+0,383±j0,136</b> -0,131±j0,486	<b>+0,843;-1,057</b> -0,191±j0,494	<b>+0,685;-0,539</b> -0,449±j0,354	<b>+0,452;-0,349</b> -0,804±j0,205
1,00 / 110,79° (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,40	0±j0,149 0±j0,510	<b>+0,160±j0,174</b> -0,113±j0,509	<b>+0,173±j0,171</b> -0,128±j0,513	<b>+0,131;-0,309</b> -0,122±j0,520	<b>+0,101;-0,116</b> -0,476±j0,370	-0,003±j0,001 -0,887±j0,217
1,00 / 110,63° (АРВ-СД со средневзв. настройками)*	0,38	0±j0,151 0±j0,511	<b>+0,154±j0,175</b> -0,113±j0,510	<b>+0,167±j0,173</b> -0,128±j0,514	<b>+0,044±j0,363</b> -0,120±j0,520	-0,013±j0,001 -0,476±j0,371	-0,004±j0,001 -0,887±j0,218
1,00 / 105,09° ( $U_f = \text{const}$ без д.к.)*	0,01	0±j0,212 0±j0,537	-0,001±j0,217 -0,110±j0,535	<b>+0,007±j0,217</b> -0,127±j0,540	<b>+0,013±j0,361</b> -0,074±j0,545	-0,081±j0,102 -0,503±j0,386	-0,080±j0,065 -0,970±j0,230
1,00 / 104,76° ( $U_f = \text{const}$ д.к. в оси $d$ )*	0,01	0±j0,215 0±j0,538	-0,007±j0,220 -0,110±j0,537	-0,001±j0,220 -0,127±j0,541	<b>+0,012±j0,361</b> -0,072±j0,547	-0,085±j0,105 -0,505±j0,387	-0,084±j0,066 -0,975±j0,231
$P_{\text{ном}}^{(\Gamma 1)} = P_{\text{ном}}^{(\Gamma 2)} = P_{\text{ном}}^{(\Gamma 3)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$							
0,98 / 120,62° (предельный по сходимости)	2,07	<b>+1,316;-1,316</b> 0±j0,394	<b>+0,765±j0,034</b> -0,206±j0,395	<b>+0,710;-0,352</b> -0,214±j0,400	<b>+1,120;-1,204</b> -0,513±j0,395	<b>+0,718;-0,521</b> -0,346±j0,308	<b>+0,480;-0,335</b> -0,563±j0,176
1,00 / 112,01° (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,47	<b>+0,823;-0,823</b> 0±j0,433	<b>+0,528±j0,072</b> -0,186±j0,433	<b>+0,532±j0,065</b> -0,199±j0,439	<b>+0,112±j0,036</b> -0,288±j0,418	<b>+0,010±j0,031</b> -0,379±j0,334	-0,001±j0,022 -0,667±j0,192
1,00 / 110,95° (АРВ-СД со средневзв. настройками)*	0,35	<b>+0,738;-0,738</b> 0±j0,438	<b>+0,494±j0,075</b> -0,185±j0,438	<b>+0,497±j0,070</b> -0,197±j0,443	<b>+0,176±j0,057</b> -0,260±j0,423	-0,001±j0,049 -0,383±j0,337	-0,009±j0,032 -0,681±j0,194
1,00 / 106,62° ( $\psi_f = \text{const}$ )*	0,04	0±j0,001 0±j0,456	<b>+0,328±j0,090</b> -0,178±j0,456	<b>+0,326±j0,087</b> -0,193±j0,462	<b>+0,229±j0,121</b> -0,180±j0,445	-0,040±j0,092 -0,399±j0,349	-0,047±j0,059 -0,735±j0,202
1,00/101,05° ( $U_f = \text{const}$ д.к. в оси $d$ )*	0,09	0±j0,135 0±j0,479	<b>+0,009±j0,126</b> -0,172±j0,478	-0,001±j0,126 -0,188 ±j0,484	<b>+0,247±j0,164</b> -0,126±j0,471	-0,087±j0,130 -0,419±j0,364	-0,098±j0,081 -0,804±j0,213
1,00 / 100,86° ( $U_f = \text{const}$ без д.к.)*	0,10	0±j0,137 0±j0,479	-0,001±j0,128 -0,171±j0,479	-0,009±j0,129 -0,188±j0,485	<b>+0,247±j0,165</b> -0,125±j0,472	-0,089±j0,131 -0,420±j0,364	-0,100±j0,082 -0,806±j0,213

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

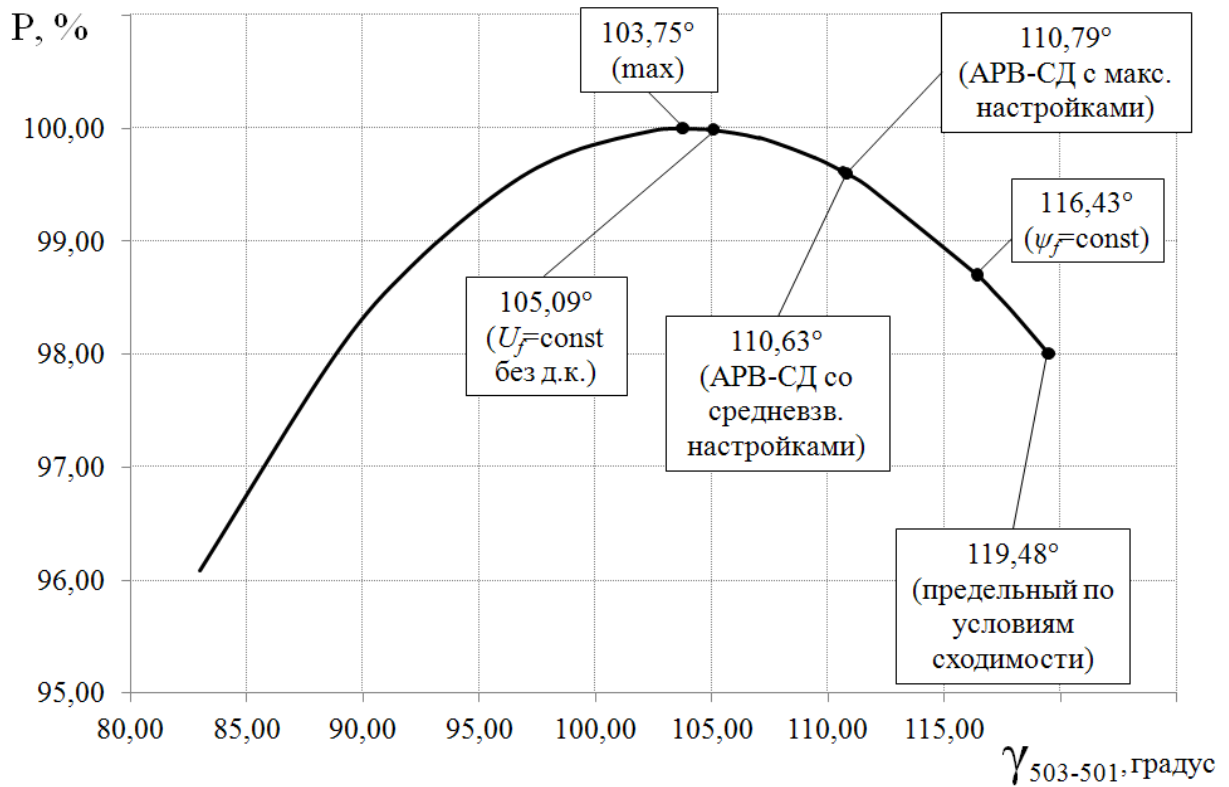


Рисунок 3.2 – Угловая характеристика одноцепной электропередачи при сниженной установленной мощности приемной и передающей частей ОЭС  $P_{ном}^{(\Gamma 1)} = 0,25 \cdot S_{баз}$ ;

$$P_{ном}^{(\Gamma 2)} = P_{ном}^{(\Gamma 3)} = 0,5 \cdot S_{баз}$$

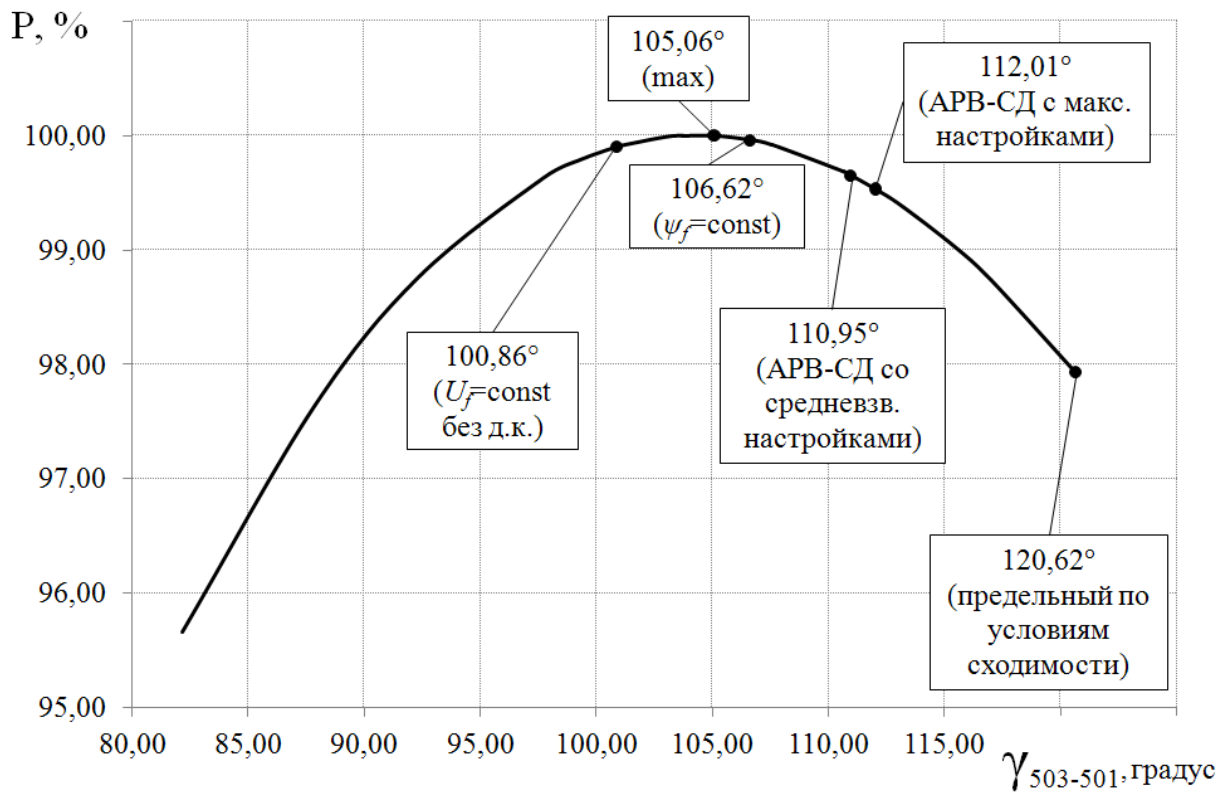


Рисунок 3.3 – Угловая характеристика одноцепной электропередачи при соизмеримых установленных мощностях приемной и передающей частей ОЭС

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

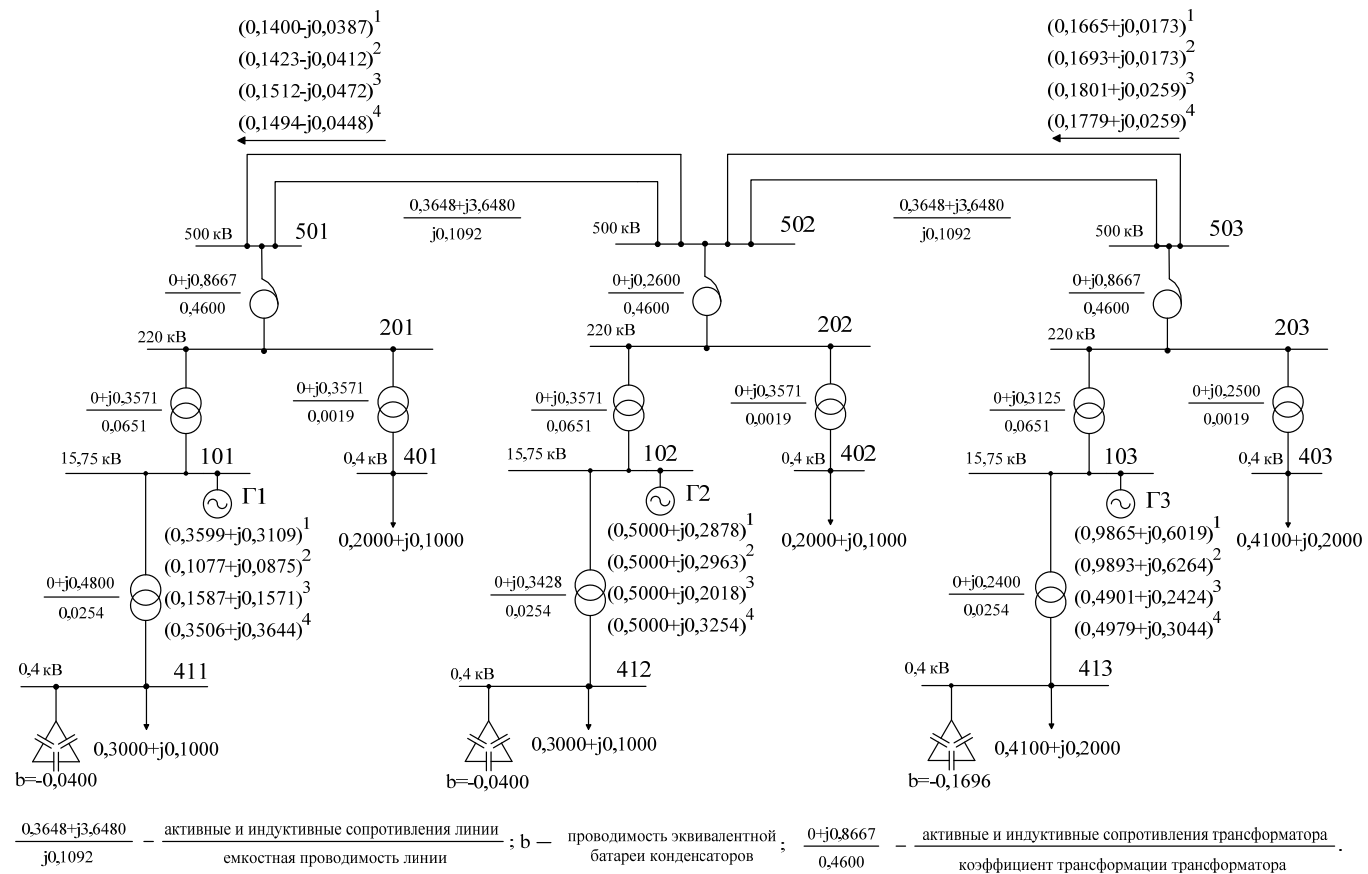


Рисунок 3.4 – Расчетная схема рассматриваемой энергосистемы при различных соотношениях установленной мощности приемной и передающей частей ЭЭС

Примечание:

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

Таблица 3.4 – Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения различных моделей ЭЭС

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

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 ЭЭС $U_f = \text{const}$		АРВ-ПД д.к. в осях $q, d$	АРВ-СД (со средневзв. настройками) д.к. в осях $q, d$	АРВ-СД (с макс. настройками) д.к. в осях $q, d$
			без д.к. ( $x_{srd} = \infty ; x_{srq} = \infty$ )	д.к. в оси $d$ ( $x_{srq} = \infty$ )			
одноцепное исполнение ( $Z_{\text{Л}} = 0,7296+j7,2960$ о.е.)							
0,98 / 117,02° (пределный по сходимости)	1,76	0±j0,195 0±j0,411	<b>+0,380±j0,216</b> -0,224±j0,414	<b>+0,380±j0,210</b> -0,231±j0,420	<b>+0,359±j0,372</b> -0,437±j0,437	<b>+0,603;-0,496</b> -0,372±j0,314	<b>+0,398;-0,316</b> -0,597±j0,179
1,00 / 108,14° (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,24	0±j0,232 0±j0,443	<b>+0,221±j0,238</b> -0,200±j0,444	<b>+0,218±j0,234</b> -0,211±j0,451	<b>+0,271±j0,382</b> -0,332±j0,453	<b>+0,068;-0,092</b> -0,399±j0,334	-0,012±j0,001 -0,681±j0,191
1,00 / 107,97° (АРВ-СД со средневзв. настройками)*	0,22	0±j0,233 0±j0,444	<b>+0,218±j0,238</b> -0,199±j0,445	<b>+0,215±j0,235</b> -0,211±j0,451	<b>+0,269±j0,383</b> -0,329±j0,453	-0,020±j0,001 -0,399±j0,335	-0,011±j0,008 -0,683±j0,191
0,98 / 89,68° ( $U_f = \text{const}$ д.к. в оси $d$ )*	1,65	0±j0,290 0±j0,508	<b>+0,003±j0,288</b> -0,168±j0,507	-0,001±j0,288 -0,186±j0,514	<b>+0,078±j0,386</b> -0,108±j0,506	-0,127±j0,133 -0,456±j0,374	-0,120±j0,082 -0,870±j0,219
0,98 / 89,27° ( $U_f = \text{const}$ без д.к.)*	1,75	0±j0,292 0±j0,509	-0,001±j0,290 -0,167±j0,509	-0,003±j0,290 -0,186±j0,515	<b>+0,075±j0,386</b> -0,105±j0,508	-0,129±j0,135 -0,458±j0,375	-0,123±j0,083 -0,875±j0,220
двухцепное исполнение ( $Z_{\text{Л}} = 0,3648+j3,6480$ о.е.)							
0,99 / 92,63° (пределный по сходимости)	1,06	0±j0,167 0±j0,529	<b>+0,390±j0,208</b> -0,165±j0,529	<b>+0,403±j0,202</b> -0,185±j0,535	<b>+0,106±j0,376</b> -0,199±j0,530	<b>+0,590;-0,492</b> -0,512±j0,416	<b>+0,373;-0,312</b> -1,110±j0,256
1,00 / 88,76° (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,39	0±j0,205 0±j0,547	<b>+0,277±j0,226</b> -0,158±j0,546	<b>+0,286±j0,221</b> -0,180±j0,553	<b>+0,078±j0,375</b> -0,161±j0,549	<b>+0,144;-0,162</b> -0,531±j0,427	-0,001±j0,002 -1,166±j0,268
1,00 / 88,43° (АРВ-СД со средневзв. настройками)	0,35	0±j0,208 0±j0,548	<b>+0,268±j0,227</b> -0,158±j0,547	<b>+0,276±j0,223</b> -0,180±j0,554	<b>+0,076±j0,375</b> -0,159±j0,550	-0,016±j0,002 -0,533±j0,427	-0,021±j0,016 -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	<b>+0,001±j0,313</b> -0,144±j0,604	-0,001±j0,313 -0,171±j0,610	<b>+0,045±j0,384</b> -0,086±j0,607	-0,179±j0,175 -0,601±j0,463	-0,203±j0,106 -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 -0,144±j0,604	-0,001±j0,313 -0,171±j0,610	<b>+0,045±j0,384</b> -0,086±j0,607	-0,179±j0,175 -0,601±j0,463	-0,203±j0,106 -1,332±j0,308

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

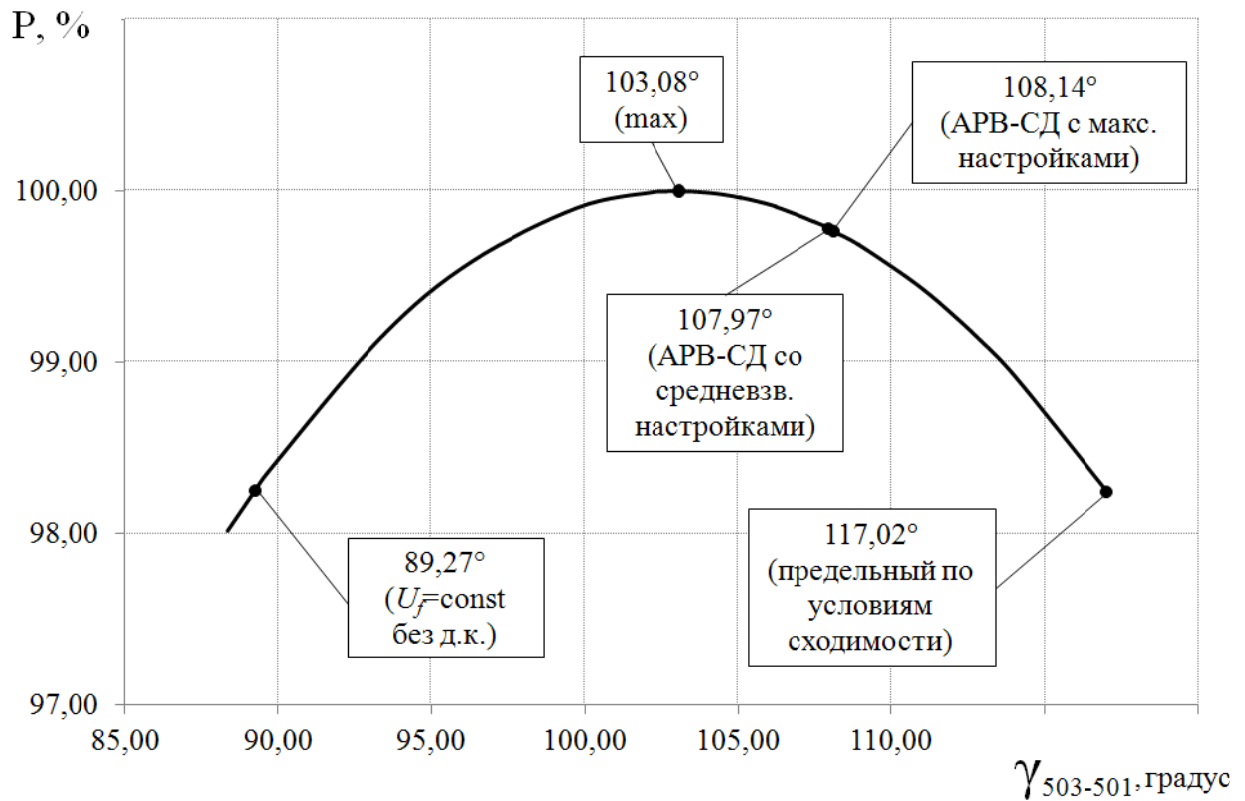


Рисунок 3.5 – Угловая характеристика одноцепной электропередачи при увеличенной установленной мощности передающей части ОЭС  $P_{ном}^{(\Gamma 1)} = P_{ном}^{(\Gamma 2)} = 0,5 \cdot S_{баз}$ ;  $P_{ном}^{(\Gamma 3)} = S_{баз}$

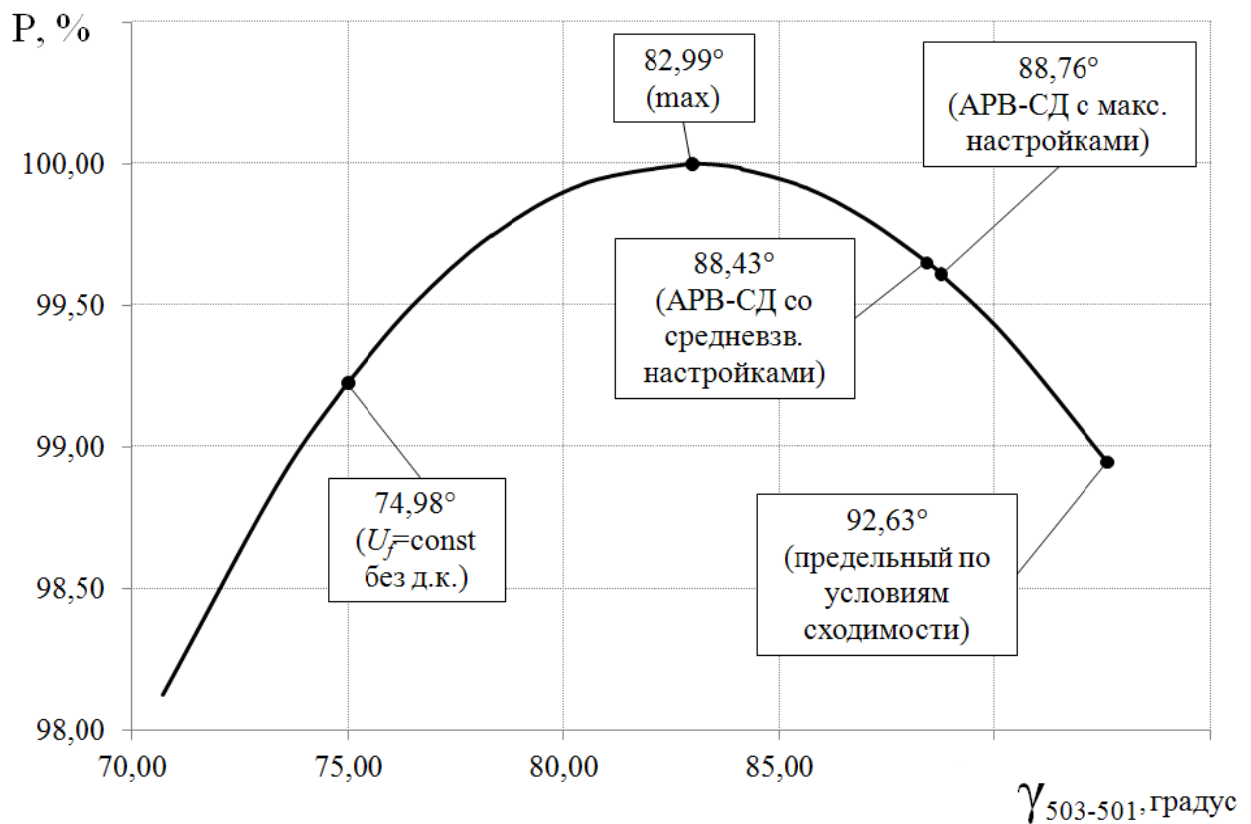


Рисунок 3.6 – Угловая характеристика двухцепной электропередачи при увеличенной установленной мощности передающей части ОЭС  $P_{ном}^{(\Gamma 1)} = P_{ном}^{(\Gamma 2)} = 0,5 \cdot S_{баз}$ ;  $P_{ном}^{(\Gamma 3)} = S_{баз}$

Таблица 3.5 – Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения упрощенных и полных

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

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 ЭЭС $U_f = \text{const}$		АРВ-ПД д.к. в осях $q, d$	АРВ-СД (со средневзв. настройками) д.к. в осях $q, d$	АРВ-СД (с макс. настройками) д.к. в осях $q, d$
			без д.к. ( $x_{srd} = \infty; x_{srq} = \infty$ )	д.к. в оси $d$ ( $x_{srq} = \infty$ )			
одноцепное исполнение ( $Z_{л} = 0,7296+j7,2960$ о.е.)							
0,98 / 115,70° (предельный по сходимости)	1,70	0±j0,222 0±j0,502	<b>+0,270±j0,242</b> -0,111±j0,501	<b>+0,281±j0,237</b> -0,124±j0,505	<b>+0,129±0,390</b> -0,161±j0,511	<b>+0,686;-0,564</b> -0,480±j0,365	<b>+0,454;-0,365</b> -0,891±j0,208
1,00 / 106,79° (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,19	0±j0,267 0±j0,532	<b>+0,132±j0,274</b> -0,105±j0,531	<b>+0,139±j0,271</b> -0,120±j0,535	<b>+0,093±0,392</b> -0,105±j0,541	<b>+0,075;-0,131</b> -0,513±j0,385	-0,004±j0,001 -1,006±j0,224
1,00 / 106,56° (АРВ-СД со средневзв. настройками)*	0,17	0±j0,268 0±j0,533	<b>+0,129±j0,275</b> -0,105±j0,531	<b>+0,135±j0,272</b> -0,119±j0,536	<b>+0,092±j0,392</b> -0,103±j0,542	-0,031±j0,001 -0,514±j0,386	-0,025±j0,010 -1,009±j0,224
0,99 / 93,86° ( $U_f = \text{const}$ без д.к.)*	0,67	0±j0,318 0±j0,578	-0,001±j0,318 -0,100±j0,577	<b>+0,001±j0,318</b> -0,118±j0,582	<b>+0,060±j0,396</b> -0,048±j0,587	-0,139±j0,128 -0,569±j0,415	-0,126±j0,079 -1,179±j0,252
0,99 / 93,70° ( $U_f = \text{const}$ д.к. в оси $d$ )*	0,70	0±j0,318 0±j0,579	-0,001±j0,319 -0,100±j0,578	-0,001±j0,319 -0,118±j0,582	<b>+0,060±j0,397</b> -0,047±j0,588	-0,140±j0,129 -0,570±j0,416	-0,128±j0,079 -1,181±j0,252
двухцепное исполнение ( $Z_{л} = 0,3648+j3,6480$ о.е.)							
0,99 / 92,26° (предельный по сходимости)	1,06	0±j0,275 0±j0,571	<b>+0,295±j0,298</b> -0,107±j0,570	<b>+0,318±j0,292</b> -0,125±j0,574	<b>+0,222±j0,410</b> -0,246±j0,605	<b>+0,780;-0,633</b> -0,650±j0,640	<b>+0,502;-0,419</b> -1,428±j0,311
1,00 / 87,20° (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,25	0±j0,317 0±j0,595	<b>+0,163±j0,327</b> -0,097±j0,594	<b>+0,178±j0,323</b> -0,116±j0,598	<b>+0,205±j0,415</b> -0,219±j0,632	<b>+0,162;-0,237</b> -0,695±j0,475	-0,001±j0,001 -1,499±j0,328
1,00 / 86,82° (АРВ-СД со средневзв. настройками)*	0,21	0±j0,320 0±j0,597	<b>+0,155±j0,329</b> -0,096±j0,596	<b>+0,169±j0,326</b> -0,115±j0,600	<b>+0,204±j0,415</b> -0,217±j0,634	-0,001±j0,001 -0,698±j0,476	-0,049±j0,019 -1,504±j0,329
1,00 / 78,26° ( $U_f = \text{const}$ без д.к.)*	0,23	0±j0,384 0±j0,638	-0,001±j0,385 -0,087±j0,673	<b>+0,004±j0,386</b> -0,107±j0,641	<b>+0,193±j0,431</b> -0,187±j0,679	-0,199±j0,159 -0,783±j0,500	-0,205±j0,098 -1,613±j0,354
1,00 / 78,01° ( $U_f = \text{const}$ д.к. в оси $d$ )*	0,26	0±j0,386 0±j0,639	-0,003±j0,387 -0,087±j0,638	-0,001±j0,387 -0,107±j0,642	<b>+0,193±j0,432</b> -0,186±j0,680	-0,203±j0,162 -0,786±j0,501	-0,210±j0,100 -1,617±j0,355

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



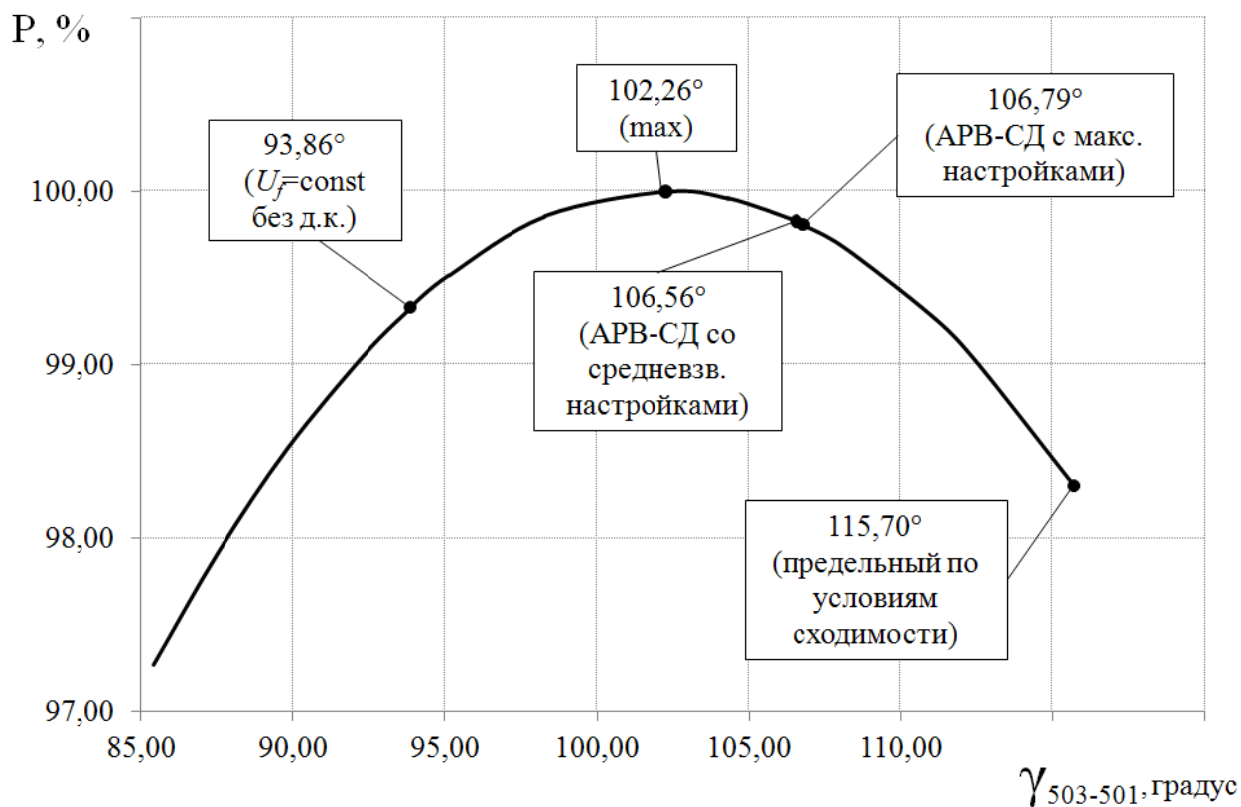


Рисунок 3.7 – Угловая характеристика одноцепной электропередачи при четырехкратном соотношении установленной мощности приемной и передающей частей ОЭС

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

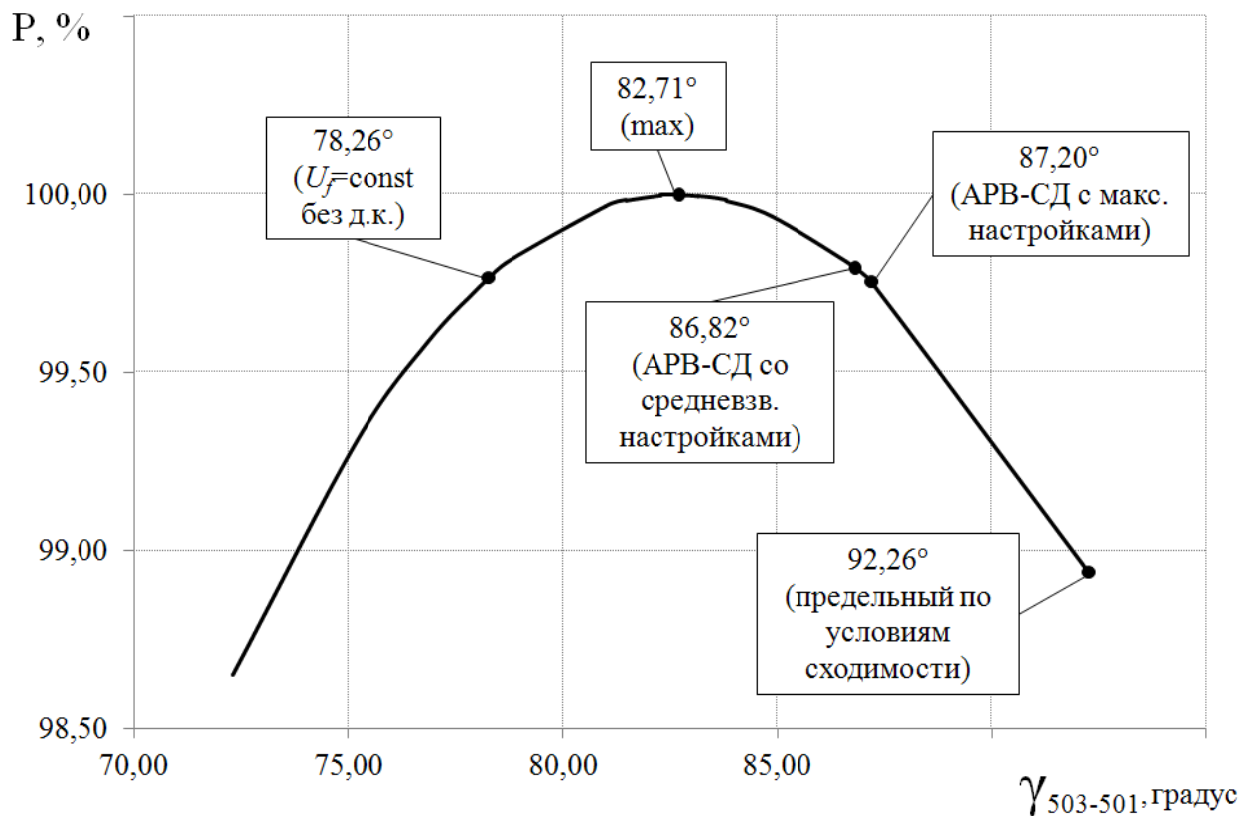


Рисунок 3.8 – Угловая характеристика двухцепной электропередачи при четырехкратном соотношении установленной мощности приемной и передающей частей ОЭС

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

связи сопровождается образованием колебательной пары (см. таблицы 3.3 - 3.5) в области углов около  $89^\circ..105^\circ$  ( $105,09^\circ$ ;  $100,86^\circ$ ;  $89,27^\circ$ ;  $93,86^\circ$  см. рисунки 3.2; 3.3; 3.5 и 3.7). При двухцепном исполнении предельные углы электропередачи отвечают значениям в интервале от  $75^\circ$  до  $78^\circ$  ( $74,98^\circ$  рисунок 3.6;  $78,26^\circ$  рисунок 3.8). Предельно допустимый режим для этой упрощенной модели ЭЭС также характеризуется запасом менее 1%, что не отвечает нормативным требованиям. Следует отметить, что применение автоматических регуляторов возбуждения пропорционального действия АРВ-ПД не позволяет обеспечить параллельную работу генераторов вблизи максимума угловой характеристики, поскольку относительное электромеханическое движение эквивалентных генераторов происходит с колебаниями и инкрементом около  $0,01 \text{ с}^{-1}$  (см. столбец “АРВ-ПД д.к. в осях  $q, d$ ”, таблица 3.3) и около  $0,2 \text{ с}^{-1}$  (см. этот же столбец в таблице 3.5).

Оснащение генераторов автоматическими регуляторами сильного действия (таблица 3.4, 3.5) позволяет расширить область устойчивых режимов почти до предельного по условиям сходимости (рисунки 3.5 - 3.8). Нарушение устойчивости энергосистемы с АРВ-СД происходит при углах  $108,14^\circ$  таблица 3.4;  $106,79^\circ$  таблица 3.5 (при двухцепном исполнении соответственно при  $88,76^\circ$  таблица 3.4 и  $87,20^\circ$  таблица 3.5) и имеет аperiodический характер (в частности,  $\alpha_1 = +0,454$ ,  $\alpha_2 = -0,365$ ; см. таблицу 3.5 столбец АРВ-СД с максимальными настройками при одноцепном исполнении электропередачи).

С учетом сказанного выше можно заключить, что определяющей в поиске границы области потенциально устойчивых режимов трехмашинной цепочечной схемы является структурная модель постоянства напряжения возбуждения ( $U_f = \text{const}$ ), поскольку позиционная система ( $\psi_f = \text{const}$ ) будет устойчива при углах электропередачи характеризующихся неустойчивым состоянием регулируемой ОЭС с интенсивным управлением возбуждением синхронных машин (АРВ-СД).

### ***3.2.2 Исследование статической устойчивости цепочечной электропередачи объединенной энергосистемы с пятью эквивалентными генераторами***

В настоящем разделе численный анализ корней, отвечающих электромеханическому движению, и сопоставительный анализ полученных областей устойчивых режимов выполняется аналогично предыдущему описанию задачи исследования устойчивости трехмашинных цепочечных схем на основе структурного подхода. Избыточная энергосистема представлена эквивалентным генератором Г5 (рисунок 3.9), энергосистемы Г2, Г3, Г4 полагались сбалансированными по генерации и потреблению электроэнергии, дефицитная энергосистема соответствует эквивалентному генератору Г1. Величина и направление обменной мощности задавались увеличением объема выработки электроэнергии в избыточной части (узлы 105-505). В примечании к рисунку 3.9 указаны возможные вариации установленных мощностей эквивалентов энергообъединений.

Исследование устойчивости в эквивалентной пятимашинной схеме выполнено с целью обобщения полученных ранее в разделе 3.2.1 критериев применения упрощенных моделей. Сопоставительный анализ динамических свойств эквивалентной пятимашинной схемы электропередачи выявил ряд её отличительных особенностей.

При протяженности одноцепной межсистемной связи более 1500 км границе области устойчивости позиционной модели соответствует бифуркация (разделение) корней (см. строку  $\psi_f = \text{const}$ ; см. таблица 3.6) с образованием колебательной пары с сопряженной вещественной частью (см. таблица 3.6, столбец  $\psi_f = \text{const}$ :  $\alpha_{1,2} = +0,681 \pm j0,296$ ;  $\alpha_{3,4} = -0,681 \pm j0,296$  и аналогичные результаты в таблицах 3.7, 3.8). Область потенциальной устойчивости для модели  $U_f = \text{const}$  ОЭС располагается левее максимума

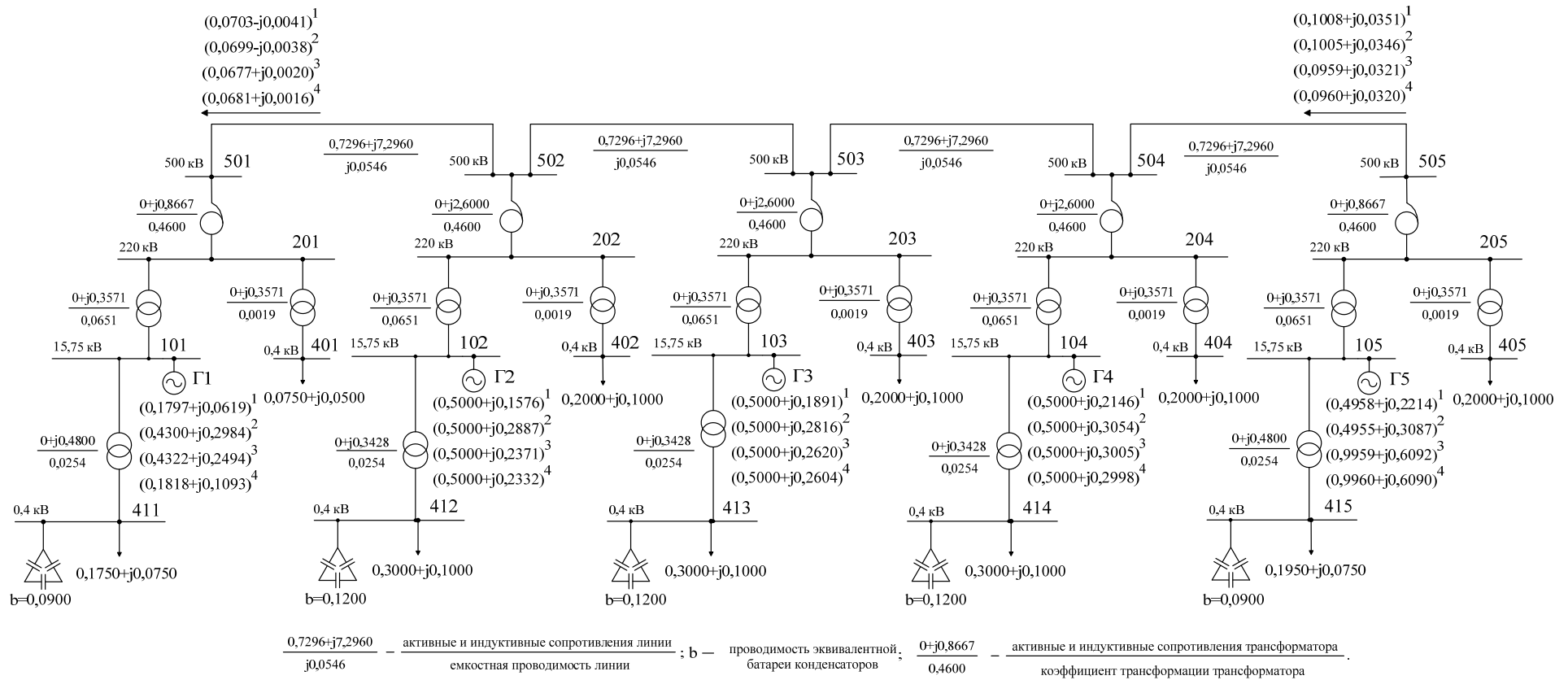


Рисунок 3.9 – Расчетная схема рассматриваемой энергосистемы при различных соотношениях установленной мощности приемной и передающей частей ЭЭС

Примечание:

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

Таблица 3.6 – Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения различных моделей ЭЭС при  $P^{(\Gamma 1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(\Gamma 2)} = P^{(\Gamma 3)} = P^{(\Gamma 4)} = P^{(\Gamma 5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$

Обменная мощность в сечении 501 - 502, о.е./ угол электропередачи $\gamma_{505-501}$ , градус	Запас мощности в сечении 501 - 502, %	Позиционная модель ЭЭС $\psi_f = \text{const}$	Нерегулируемая ЭЭС $U_f = \text{const}$	АРВ-ПД	АРВ-СД (со средневзв. настройками)	АРВ-СД (с макс. настройками)
			без д.к. ( $x_{srd} = \infty$ ; $x_{srq} = \infty$ )	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$
0,97 / 189,64° (пределный по сходимости)	2,80	<b>+1,062±j0,250</b> -1,062±j0,250 0±j0,477 0±j0,676	<b>+1,174±j0,238</b> -0,998±j0,276 -0,190±j0,477 -0,123±j0,675	<b>+0,880;-1,029</b> <b>+0,816±j0,312</b> <b>+0,078±j0,671</b> -0,014±j0,472	<b>+0,687;-0,504</b> -0,227±j0,219 -0,403±j0,338 -0,683±j0,457	<b>+0,463;-0,323</b> -0,277±j0,129 -0,681±j0,195 -1,332±j0,301
1,00 / 172,92° (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,28	<b>+0,698±j0,294</b> -0,698±j0,294 0±j0,507 0±j0,675	<b>+0,748±j0,265</b> -0,748±j0,325 -0,193±j0,507 -0,123±j0,674	<b>+0,091±j0,033</b> <b>+0,709±j0,346</b> <b>+0,071±j0,671</b> -0,030±j0,499	<b>+0,004±j0,033</b> -0,284±j0,262 -0,437±j0,369 -0,682±j0,459	-0,001±j0,022 -0,395±j0,152 -0,815±j0,218 -1,336±j0,303
1,00 / 172,04° (АРВ-СД со средневзв. настройками)*	0,22	<b>+0,681±j0,296</b> -0,681±j0,296 0±j0,509 0±j0,675	<b>+0,727±j0,266</b> -0,736±j0,327 -0,193±j0,509 -0,123±j0,674	<b>+0,097±j0,045</b> <b>+0,703±j0,347</b> <b>+0,071±j0,671</b> -0,030±j0,501	-0,001±j0,040 -0,286±j0,264 -0,439±j0,370 -0,683±j0,459	-0,003±j0,026 -0,402±j0,153 -0,823±j0,219 -1,337±j0,304
0,98 / 145,65° ( $\psi_f = \text{const}$ )*	1,45	0±j0,355 0±j0,356 0±j0,558 0±j0,693	<b>+0,139±j0,308</b> -0,379±j0,398 -0,193±j0,557 -0,126±j0,692	<b>+0,154±j0,147</b> <b>+0,505±j0,381</b> <b>+0,078±j0,687</b> -0,023±j0,549	-0,098±j0,130 -0,353±j0,316 -0,492±j0,410 -0,708±j0,471	-0,098±j0,080 -0,583±j0,185 -1,001±j0,255 -1,379±j0,317
0,97 / 135,74° ( $U_f = \text{const}$ без д.к.)*	3,32	0±j0,326 0±j0,425 0±j0,574 0±j0,703	-0,001±j0,316 -0,289±j0,431 -0,193±j0,573 -0,128±j0,703	<b>+0,146±j0,165</b> <b>+0,423±j0,391</b> <b>+0,084±j0,696</b> -0,016±j0,565	-0,127±j0,150 -0,376±j0,333 -0,510±j0,422 -0,721±j0,477	-0,132±j0,092 -0,651±j0,196 -1,052±j0,267 -1,399±j0,324

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

Таблица 3.7 – Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения упрощенных и полных моделей ЭЭС при  $P^{(\Gamma 1)} = P^{(\Gamma 2)} = P^{(\Gamma 3)} = P^{(\Gamma 4)} = P^{(\Gamma 5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$

Обменная мощность в сечении 501 - 502, о.е./ угол электропередачи $\gamma_{505-501}$ , градус	Запас мощности в сечении 501 - 502, %	Позиционная модель ЭЭС $\psi_f = \text{const}$	Нерегулируемая ЭЭС $U_f = \text{const}$	АРВ-ПД	АРВ-СД (со средневзв. настройками)	АРВ-СД (с макс. настройками)
			без д.к. ( $x_{srd} = \infty ; x_{srq} = \infty$ )	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$
0,98 / 191,26° (пределный по сходимости)	2,79	<b>+0,945±j0,207</b> -0,945±j0,207 0±j0,435 0±j0,563	<b>+1,145±j0,201</b> -0,817±j0,246 -0,175±j0,434 -0,148±j0,562	<b>+0,902;-1,012</b> <b>+0,703±j0,292</b> -0,091±j0,430 -0,016±j0,591	<b>+0,671;-0,492</b> -0,200±j0,205 -0,367±j0,322 -0,513±j0,411	<b>+0,453;-0,314</b> -0,241±j0,121 -0,614±j0,184 -1,065±j0,249
1,00 / 173,20° (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,21	<b>+0,562±j0,251</b> -0,562±j0,251 0±j0,476 0±j0,570	<b>+0,741±j0,221</b> -0,599±j0,294 -0,176±j0,476 -0,152±j0,569	<b>+0,118±j0,039</b> <b>+0,612±j0,324</b> -0,081±j0,471 -0,017±j0,567	<b>+0,005±j0,038</b> -0,254±j0,246 -0,411±j0,357 -0,521±j0,419	-0,001±j0,025 -0,347±j0,143 -0,767±j0,208 -1,096±j0,257
1,00 / 172,03° (АРВ-СД со средневзв. настройками)*	0,14	<b>+0,539±j0,254</b> -0,539±j0,254 0±j0,479 0±j0,571	<b>+0,715±j0,223</b> -0,586±j0,297 -0,176±j0,478 -0,152±j0,570	<b>+0,124±j0,051</b> <b>+0,606±j0,325</b> -0,080±j0,473 -0,017±j0,568	-0,001±j0,045 -0,257±j0,248 -0,414±j0,359 -0,522±j0,419	-0,004±j0,029 -0,353±j0,144 -0,777±j0,209 -1,099±j0,257
0,99 / 153,12° ( $\psi_f = \text{const}$ )*	0,65	0±j0,296 0±j0,297 0±j0,517 0±j0,586	<b>+0,315±j0,244</b> -0,377±j0,346 -0,172±j0,517 -0,156±j0,585	<b>+0,166±j0,127</b> <b>+0,490±j0,349</b> -0,058±j0,512 -0,013±j0,583	-0,064±j0,107 -0,302±j0,284 -0,454±j0,388 -0,540±j0,433	-0,064±j0,067 -0,465±j0,164 -0,915±j0,232 -1,155±j0,271
0,94 / 128,00° ( $U_f = \text{const}$ без д.к.)*	5,55	0±j0,275 0±j0,419 0±j0,559 0±j0,611	-0,001±j0,269 -0,222±j0,420 -0,167±j0,558 -0,160±j0,610	<b>+0,144±j0,171</b> <b>+0,287±j0,374</b> -0,030±j0,554 -0,006±j0,605	-0,129±j0,153 -0,355±j0,324 -0,499±j0,417 -0,569±j0,452	-0,137±j0,093 -0,616±j0,188 -1,060±j0,260 -1,231±j0,292

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

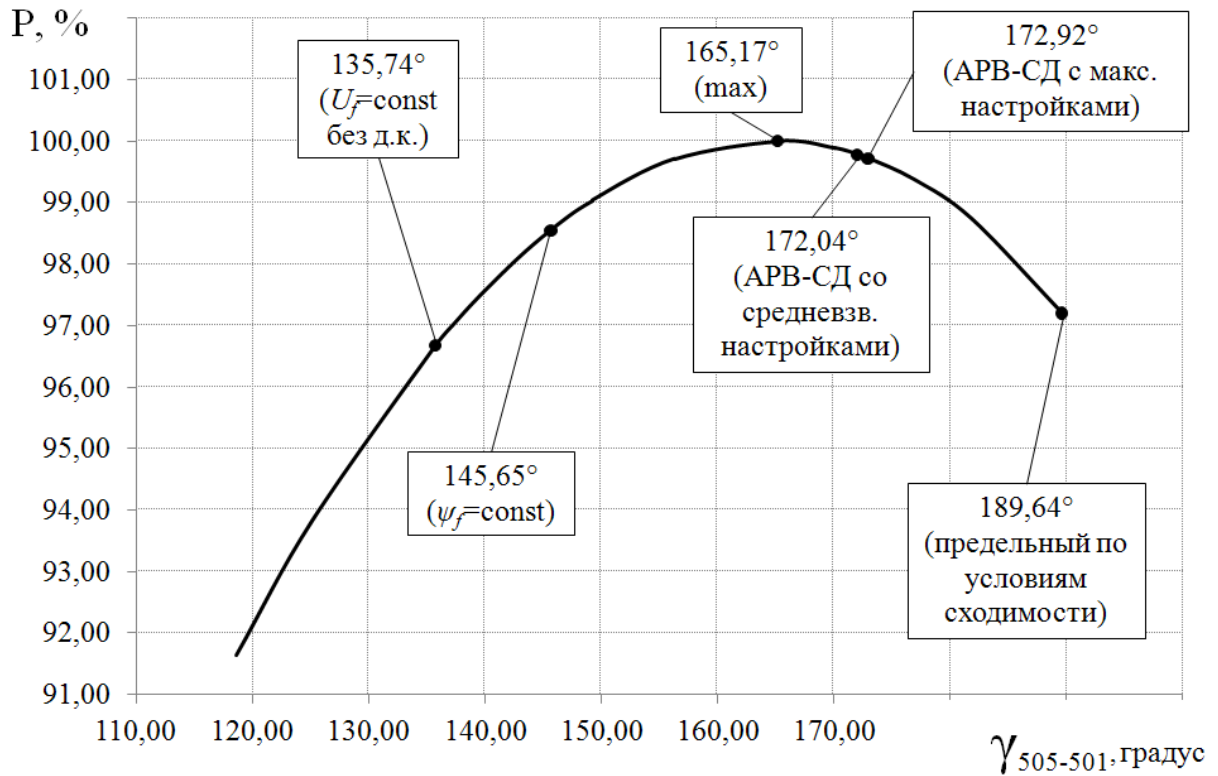


Рисунок 3.10 – Угловая характеристика одноцепной электропередачи при сниженной установленной мощности приемной и передающей частей ОЭС  $P^{(1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(2)} = P^{(3)} = P^{(4)} = P^{(5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$

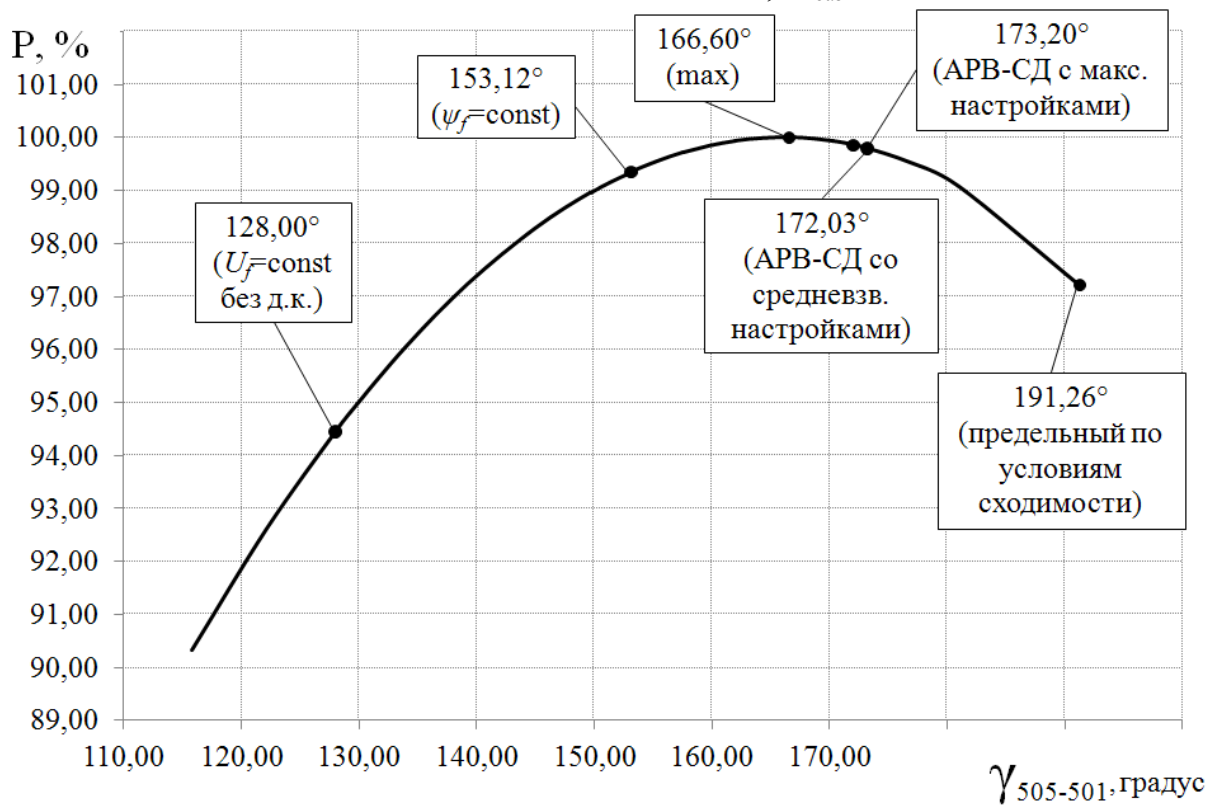


Рисунок 3.11 – Угловая характеристика одноцепной электропередачи при соизмеримых установленных мощностях приемной и передающей частей ОЭС  $P^{(1)} = P^{(2)} = P^{(3)} = P^{(4)} = P^{(5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$

Таблица 3.8 – Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения различных моделей ЭЭС при  $P^{(\Gamma1)} = P^{(\Gamma2)} = P^{(\Gamma3)} = P^{(\Gamma4)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}; P^{(\Gamma5)} = S_{\text{баз}}$

Обменная мощность в сечении 501 - 502, о.е./ угол электропередачи $\gamma_{505-501}$ , градус	Запас мощности в сечении 501 - 502, %	Позиционная модель ЭЭС $\psi_f = \text{const}$	Нерегулируемая ЭЭС $U_f = \text{const}$	АРВ-ПД	АРВ-СД (со средневзв. настройками)	АРВ-СД (с макс. настройками)
			без д.к. ( $x_{srd} = \infty; x_{srq} = \infty$ )	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$
0,98 / 182,29° (пределный по сходимости)	2,20	<b>+0,839±j0,261</b> -0,839±j0,261 0±j0,464 0±j0,583	<b>+0,960±j0,249</b> -0,779±j0,285 -0,164±j0,463 -0,157±j0,583	<b>+0,656; -0,891</b> <b>+0,678±j0,325</b> -0,025±j0,463 -0,047±j0,580	<b>+0,613; -0,487</b> -0,203±j0,195 -0,395±j0,332 -0,535±j0,424	<b>+0,410; -0,311</b> -0,226±j0,115 -0,662±j0,190 -1,117±j0,264
1,00 / 165,06° (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,03	<b>+0,623±j0,295</b> -0,623±j0,295 0±j0,491 0±j0,588	<b>+0,697±j0,272</b> -0,639±j0,321 -0,167±j0,490 -0,159±j0,587	<b>+0,009±j0,001</b> <b>+0,624±j0,349</b> -0,029±j0,487 -0,062±j0,584	<b>+0,033; -0,041</b> -0,252±j0,230 -0,425±j0,356 -0,540±j0,429	-0,001±j0,001 -0,311±j0,133 -0,766±j0,205 -1,136±j0,269
1,00 / 164,97° (АРВ-СД со средневзв. настройками)*	0,03	<b>+0,622±j0,295</b> -0,622±j0,295 0±j0,491 0±j0,588	<b>+0,695±j0,272</b> -0,638±j0,321 -0,167±j0,490 -0,159±j0,587	<b>+0,009±j0,002</b> <b>+0,623±j0,349</b> -0,029±j0,487 -0,062±j0,584	-0,008±j0,001 -0,252±j0,230 -0,425±j0,356 -0,540±j0,429	-0,001±j0,004 -0,311±j0,134 -0,767±j0,206 -1,136±j0,269
0,97 / 135,08° ( $\psi_f = \text{const}$ )*	3,25	0±j0,334 0±j0,335 0±j0,539 0±j0,609	<b>+0,221±j0,290</b> -0,332±j0,375 -0,167±j0,538 -0,163±j0,608	<b>+0,045±j0,125</b> <b>+0,448±j0,374</b> <b>+0,001±j0,603</b> -0,021±j0,534	-0,076±j0,103 -0,315±j0,278 -0,477±j0,391 -0,566±j0,447	-0,068±j0,064 -0,451±j0,159 -0,942±j0,234 -1,206±j0,287
0,90 / 112,67° ( $U_f = \text{const}$ без д.к.)*	10,44	0±j0,291 0±j0,428 0±j0,569 0±j0,627	-0,001±j0,285 -0,207±j0,429 -0,167±j0,568 -0,165±j0,627	<b>+0,058±j0,156</b> <b>+0,264±j0,385</b> <b>+0,007±j0,621</b> -0,006±j0,564	-0,117±j0,135 -0,353±j0,307 -0,510±j0,413 -0,588±j0,461	-0,112±j0,083 -0,553±j0,176 -1,045±j0,254 -1,259±j0,303

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



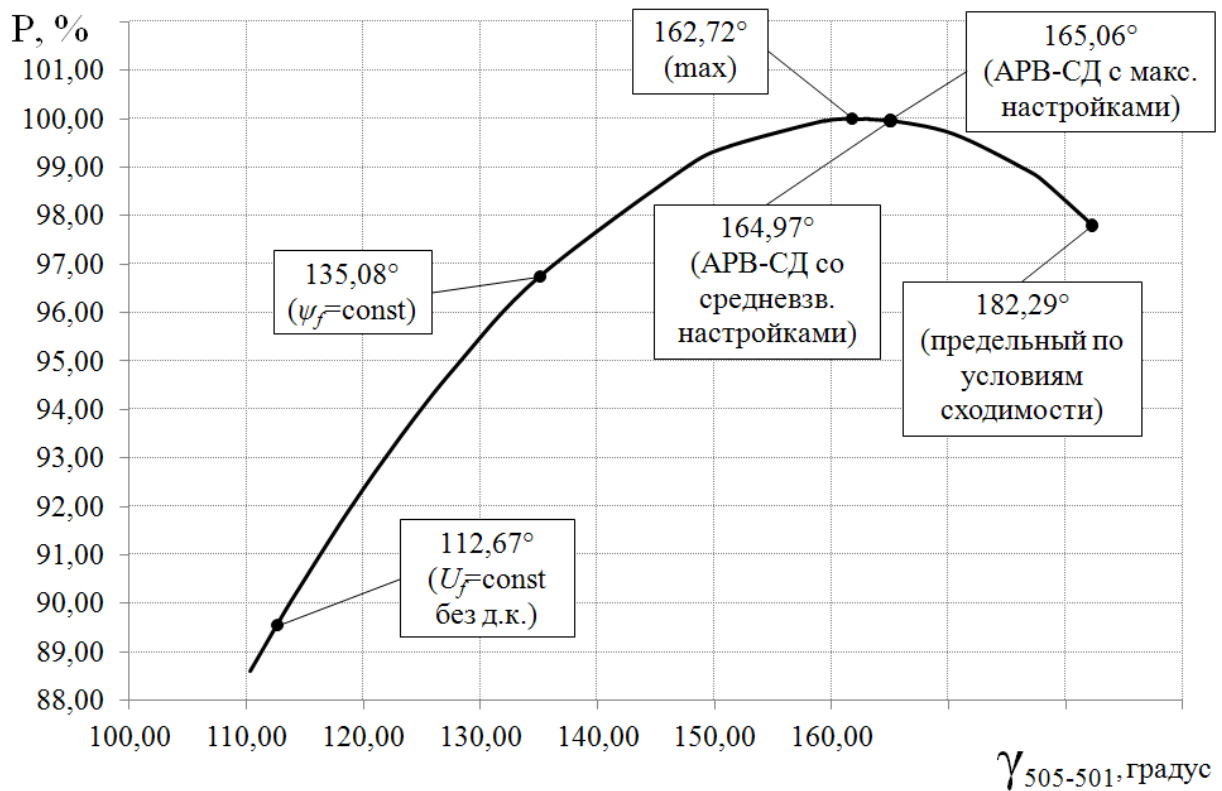


Рисунок 3.12 – Угловая характеристика одноцепной электропередачи при увеличенной установленной мощности передающей части ОЭС

$$P^{(\Gamma 1)} = P^{(\Gamma 2)} = P^{(\Gamma 3)} = P^{(\Gamma 4)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}; P^{(\Gamma 5)} = S_{\text{баз}}$$

угловой характеристики (см. рисунки 3.10 - 3.14) и отвечает значениям запаса по мощности от 0,8% до 10,4% (см. строку “ $U_f = \text{const}$  без д.к.” таблицы 3.6 - 3.10: 3,32; 5,55%; 10,44%; 6,95%; 0,77%). Тем не менее, в цепочечных схемах ОЭС, обладающих жесткими межсистемными связями протяженностью не более 1200 км (или 2400 км при двухцепном исполнении), применение вышеуказанного структурного критерия вполне обоснованно приемлемой погрешностью (см. строку “ $U_f = \text{const}$  без д.к.”, 0,77% таблица 3.10) оценки границ области устойчивости действительной регулируемой системы с интенсивным управлением (таблица 3.10, столбцы АРВ-СД). Данное положение позволяет сформулировать важный тезис о допустимости применения нерегулируемой модели ( $U_f = \text{const}$ ) без демпферных контуров для оценки границы области потенциально устойчивых режимов цепочечной ОЭС протяженностью не более 1200 км.

Таблица 3.9 – Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения упрощенных и полных моделей ЭЭС при  $P^{(T1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(T2)} = P^{(T3)} = P^{(T4)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(T5)} = S_{\text{баз}}$

Обменная мощность в сечении 501 - 502, о.е./ угол электропередачи $\gamma_{505-501}$ , градус	Запас мощности в сечении 501 - 502, %	Позиционная модель ЭЭС $\psi_f = \text{const}$	Нерегулируемая ЭЭС $U_f = \text{const}$	АРВ-ПД	АРВ-СД (со средневзв. настройками)	АРВ-СД (с макс. настройками)
			без д.к. ( $x_{srd} = \infty$ ; $x_{srq} = \infty$ )	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$
одноцепное исполнение ( $Z_{\text{л}} = 0,7296 + j7,2960$ о.е.)						
0,98 / 180,47° (пределный по сходимости)	2,14	<b>+0,758±j0,271</b> -0,758±j0,271 0±j0,501 0±j0,674	<b>+0,881±j0,255</b> -0,726±j0,300 -0,163±j0,500 -0,112±j0,673	<b>+0,649;-0,890</b> <b>+0,665±j0,333</b> <b>+0,018±j0,676</b> -0,010±j0,498	<b>+0,613;-0,490</b> -0,232±j0,211 -0,435±j0,356 -0,697±j0,476	<b>+0,410;-0,313</b> -0,267±j0,123 -0,774±j0,205 -1,455±j0,318
1,00 / 164,33° (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,05	<b>+0,532±j0,308</b> -0,532±j0,308 0±j0,522 0±j0,673	<b>+0,602±j0,281</b> -0,579±j0,338 -0,165±j0,521 -0,112±j0,672	<b>+0,601±j0,358</b> <b>+0,015±j0,676</b> -0,246±j0,226 -0,014±j0,518	<b>+0,030;-0,038</b> -0,282±j0,248 -0,461±j0,376 -0,697±j0,476	-0,002±j0,002 -0,363±j0,143 -0,869±j0,220 -1,456±j0,319
1,00 / 164,27° (АРВ-СД со средневзв. настройками)*	0,05	<b>+0,531±j0,308</b> -0,531±j0,308 0±j0,522 0±j0,673	<b>+0,601±j0,281</b> -0,578±j0,338 -0,165±j0,521 -0,112±j0,672	<b>+0,601±j0,358</b> <b>+0,015±j0,676</b> -0,246±j0,226 -0,014±j0,518	-0,008±j0,001 -0,282±j0,248 -0,461±j0,376 -0,698±j0,477	-0,005±j0,004 -0,363±j0,143 -0,870±j0,220 -1,457±j0,319
0,99 / 143,55° ( $\psi_f = \text{const}$ )*	1,40	0±j0,341 0±j0,343 0±j0,554 0±j0,684	<b>+0,236±j0,296</b> -0,344±j0,385 -0,168±j0,553 -0,114±j0,683	<b>+0,005±j0,114</b> <b>+0,464±j0,380</b> <b>+0,017±j0,687</b> -0,010±j0,548	-0,066±j0,092 -0,332±j0,285 -0,498±j0,401 -0,714±j0,485	-0,057±j0,058 -0,481±j0,163 -0,997±j0,242 -1,485±j0,328
0,93 / 121,20° ( $U_f = \text{const}$ без д.к.)*	6,95	0±j0,300 0±j0,444 0±j0,584 0±j0,704	-0,001±j0,295 -0,211±j0,445 -0,170±j0,584 -0,118±j0,703	<b>+0,029±j0,153</b> <b>+0,265±j0,393</b> <b>+0,026±j0,704</b> -0,001±j0,578	-0,117±j0,133 -0,376±j0,318 -0,534±j0,425 -0,744±j0,497	-0,110±j0,081 -0,603±j0,183 -1,107±j0,266 -1,527±j0,342

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

Таблица 3.10 – Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения различных моделей ЭЭС при  $P^{(\Gamma 1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(\Gamma 2)} = P^{(\Gamma 3)} = P^{(\Gamma 4)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(\Gamma 5)} = S_{\text{баз}}$

Обменная мощность в сечении 501 - 502, о.е./ угол электропередачи $\gamma_{505-501}$ , градус	Запас мощности в сечении 501 - 502, %	Позиционная модель ЭЭС $\psi_f = \text{const}$	Нерегулируемая ЭЭС $U_f = \text{const}$	АРВ-ПД	АРВ-СД (со средневзв. настройками)	АРВ-СД (с макс. настройками)
			без д.к. ( $x_{srd} = \infty$ ; $x_{srq} = \infty$ )	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$
двухцепное исполнение ( $Z_{\text{Л}} = 0,3648 + j3,6480$ о.е.)						
0,99 / 140,67° (пределный по сходимости)	1,44	0±j0,212 0±j0,418 0±j0,630 0±j0,772	<b>+0,494±j0,233</b> -0,287±j0,426 -0,154±j0,629 -0,094±j0,771	<b>+0,844; -1,082</b> <b>+0,491±j0,384</b> -0,014±j0,626 -0,112±j0,797	<b>+0,750; -0,564</b> -0,407±j0,333 -0,617±j0,469 -0,981±j0,566	<b>+0,505; -0,363</b> -0,680±j0,189 -1,348±j0,309 -2,030±j0,399
1,00 / 129,45° (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,08	0±j0,247 0±j0,475 0±j0,650 0±j0,777	<b>+0,220±j0,249</b> -0,218±j0,477 -0,156±j0,649 -0,094±j0,776	<b>+0,329±j0,398</b> -0,456±j0,175 -0,315±j0,487 -0,015±j0,645	<b>+0,071; -0,075</b> -0,451±j0,363 -0,646±j0,486 -1,000±j0,571	-0,009±j0,001 -0,824±j0,209 -1,408±j0,328 -2,052±j0,403
1,00 / 129,30° (АРВ-СД со средневзв. настройками)*	0,07	0±j0,247 0±j0,476 0±j0,650 0±j0,777	<b>+0,217±j0,250</b> -0,218±j0,478 -0,156±j0,649 -0,094±j0,777	<b>+0,326±j0,398</b> -0,456±j0,175 -0,312±j0,487 -0,015±j0,645	-0,008±j0,003 -0,451±j0,364 -0,646±j0,487 -1,000±j0,571	-0,004±j0,008 -0,826±j0,209 -1,409±j0,328 -2,053±j0,404
0,99 / 115,04° ( $U_f = \text{const}$ без д.к.)*	0,77	0±j0,288 0±j0,534 0±j0,674 0±j0,793	-0,001±j0,285 -0,183±j0,534 -0,160±j0,674 -0,098±j0,792	<b>+0,044±j0,147</b> <b>+0,144±j0,397</b> -0,123±j0,531 -0,014±j0,668	-0,105±j0,125 -0,502±j0,398 -0,682±j0,507 -1,043±j0,581	-0,100±j0,077 -1,000±j0,237 -1,473±j0,351 -2,094±j0,412

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

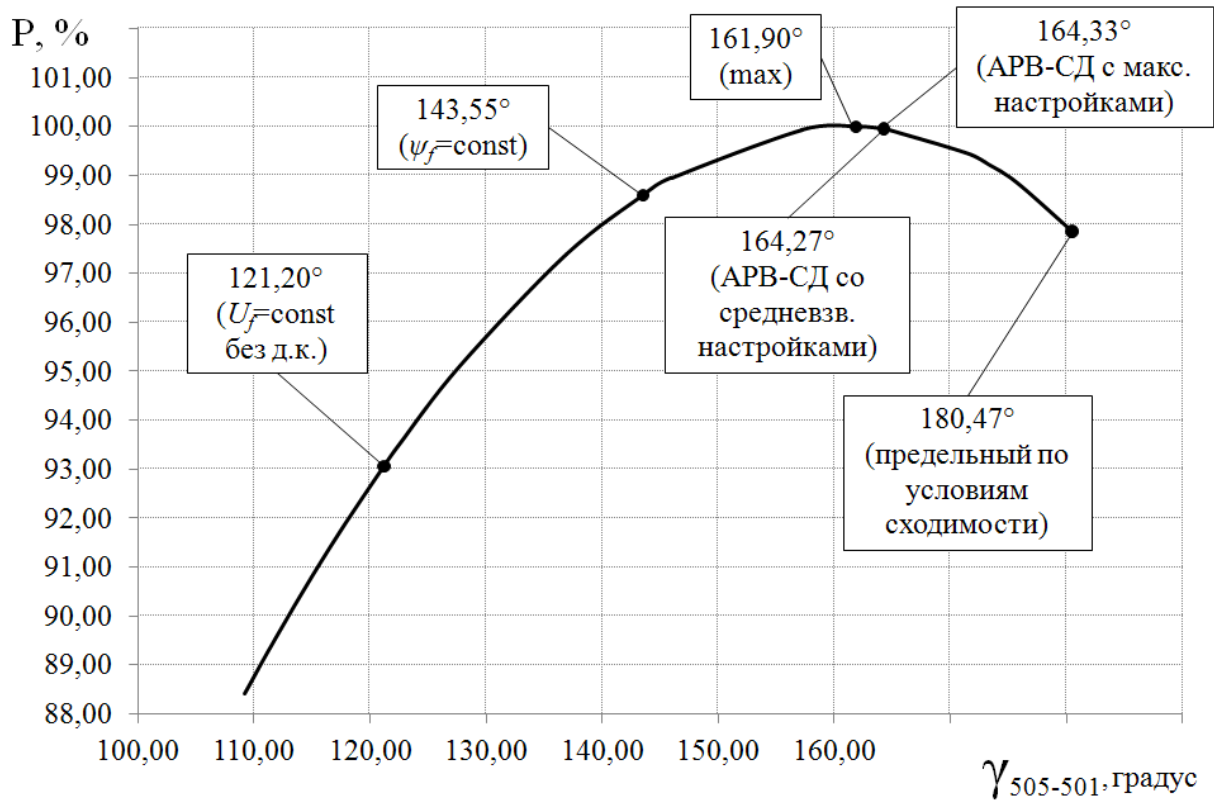


Рисунок 3.13 – Угловая характеристика одноцепной электропередачи при четырехкратном соотношении установленной мощности приемной и передающей частей ОЭС  
 $P^{(I1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(I2)} = P^{(I3)} = P^{(I4)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(I5)} = S_{\text{баз}}$

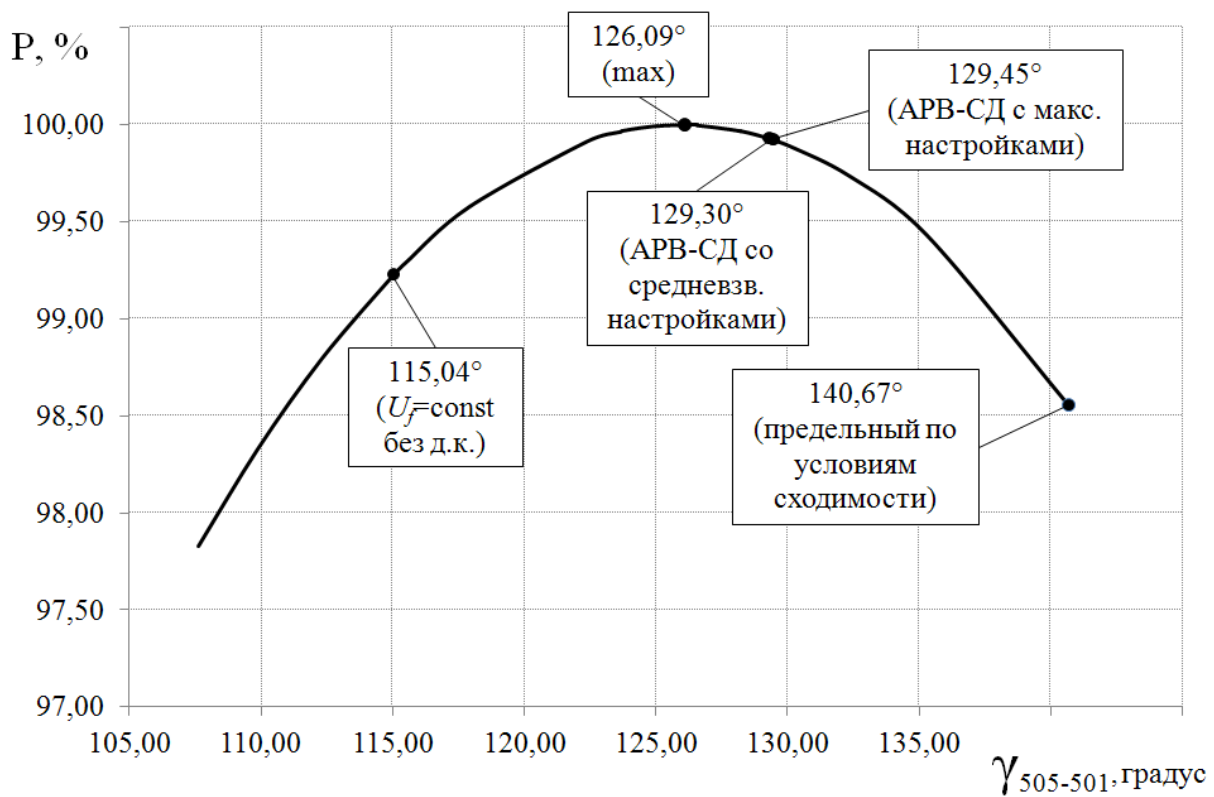


Рисунок 3.14 – Угловая характеристика двухцепной электропередачи при четырехкратном соотношении установленной мощности приемной и передающей частей ОЭС  
 $P^{(I1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(I2)} = P^{(I3)} = P^{(I4)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(I5)} = S_{\text{баз}}$

В свою очередь, граница устойчивых режимов, определенная применительно к позиционной модели ( $\psi_f = \text{const}$ ), несколько шире (см. таблицы 3.6 - 3.10) аналогичной области (на 1,87% см. рисунок 3.10; на 4,90% см. рисунок 3.11; на 7,19% см. рисунок 3.12; на 5,55% см. рисунок 3.13; на 0,77% см. рисунок 3.14), вычисленной с использованием нерегулируемой ( $U_f = \text{const}$ ) модели. Указанные области устойчивости соответствуют режимам, стабилизируемым при использовании АРВ-СД (таблица 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10). Применение пропорциональных регуляторов, так же как и в трехмашинной схеме, не обеспечивает устойчивую параллельную работу генераторов. Об этом свидетельствуют корни с положительной вещественной частью практически во всей области рассматриваемых режимов (в частности, см. столбец АРВ-ПД таблица 3.6  $\alpha_{1,2} = +0,084 \pm j0,696$  и др., а также таблицы 3.7..3.10). В остальном полученные ранее выводы из анализа результатов трехмашинной цепочечной схемы характерны и для пятимашинной электропередачи.

Обобщая результаты исследований для трехмашинной и пятимашинной цепочечных схем электропередачи можно заключить нижеследующие тезисы.

В качестве упрощенных моделей в дальнейших исследованиях используются только позиционные модели ЭЭС при постоянстве потокосцеплений всех обмоток ротора ( $\psi_f = \text{const}$ ) и нерегулируемые модели ( $U_f = \text{const}$ ) без демпферных контуров. Для расчетных схем, включающих три или пять эквивалентных энергообъединений, предел передаваемой мощности при использовании упрощенных моделей располагается в непосредственной близости максимума угловой характеристики. В энергосистемах 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 протяженностью до 1200 км. При этом введение интенсивного

управления с неоптимальной ненулевой настройкой регуляторов позволяет расширить по углу электропередачи границу области колебательной устойчивости вплоть до предельных по условиям сходимости режимов. Снижение по передаваемой мощности относительно максимума угловой характеристики составляет при этом не более 0,03%..0,38%. При средневзвешенных и максимальных настройках АРВ-СД граница области устойчивости находится в зоне искусственной устойчивости (где синхронизирующая мощность меньше нуля  $\partial P / \partial \delta < 0$ ). Следует отметить, что усиление стабилизации до предельно возможных (максимальных) значений по соответствующим каналам не приводит к существенному увеличению предельных значений угла электропередачи при незначительном снижении передаваемой мощности.

### **3.2 Исследование устойчивости объединенных энергосистем кольцевой структуры**

Традиционно системы энергоснабжения крупных мегаполисов обладают кольцевой структурой с системообразующими связями 220 - 330 кВ значительной протяженности. Трудности режимного и противоаварийного управления в кольцевых схемах ОЭС обусловлены прежде всего многообразием схемно-режимных условий их работы. В связи с этим целью настоящего раздела является качественная оценка влияния моментов неконсервативных сил вблизи предельных по сходимости режимов, последующее формулирование качественных критериев, основанных на демпферных свойствах различных моделей синхронных машин и доказательство в результате расчетных исследований возможности применения принятых ранее для цепочечных схем характерных упрощенных моделей для достоверного определения области стабилизируемых режимов действительной регулируемой энергосистемы.

Расчетные схемы энергообъединения [27], для которых осуществлялся поиск структурных критериев, являлись кольцевыми и содержали шесть ( $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$ ,  $\Gamma_3$ ,  $\Gamma_4$ ,  $\Gamma_5$  и  $\Gamma_6$ ) эквивалентных энергосистем (рисунки 3.15, 3.16). Направление потока обменной мощности (рисунки 3.15, 3.16) задавалось аналогичным образом путем снижения объема генерации, либо увеличением энергопотребления в приемной части ОЭС при сбалансированной нагрузке промежуточных эквивалентных энергосистем ( $\Gamma_4$  и др.). Кроме этого, для обобщения ранее предложенных структурных критериев (см. раздел 3.1) варьировалось контролируемое сечение I или II (см. рисунок 3.15 и 3.16) относительно избыточной части ОЭС (узлы 106 - 306 на рисунках 3.15, 3.16). На рисунках 3.15, 3.16 показано потокораспределение мощности в контролируемых сечениях I и II, для предельного по условиям сходимости

режима, все параметры указаны на схеме в приведенных единицах по отношению к базисной мощности  $S_{\text{баз}}=10000$  МВА, параметры генераторов и АРВ приняты согласно указанным в предыдущем разделе 3.1.

Оценка устойчивости при вариации контролируемого сечения, жесткости межсистемных связей и соотношения установленных мощностей эквивалентных генераторов производилась в результате анализа корней (см. таблицы 3.11 - 3.15), отвечающих электромеханическому движению при последовательном утяжелении режима работы электропередачи вплоть до предельного по условиям сходимости. Далее выполним анализ применительно к расчетной схеме энергосистемы при сниженной установленной мощности приемной и передающей частей ОЭС  $P^{(\Gamma 2)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(\Gamma 1)} = P^{(\Gamma 3)} = P^{(\Gamma 4)} = P^{(\Gamma 5)} = P^{(\Gamma 6)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ . Результаты расчета с учетом вариации контролируемого сечения отражены в таблице 3.11 и 3.12. Все нижеследующие положения также характерны и для остальных расчетных случаев и отражены в таблицах 3.13, 3.14 и 3.15 и рисунках 3.18, 3.19 и 3.20.

Предельный по условиям сходимости режим в рассмотренных схемах кольцевой структуры располагается в области больших углов электропередачи  $147^\circ \dots 176^\circ$  ( $146,65^\circ$  таблица 3.11;  $175,60^\circ$  таблица 3.12;  $148,13^\circ$  таблица 3.13;  $148,65^\circ$  таблица 3.14,  $147,14^\circ$  таблица 3.15). Указанный режим в большинстве случаев находится в зоне неустойчивой работы и может характеризоваться как апериодическим, так и колебательным нарушением устойчивости. Вывод о характере нарушения осуществлялся только в результате численного анализа корней, вычисленных как собственные числа матрицы коэффициентов системы уравнений, характеризующих частоты и затухания маловозмущенного свободного движения эквивалентных генераторов.

Нарушение устойчивости в рассмотренных случаях при позиционном представлении эквивалентных генераторов (постоянство потокосцеплений всех контуров ротора,  $\psi_f = \text{const}$ ) сопровождается образованием



колебательных пар (например,  $+0,145 \pm j0,519$ ;  $-0,145 \pm j0,519$  см. столбец “ $\psi_f = \text{const}$ ” таблица 3.11) с сопряженной вещественной частью. Последующее утяжеление режима позиционной ЭЭС сопровождается либо появлением апериодических корней (см. столбец “ $\psi_f = \text{const}$ ” таблицы 3.13  $+0,851; -0,851$ ) либо образованием дополнительных пар составляющих неустойчивого колебательного электромеханического движения ( $+0,698 \pm j0,249$ , см. столбец “ $\psi_f = \text{const}$ ” таблицы 3.14). Предельные режимы в этих расчетных случаях отвечают запасам менее 8%, что является недопустимым по нормативным требованиям (рисунок 3.17..3.20).

Так же как и для расчетных исследований цепочечных схем применение АРВ-ПД в кольцевых энергообъединениях не позволяет обеспечить устойчивую параллельную работу генераторов, в области искусственной устойчивости присутствуют корни характеристического полинома с положительной вещественной частью ( $+0,288 \pm j0,237$  и др., см. столбец “АРВ-ПД”, таблицы 3.11). Расширение области устойчивых режимов до предельных по условиям сходимости возможно только при введении максимального стабилизационного воздействия через каналы АРВ-СД, граница которой располагается на угловой характеристике правее максимума и характеризуется малым запасом до 1% по передаваемой мощности в контролируемом сечении I (0,60% рисунок 3.17; 0,57% рисунок 3.18; 0,79% рисунок 3.19; 0,78% рисунок 3.20).

Во всех рассмотренных случаях, как при использовании упрощенных ( $\psi_f = \text{const}$ ,  $U_f = \text{const}$ ), так и полных моделей с АРВ-СД со средневзвешенными настройками нарушение устойчивости происходит вблизи максимума угловой характеристики (см. рисунки 3.17 - 3.20). Граница области потенциально устойчивых режимов может определяться, как на основе модели постоянства потокосцеплений всех контуров ротора ( $\psi_f = \text{const}$ ), так и модели постоянства напряжения возбуждения ( $U_f = \text{const}$ ).

Потенциально устойчивые режимы ОЭС по этим структурным критериям располагаются левее максимума угловой характеристики, а

предел по передаваемой мощности по условиям сходимости находится вблизи указанного максимума (рисунок 3.17..3.20) в области искусственной устойчивости, где  $\partial P / \partial \delta < 0$ . Полученные в результате исследований малые значения запаса до 4% при представлении эквивалентных генераторов постоянством напряжения возбуждения  $U_f = \text{const}$  характеризуют наибольшее использование электропередачи и соответствуют ее допустимой по условиям статической устойчивости загрузке (0,99%; 0,29%; 3,02%; 3,90%; 1,22% см. таблицы 3.11 - 3.15). Задание максимальных настроек АРВ-СД позволяет незначительно, не более чем на 3%, (0,39% таблица 3.11; 2,45% таблица 3.13; 3,11% таблица 3.14; 0,44% таблица 3.15) расширить область устойчивых режимов относительно искомой границы потенциальной устойчивости (рисунки 3.17 - 3.20). Так же, как и для электропередачи цепочечной структуры, во всех рассмотренных случаях нарушение колебательной устойчивости ЭЭС с АРВ-СД происходит до предельного по условиям сходимости режима (рисунки 3.17..3.20).

Обобщение вышеизложенных результатов исследований для эквивалентных схем кольцевой структуры заключается в нижеследующих тезисах. Предел передаваемой мощности по условиям сходимости уравнений установившихся режимов располагается вблизи максимума угловой характеристики (1,73% рисунок 3.17; 1,79% рисунок 3.18; 1,80% рисунок 3.19; 1,76% рисунок 3.20). Предельные режимы, рассчитываемые с применением упрощенных моделей отвечают недопустимым (менее 8%) по нормативным требованиям запасам по устойчивости (рисунок 3.17, 3.18, 3.19 и 3.20).

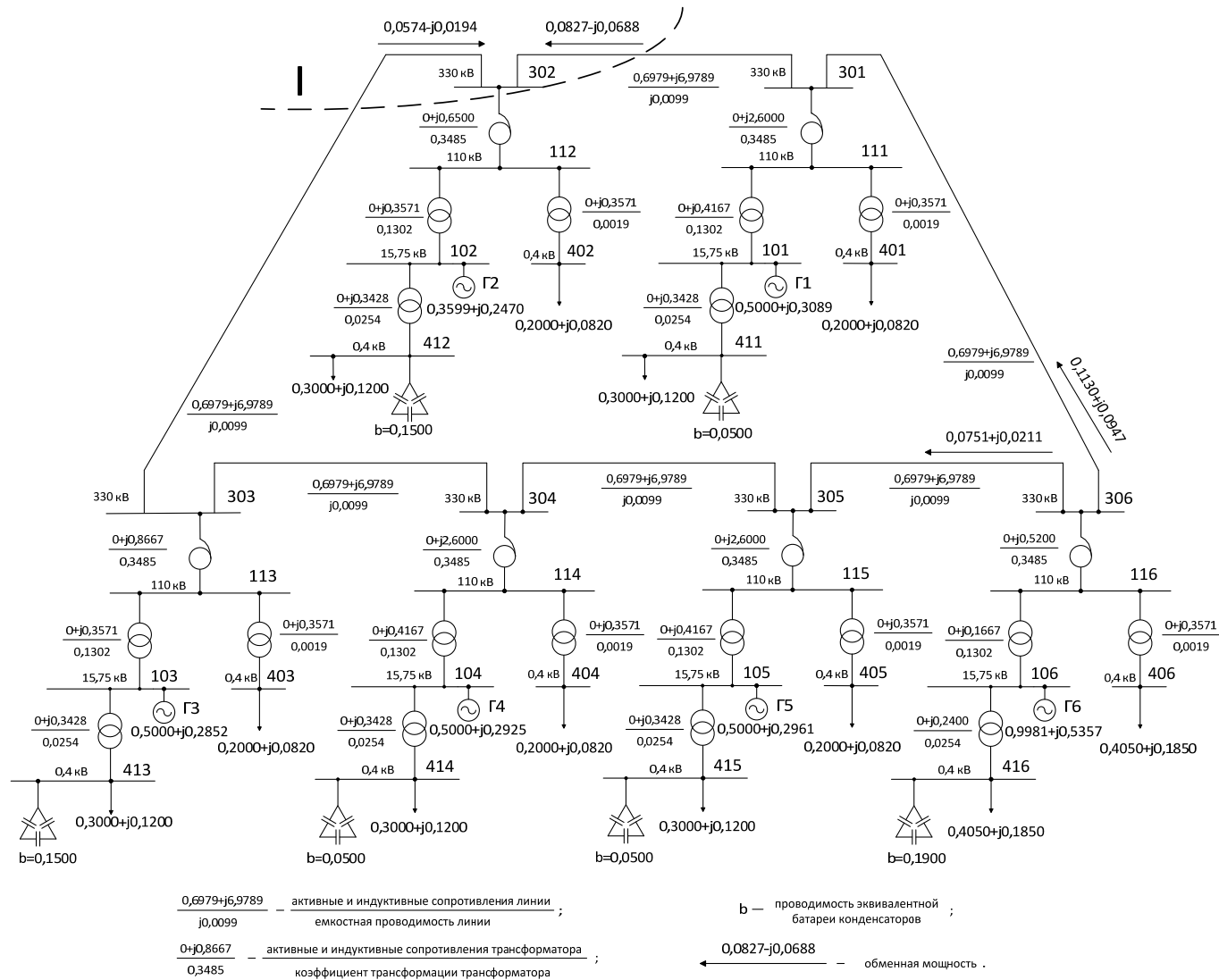


Рисунок 3.15 – Расчетная схема рассматриваемой энергосистемы при увеличенной установленной мощности передающей части ОЭС  $P^{(\Gamma 1)} = P^{(\Gamma 2)} = P^{(\Gamma 3)} = P^{(\Gamma 4)} = P^{(\Gamma 5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(\Gamma 6)} = S_{\text{баз}}$ . (контролируемое сечение I)

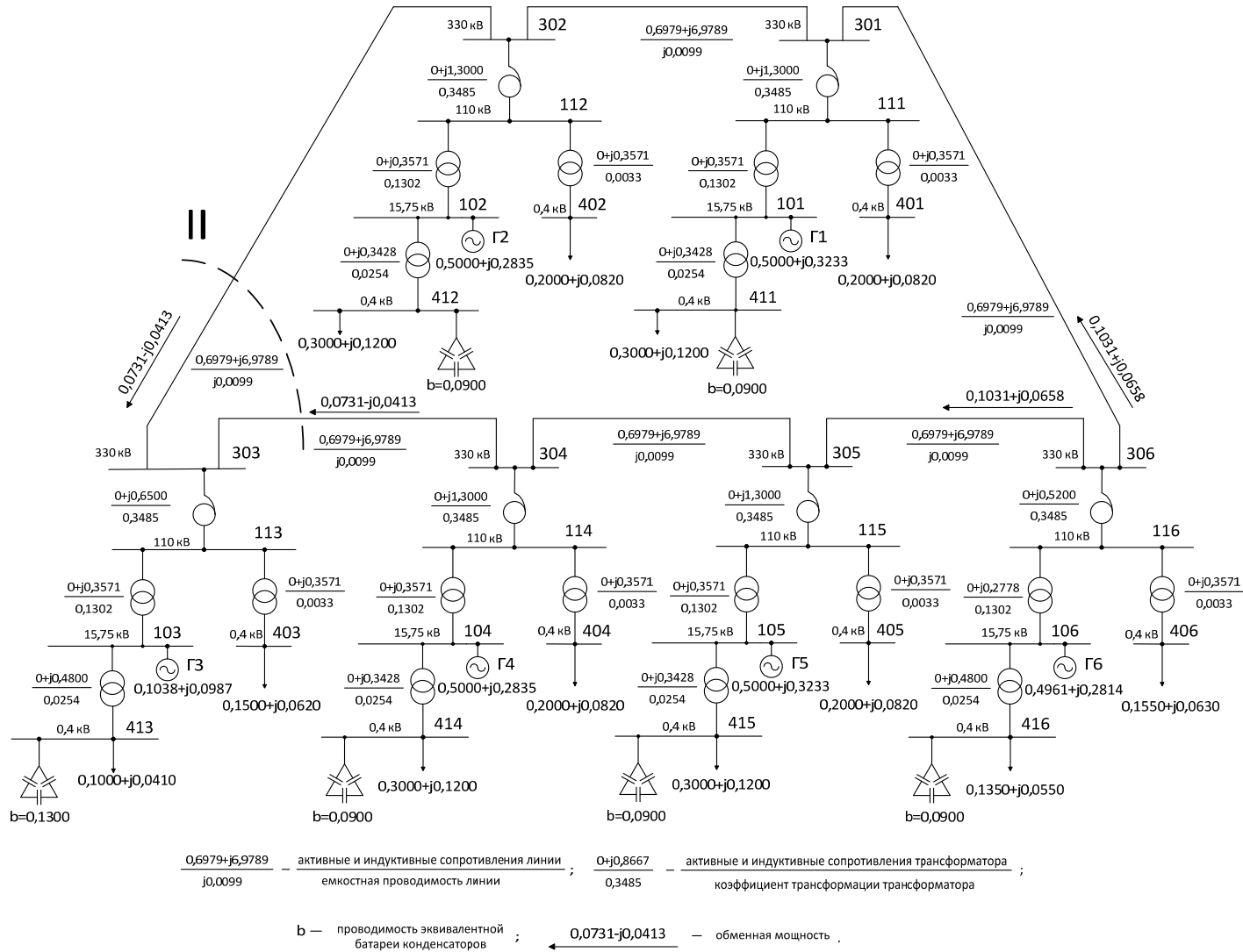


Рисунок 3.16 – Расчетная схема рассматриваемой энергосистемы при сниженной установленной мощности приемной и передающей частей ОЭС  $P^{(I3)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(I1)} = P^{(I2)} = P^{(I4)} = P^{(I5)} = P^{(I6)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$  (контролируемое сечение II)

Таблица 3.11 – Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения различных моделей ЭЭС при  $P^{(\Gamma 2)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(\Gamma 1)} = P^{(\Gamma 3)} = P^{(\Gamma 4)} = P^{(\Gamma 5)} = P^{(\Gamma 6)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$  (контролируемое сечение I)

Обменная мощность в сечении I о.е./ угол электропередачи $\gamma_{306-302}$ , градус	Запас мощности в сечении I, %	Позиционная модель ЭЭС $\psi_f = \text{const}$	Нерегулируемая ЭЭС $U_f = \text{const}$	АРВ-ПД	АРВ-СД (со средневзв. настройками)	АРВ-СД (с макс. настройками)
			без д.к. ( $x_{srd} = \infty; x_{srq} = \infty$ )	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$
0,98 / 146,65°  (пределный по сходимости)	1,73	<b>+1,807;-1,807</b> <b>+0,269±j0,483</b> -0,269±j0,483 0±j0,246 0±j0,617	<b>+1,750;-1,876</b> <b>+0,142±j0,477</b> -0,382±j0,259 -0,399±j0,488 -0,053±j0,616	<b>+1,482;-1,537</b> <b>+0,528±j0,273</b> <b>+0,351±j0,476</b> -0,265±j0,515 -0,142±j0,648	<b>+0,820;-0,553</b> -0,221±j0,217 -0,335±j0,312 -0,433±j0,379 -0,710±j0,462	<b>+0,563;-0,357</b> -0,268±j0,127 -0,572±j0,183 -0,867±j0,226 -1,550±j0,319
0,99 / 141,06°  (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,60	<b>+0,897;-0,897</b> <b>+0,270±j0,491</b> -0,270±j0,491 0±j0,236 0±j0,616	<b>+0,879±j0,066</b> <b>+0,141±j0,486</b> -0,462±j0,262 -0,399±j0,496 -0,055±j0,615	<b>+0,336±j0,034</b> <b>+0,596±j0,282</b> <b>+0,348±j0,483</b> -0,254±j0,522 -0,152±j0,647	<b>+0,013±j0,052</b> -0,237±j0,225 -0,341±j0,327 -0,438±j0,386 -0,711±j0,464	-0,001±j0,034 -0,290±j0,131 -0,625±j0,193 -0,900±j0,233 -1,557±j0,321
0,99 / 140,24°  (АРВ-СД со средневзв. настройками)*	0,50	<b>+0,703;-0,703</b> <b>+0,268±j0,493</b> -0,268±j0,493 0±j0,236 0±j0,616	<b>+0,835±j0,076</b> <b>+0,139±j0,487</b> -0,471±j0,264 -0,398±j0,497 -0,055±j0,615	<b>+0,350±j0,071</b> <b>+0,601±j0,284</b> <b>+0,346±j0,484</b> -0,252±j0,523 -0,153±j0,648	-0,001±j0,068 -0,240±j0,227 -0,343±j0,329 -0,439±j0,388 -0,712±j0,464	-0,013±j0,044 -0,294±j0,132 -0,634±j0,195 -0,904±j0,235 -1,600±j0,322
0,99 / 118,20°  ( $U_f = \text{const}$ без д.к.)*	0,99	<b>+0,145±j0,519</b> -0,145±j0,519 0±j0,265 0±j0,402 0±j0,651	-0,157±j0,259 -0,270±j0,406 -0,001±j0,512 -0,292±j0,524 -0,056±j0,650	<b>+0,348±j0,216</b> <b>+0,352±j0,348</b> <b>+0,252±j0,500</b> -0,158±j0,543 -0,180±j0,691	-0,176±j0,209 -0,316±j0,268 -0,417±j0,386 -0,445±j0,420 -0,815±j0,495	-0,244±j0,126 -0,422±j0,153 -0,888±j0,234 -1,013±j0,275 -1,688±j0,356
0,97 / 108,41°  ( $\psi_f = \text{const}$ )*	2,98	0±j0,297 0±j0,467 0±j0,529 0±j0,529 0±j0,675	-0,200±j0,295 -0,210±j0,469 -0,098±j0,516 -0,216±j0,539 -0,060±j0,675	<b>+0,288±j0,237</b> <b>+0,076±j0,358</b> <b>+0,211±j0,504</b> -0,116±j0,553 -0,180±j0,719	-0,213±j0,239 -0,342±j0,283 -0,460±j0,402 -0,448±j0,438 -0,883±j0,511	-0,319±j0,143 -0,475±j0,161 -0,973±j0,246 -1,069±j0,300 -1,754±j0,372

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

Таблица 3.12 – Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения упрощенных и полных моделей ЭЭС при  $P^{(\Gamma 3)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(\Gamma 1)} = P^{(\Gamma 2)} = P^{(\Gamma 4)} = P^{(\Gamma 5)} = P^{(\Gamma 6)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$  (контролируемое сечение II)

Обменная мощность в сечении о.е./ угол электропередачи $\gamma_{306-303}$ , градус	Запас мощности в сечении II, %	Позиционная модель ЭЭС $\psi_f = \text{const}$	Нерегулируемая ЭЭС $U_f = \text{const}$	АРВ-ПД	АРВ-СД (со средневзв. настройками)	АРВ-СД (с макс. настройками)
			без д.к. ( $x_{srd} = \infty$ ; $x_{sra} = \infty$ )	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$
0,97 / 175,60°  (пределный по сходимости)	2,50	<b>+2,727;-2,727</b> <b>+0,383±j0,409</b> -0,383±j0,409 0±j0,355 0±j0,632	<b>+2,705;-2,752</b> <b>+0,307±j0,385</b> -0,506±j0,355 -0,506±j0,430 -0,042±j0,631	<b>+0,005±j0,176</b> <b>+0,140±j0,247</b> <b>+0,528±j0,417</b> -0,515±j0,474 -0,228±j0,676	<b>+1,080;-1,093</b> -0,205±j0,186 -0,272±j0,256 -0,397±j0,341 -0,789±j0,497	<b>+0,758;-0,409</b> -0,210±j0,109 -0,387±j0,149 -0,688±j0,194 -1,743±j0,362
1,00 / 163,24°  (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,44	<b>+1,913;-1,913</b> <b>+0,317±j0,435</b> -0,317±j0,435 0±j0,407 0±j0,625	<b>+1,955;-1,857</b> <b>+0,219±j0,413</b> -0,160±j0,407 -0,455±j0,453 -0,042±j0,624	<b>+0,121±j0,245</b> <b>+0,028±j0,415</b> <b>+0,474±j0,435</b> -0,447±j0,490 -0,248±j0,671	<b>+0,023±j0,071</b> -0,242±j0,214 -0,309±j0,323 -0,425±j0,360 -0,782±j0,497	-0,001±j0,047 -0,272±j0,124 -0,599±j0,192 -0,778±j0,207 -1,745±j0,363
1,00 / 161,05°  (АРВ-СД со средневзв. настройками)*	0,27	<b>+1,778;-1,778</b> <b>+0,294±j0,439</b> -0,294±j0,439 0±j0,417 0±j0,626	<b>+1,839;-1,692</b> <b>+0,195±j0,417</b> -0,160±j0,417 -0,437±j0,458 -0,042±j0,625	<b>+0,113±j0,244</b> <b>+0,031±j0,422</b> <b>+0,459±j0,438</b> -0,431±j0,493 -0,251±j0,672	-0,001±j0,092 -0,247±j0,218 -0,317±j0,333 -0,431±j0,364 -0,785±j0,499	-0,023±j0,059 -0,281±j0,126 -0,638±j0,199 -0,797±j0,209 -1,749±j0,365
1,00 / 144,94°  ( $U_f = \text{const}$ без д.к.)*	0,29	<b>+0,321;-0,321</b> 0±j0,446 0±j0,483 0±j0,491 0±j0,643	-0,600±j0,137 -0,001±j0,434 -0,162±j0,483 -0,274±j0,500 -0,048±j0,642	<b>+0,571±j0,208</b> <b>+0,017±j0,236</b> <b>+0,324±j0,456</b> -0,457±j0,209 -0,261±j0,694	-0,124±j0,179 -0,277±j0,244 -0,377±j0,396 -0,475±j0,392 -0,833±j0,514	-0,171±j0,110 -0,345±j0,140 -0,940±j0,232 -0,901±j0,254 -1,805±j0,381
1,00 / 144,32°  ( $\psi_f = \text{const}$ )*	0,34	0±j0,002 0±j0,445 0±j0,486 0±j0,495 0±j0,644	-0,586±j0,142 -0,006±j0,434 -0,162±j0,485 -0,269±j0,502 -0,049±j0,643	<b>+0,569±j0,211</b> <b>+0,012±j0,236</b> <b>+0,318±j0,457</b> -0,457±j0,209 -0,261±j0,696	-0,127±j0,181 -0,278±j0,244 -0,477±j0,393 -0,379±j0,398 -0,835±j0,515	-0,177±j0,111 -0,347±j0,140 -0,946±j0,233 -0,909±j0,257 -1,808±j0,382

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

Таблица 3.13 – Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения различных моделей ЭЭС при  $P^{(\Gamma 1)} = P^{(\Gamma 2)} = P^{(\Gamma 3)} = P^{(\Gamma 4)} = P^{(\Gamma 5)} = P^{(\Gamma 6)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$  (контролируемое сечение I)

Обменная мощность в сечении I о.е./ угол электропередачи $\gamma_{306-302}$ , градус	Запас мощности в сечении I, %	Позиционная модель ЭЭС $\psi_f = \text{const}$	Нерегулируемая ЭЭС $U_f = \text{const}$	АРВ-ПД	АРВ-СД (со средневзв. настройками)	АРВ-СД (с макс. настройками)
			без д.к. ( $x_{sr d} = \infty ; x_{sr q} = \infty$ )	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$
0,98 / 148,13°  (пределный по сходимости)	1,79	<b>+1,913;-1,913</b> <b>+0,352±j0,465</b> -0,352±j0,465 0±j0,233 0±j0,556	<b>+1,860;-1,965</b> -0,406±j0,249 -0,243±j0,455 -0,469±j0,473 -0,130±j0,554	<b>+1,540;-1,623</b> <b>+0,003±j0,187</b> <b>+0,544±j0,263</b> <b>+0,445±j0,463</b> <b>+0,005±j0,556</b>	<b>+0,816;-0,543</b> -0,215±j0,210 -0,322±j0,287 -0,414±j0,361 -0,491±j0,399	<b>+0,560;-0,349</b> -0,254±j0,123 -0,495±j0,166 -0,798±j0,213 -1,008±j0,241
0,99 / 141,80°  (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,57	<b>+1,011;-1,011</b> <b>+0,348±j0,473</b> -0,348±j0,473 0±j0,227 0±j0,559	<b>+0,953±j0,063</b> <b>+0,238±j0,463</b> -0,480±j0,256 -0,466±j0,480 -0,133±j0,558	<b>+0,355±j0,035</b> <b>+0,620±j0,275</b> <b>+0,442±j0,469</b> <b>+0,003±j0,559</b> -0,013±j0,185	<b>+0,012±j0,055</b> -0,234±j0,221 -0,331±j0,305 -0,421±j0,369 -0,492±j0,404	-0,001±j0,036 -0,281±j0,128 -0,555±j0,178 -0,834±j0,219 -1,023±j0,246
0,99 / 140,91°  (АРВ-СД со средневзв. настройками)*	0,46	<b>+0,851;-0,851</b> <b>+0,346±j0,474</b> -0,346±j0,474 0±j0,229 0±j0,560	<b>+0,910±j0,073</b> <b>+0,235±j0,464</b> -0,484±j0,259 -0,464±j0,481 -0,133±j0,559	<b>+0,360±j0,069</b> <b>+0,625±j0,278</b> <b>+0,440±j0,470</b> <b>+0,003±j0,560</b> -0,016±j0,185	-0,001±j0,069 -0,237±j0,223 -0,333±j0,308 -0,422±j0,370 -0,492±j0,405	-0,012±j0,045 -0,286±j0,129 -0,564±j0,180 -0,840±j0,221 -1,026±j0,247
0,97 / 108,46°  ( $U_f = \text{const}$ без д.к.)*	3,02	<b>+0,129±j0,514</b> -0,129±j0,514 0±j0,276 0±j0,473 0±j0,602	-0,218±j0,275 -0,207±j0,476 -0,280±j0,523 -0,001±j0,500 0,129±j0,601	<b>+0,307±j0,236</b> <b>+0,009±j0,346</b> <b>+0,295±j0,496</b> -0,167±j0,196 -0,003±j0,602	-0,209±j0,223 -0,318±j0,276 -0,471±j0,396 -0,498±j0,418 -0,504±j0,449	-0,284±j0,133 -0,444±j0,158 -0,961±j0,239 -1,106±j0,266 -1,146±j0,305
0,95 / 102,56°  ( $\psi_f = \text{const}$ )*	4,75	0±j0,297 0±j0,504 0±j0,520 0±j0,521 0±j0,613	-0,219±j0,296 -0,045±j0,499 -0,209±j0,510 -0,227±j0,533 -0,128±j0,612	<b>+0,265±j0,247</b> <b>+0,273±j0,499</b> -0,179±j0,199 -0,110±j0,334 -0,006±j0,613	-0,231±j0,238 -0,327±j0,283 -0,486±j0,405 -0,514±j0,461 -0,522±j0,426	-0,325±j0,141 -0,466±j0,162 -1,002±j0,247 -1,152±j0,274 -1,182±j0,320

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

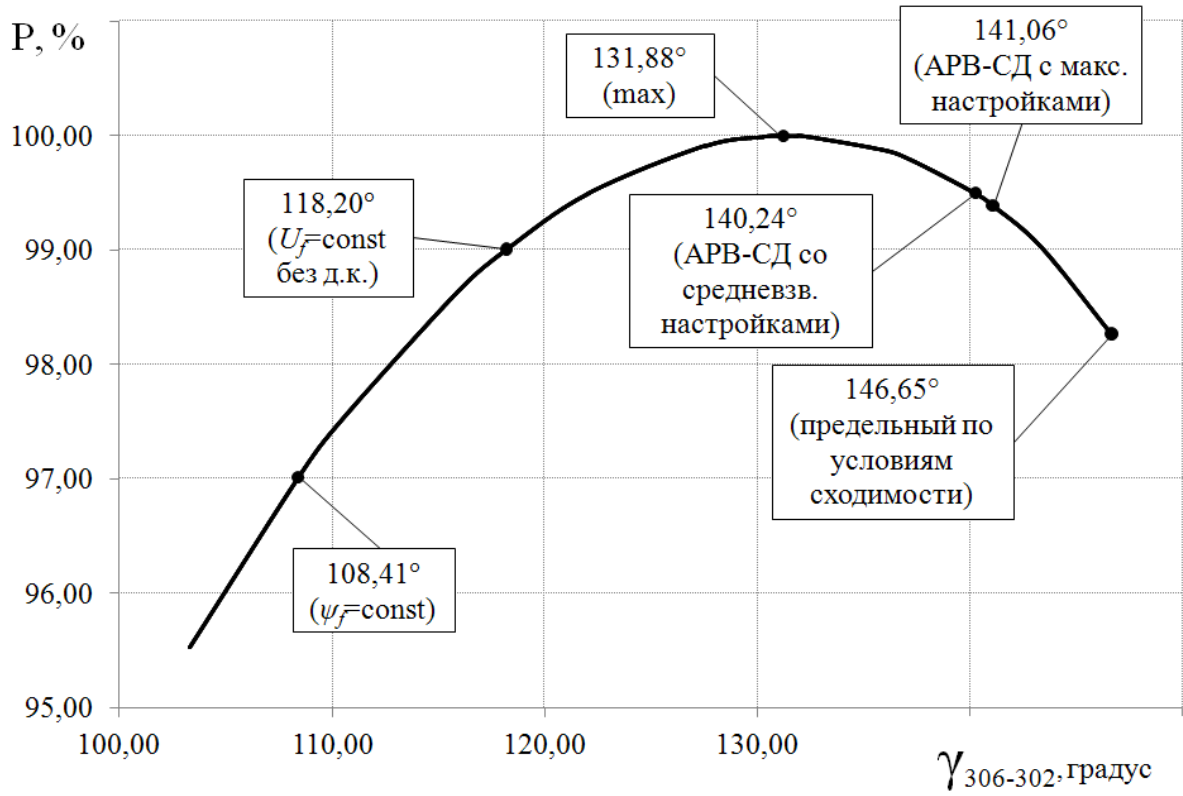


Рисунок 3.17 – Угловая характеристика одноцепной электропередачи при сниженной установленной мощности приемной и передающей частей ОЭС  $P^{(2)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(1)} = P^{(3)} = P^{(4)} = P^{(5)} = P^{(6)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$

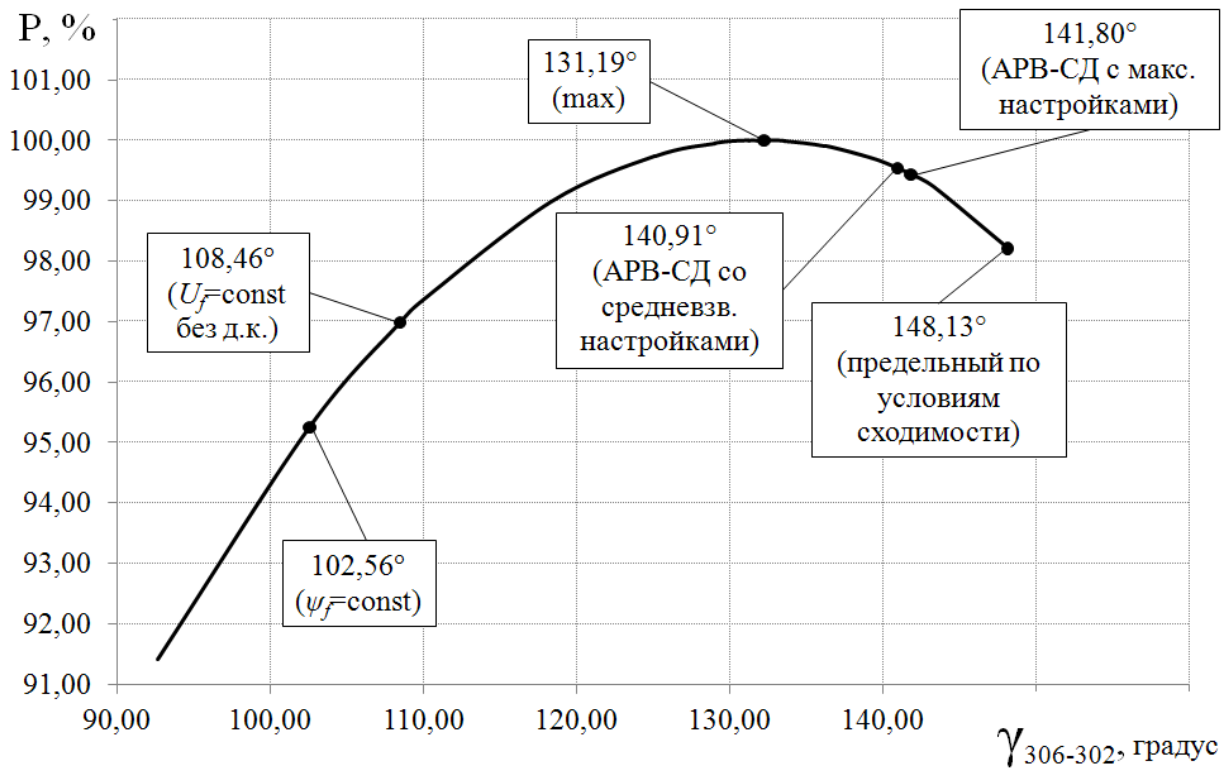


Рисунок 3.18 – Угловая характеристика одноцепной электропередачи при соизмеримых установленных мощностях приемной и передающей частей ОЭС  $P^{(1)} = P^{(2)} = P^{(3)} = P^{(4)} = P^{(5)} = P^{(6)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$



Таблица 3.14 – Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения различных моделей ЭЭС при  $P^{(\Gamma 1)} = P^{(\Gamma 2)} = P^{(\Gamma 3)} = P^{(\Gamma 4)} = P^{(\Gamma 5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}; P^{(\Gamma 6)} = S_{\text{баз}}$  (контролируемое сечение I)

Обменная мощность в сечении I о.е./ угол электропередачи $\gamma_{306-302}$ , градус	Запас мощности в сечении I, %	Позиционная модель ЭЭС $\psi_f = \text{const}$	Нерегулируемая ЭЭС $U_f = \text{const}$	АРВ-ПД	АРВ-СД (со средневзв. настройками)	АРВ-СД (с макс. настройками)
			без д.к. ( $x_{srd} = \infty; x_{srq} = \infty$ )	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$
0,98 / 148,65°  (предельный по сходимости)	1,80	<b>+0,650±j0,207</b> -0,650±j0,207 <b>+0,296±j0,457</b> -0,296±j0,457 0±j0,553	<b>+0,928±j0,192</b> <b>+0,192±j0,444</b> -0,638±j0,266 -0,413±j0,466 -0,132±j0,551	<b>+0,773;-0,948</b> <b>+0,662±j0,300</b> <b>+0,418±j0,456</b> -0,004±j0,188 -0,005±j0,553	<b>+0,614;-0,477</b> -0,218±j0,206 -0,317±j0,273 -0,423±j0,354 -0,495±j0,398	<b>+0,407;-0,304</b> -0,248±j0,120 -0,449±j0,156 -0,770±j0,204 -1,009±j0,239
0,99 / 143,95°  (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,79	<b>+0,700±j0,247</b> -0,700±j0,247 <b>+0,305±j0,462</b> -0,305±j0,462 0±j0,554	<b>+0,823±j0,223</b> <b>+0,201±j0,450</b> -0,710±j0,284 -0,421±j0,472 -0,135±j0,553	<b>+0,124;-0,159</b> <b>+0,691±j0,312</b> <b>+0,425±j0,460</b> -0,009±j0,190 -0,007±j0,554	<b>+0,068;-0,061</b> -0,231±j0,215 -0,323±j0,281 -0,429±j0,358 -0,497±j0,401	-0,002±j0,002 -0,268±j0,125 -0,475±j0,161 -0,793±j0,208 -1,020±j0,241
0,99 / 143,63°  (АРВ-СД со средневзв. настройками)*	0,74	<b>+0,698±j0,249</b> -0,698±j0,249 <b>+0,305±j0,463</b> -0,305±j0,463 0±j0,554	<b>+0,815±j0,225</b> <b>+0,201±j0,451</b> -0,711±j0,285 -0,420±j0,472 -0,135±j0,553	<b>+0,691±j0,313</b> <b>+0,424±j0,461</b> -0,013±j0,020 -0,009±j0,190 -0,007±j0,554	-0,001±j0,018 -0,232±j0,215 -0,324±j0,282 -0,430±j0,359 -0,497±j0,401	-0,003±j0,014 -0,269±j0,125 -0,477±j0,162 -0,795±j0,208 -1,021±j0,241
0,96 / 106,10°  ( $U_f = \text{const}$ без д.к.)*	3,90	<b>+0,065±j0,512</b> -0,065±j0,512 0±j0,296 0±j0,476 0±j0,600	-0,115±j0,292 -0,232±j0,475 -0,001±j0,497 -0,241±j0,526 -0,131±j0,599	<b>+0,150±j0,209</b> <b>+0,096±j0,373</b> <b>+0,304±j0,497</b> -0,146±j0,193 -0,023±j0,601	-0,184±j0,194 -0,329±j0,274 -0,416±j0,374 -0,501±j0,404 -0,579±j0,437	-0,218±j0,116 -0,446±j0,156 -0,830±j0,223 -1,015±j0,245 -1,230±j0,279
0,96 / 104,35°  ( $\psi_f = \text{const}$ )*	4,44	0±j0,298 0±j0,483 0±j0,514 0±j0,514 0±j0,604	-0,124±j0,294 -0,226±j0,481 -0,016±j0,498 -0,230±j0,530 -0,130±j0,602	<b>+0,148±j0,212</b> <b>+0,062±j0,371</b> <b>+0,295±j0,499</b> -0,151±j0,194 -0,024±j0,604	0,189±j0,198 0,332±j0,276 0,420±j0,378 0,503±j0,406 0,585±j0,439	-0,227±j0,118 -0,453±j0,157 -0,845±j0,226 -1,023±j0,247 -1,242±j0,281

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

Таблица 3.15 – Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения упрощенных и полных моделей ЭЭС при  $P^{(T2)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(T1)} = P^{(T3)} = P^{(T4)} = P^{(T5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(T6)} = S_{\text{баз}}$  (контролируемое сечение I)

Обменная мощность в сечении I о.е./ угол электропередачи $\Upsilon_{306-302}$ , градус	Запас мощности в сечении I, %	Позиционная модель ЭЭС $\psi_f = \text{const}$	Нерегулируемая ЭЭС $U_f = \text{const}$	АРВ-ПД	АРВ-СД (со средневзв. настройками)	АРВ-СД (с макс. настройками)
			без д.к. ( $x_{srd} = \infty$ ; $x_{srq} = \infty$ )	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$	д.к. в осях $q, d$
0,98 / 147,14°  (предельный по сходимости)	1,76	<b>+0,533±j0,212</b> -0,533±j0,212 <b>+0,188±j0,472</b> -0,188±j0,472 0±j0,618	<b>+0,833±j0,192</b> <b>+0,068±j0,462</b> -0,577±j0,274 -0,321±j0,480 -0,053±j0,617	<b>+0,755;-0,962</b> <b>+0,622±j0,306</b> <b>+0,312±j0,467</b> -0,020±j0,188 -0,143±j0,649	<b>+0,621;-0,487</b> -0,224±j0,211 -0,332±j0,294 -0,438±j0,371 -0,717±j0,463	<b>+0,411;-0,313</b> -0,259±j0,123 -0,512±j0,169 -0,841±j0,218 -1,558±j0,319
0,99 / 142,68°  (АРВ-СД с макс. настройками)*	0,78	<b>+0,620±j0,251</b> -0,620±j0,251 <b>+0,200±j0,479</b> -0,200±j0,479 0±j0,616	<b>+0,736±j0,225</b> <b>+0,080±j0,470</b> -0,652±j0,289 -0,330±j0,486 -0,054±j0,615	<b>+0,649±j0,317</b> <b>+0,317±j0,473</b> -0,031±j0,189 -0,226±j0,513 -0,153±j0,648	<b>+0,070;-0,069</b> -0,236±j0,219 -0,338±j0,302 -0,445±j0,376 -0,716±j0,463	-0,003±j0,003 -0,278±j0,127 -0,538±j0,174 -0,865±j0,221 -1,562±j0,320
0,99 / 142,57°  (АРВ-СД со средневзв. настройками)*	0,76	<b>+0,619±j0,252</b> -0,619±j0,252 <b>+0,200±j0,479</b> -0,200±j0,479 0±j0,616	<b>+0,733±j0,226</b> <b>+0,080±j0,470</b> -0,653±j0,290 -0,330±j0,486 -0,054±j0,615	<b>+0,649±j0,317</b> <b>+0,317±j0,473</b> -0,031±j0,189 -0,225±j0,513 -0,153±j0,648	-0,001±j0,007 -0,237±j0,219 -0,338±j0,302 -0,445±j0,376 -0,716±j0,463	-0,005±j0,009 -0,278±j0,127 -0,539±j0,174 -0,866±j0,222 -1,399±j0,320
0,99 / 117,36°  ( $U_f = \text{const}$ без д.к.)*	1,22	<b>+0,037±j0,511</b> -0,037±j0,511 0±j0,303 0±j0,406 0±j0,653	-0,001±j0,293 -0,282±j0,412 -0,052±j0,497 -0,223±j0,523 -0,056±j0,652	<b>+0,159±j0,192</b> <b>+0,365±j0,370</b> <b>+0,244±j0,494</b> -0,162±j0,193 -0,182±j0,695	-0,158±j0,175 -0,320±j0,267 -0,389±j0,354 -0,481±j0,403 -0,833±j0,496	-0,180±j0,105 -0,422±j0,152 -0,737±j0,208 -0,991±j0,244 -1,706±j0,356
0,99 / 116,61°  ( $\psi_f = \text{const}$ )*	1,35	0±j0,303 0±j0,411 0±j0,512 0±j0,512 0±j0,655	-0,013±j0,294 -0,274±j0,416 -0,057±j0,497 -0,219±j0,524 -0,056±j0,654	<b>+0,161±j0,193</b> <b>+0,351±j0,371</b> <b>+0,241±j0,495</b> -0,165±j0,193 -0,182±j0,697	-0,161±j0,177 -0,322±j0,268 -0,391±j0,356 -0,482±j0,403 -0,838±j0,497	-0,184±j0,107 -0,426±j0,153 -0,744±j0,209 -0,995±j0,245 -1,712±j0,358

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

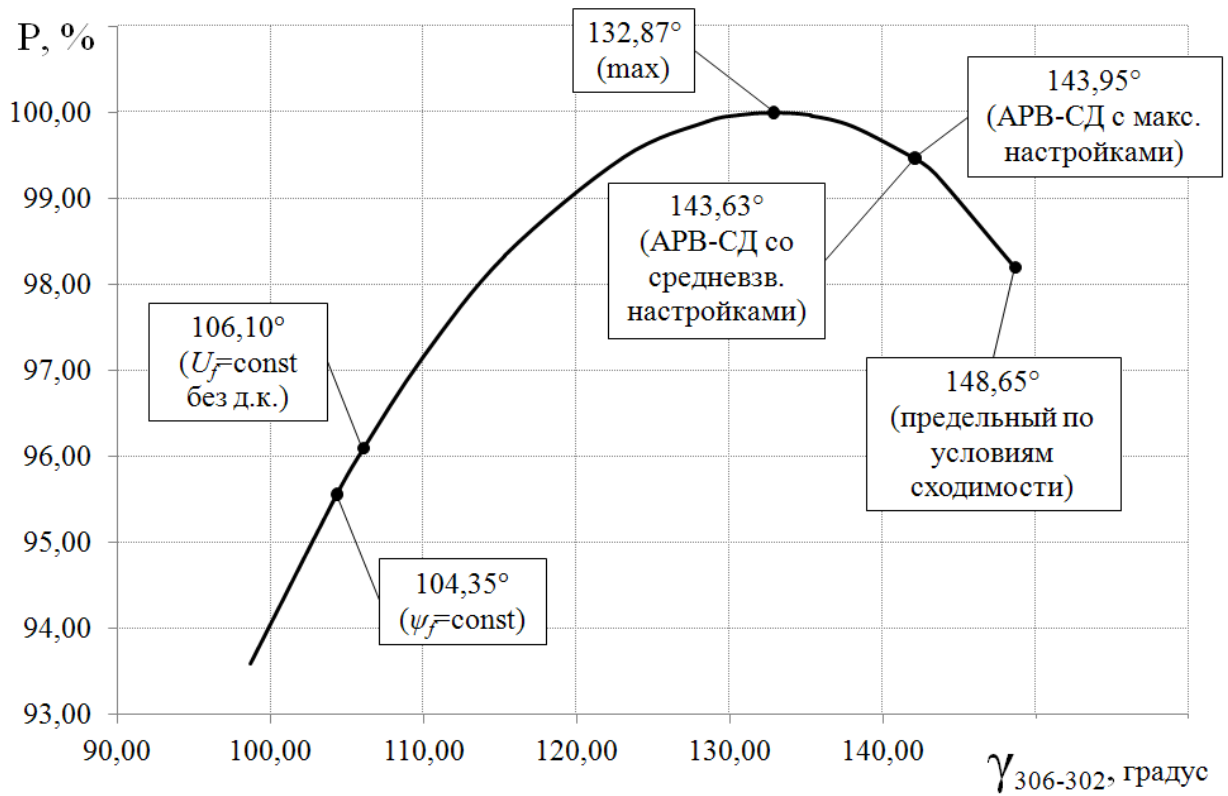


Рисунок 3.19 – Угловая характеристика одноцепной электропередачи при увеличенной установленной мощности передающей части ОЭС  
 $P^{(T1)} = P^{(T2)} = P^{(T3)} = P^{(T4)} = P^{(T5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}; P^{(T6)} = S_{\text{баз}}$

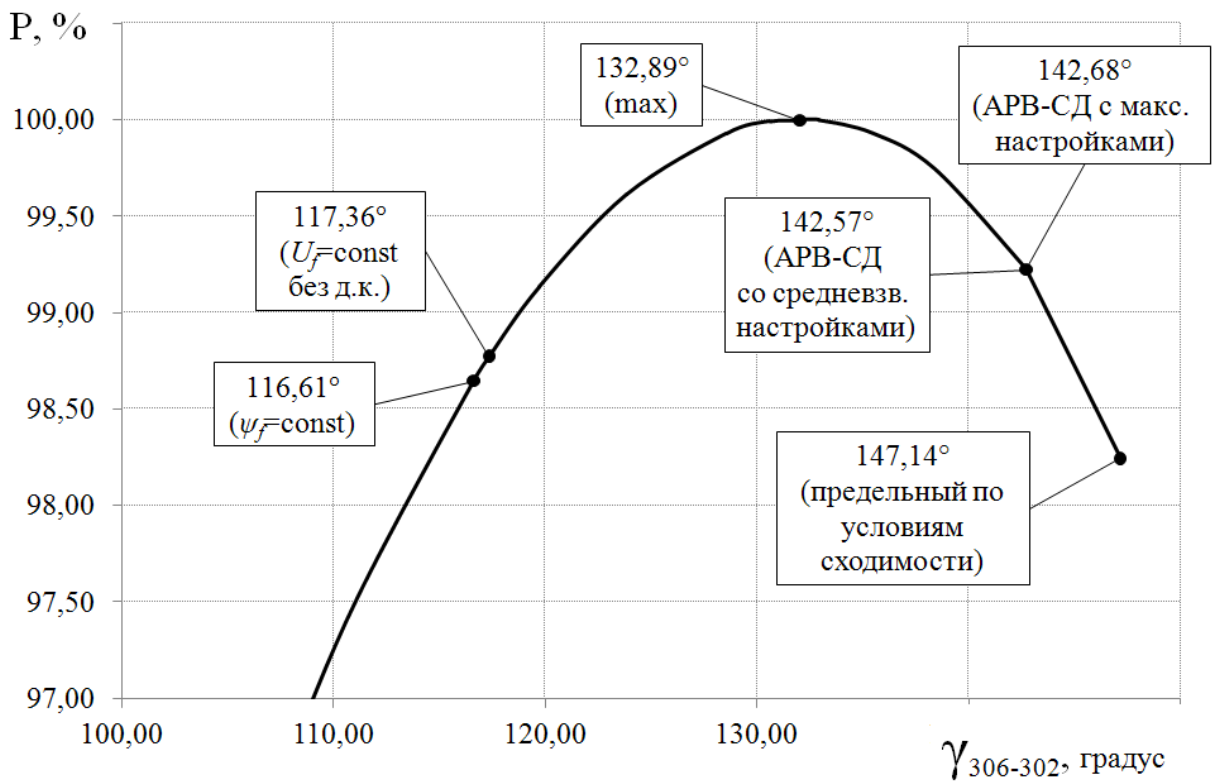


Рисунок 3.20 – Угловая характеристика одноцепной электропередачи при четырехкратном соотношении установленной мощности приемной и передающей частей ОЭС  
 $P^{(T2)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}; P^{(T1)} = P^{(T3)} = P^{(T4)} = P^{(T5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}; P^{(T6)} = S_{\text{баз}}$

При средневзвешенных, неоптимальных настройках АРВ-СД предельный по передаваемой мощности режим находится в зоне искусственной устойчивости (запас 0,50% таблица 3.11; 0,27% таблица 3.12; 0,46% таблица 3.13; 0,74% таблица 3.14; 0,76% таблица 3.15). Следует отметить, что усиление стабилизации не приводит к существенному увеличению предела по передаваемой мощности (увеличение запаса на 0,10% таблица 3.11; 0,11% таблица 3.13; 0,05% таблица 3.14, 0,02% таблица 3.15 по сравнению с границей области устойчивости при средневзвешенных настройках АРВ-СД).

Обобщая результаты исследований разделов 3.1 и 3.2 можно заключить нижеследующие тезисы. Во всех исследуемых схемах электропередачи независимо от структуры и расчетных условий граница области потенциально устойчивых режимов находится вблизи максимума угловой характеристики (запас до 10%) и отвечает представлению эквивалентных генераторов при постоянстве напряжения возбуждения ( $U_f = \text{const}$ ). Полученные значения запаса по передаваемой мощности характеризуют наибольшее использование (допустимую по условиям устойчивости загрузку) электропередачи. При этом система является стабилизируемой во всей найденной области, включая схемно-режимные условия с нормативными (не указаны в таблицах) коэффициентами запаса.

Введение стабилизации в систему управления возбуждением позволяет несущественно (не более чем на 0,02%...6,9%) расширить область устойчивости относительно искомой границы потенциально устойчивых режимов. Однако в этом случае величина запаса составляет от 0,05% до 0,50%, что также не удовлетворяет нормативным требованиям.

### 3.3 Выводы

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. Расчетными исследованиями установлено, что во всех исследуемых схемно-режимных условиях независимо от структуры и жесткости электропередачи нарушение колебательной устойчивости энергосистемы происходит до границы области апериодической устойчивости.

3. 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.

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

5. Введение интенсивного управления со средневзвешенными (неоптимальными) настройками регуляторов возбуждения сильного действия синхронных машин позволяет стабилизировать систему во всей найденной области потенциально устойчивых режимов, а также вплоть до зоны искусственной устойчивости. В отдельных случаях для достижения этой зоны требуется усиление стабилизации до максимальных значений коэффициентов без решения задачи их оптимизации.

## **4 ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО КРИТЕРИЯ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ**

Поиск области потенциально устойчивых (стабилизируемых в колебательном отношении) режимов, как показано в предыдущем разделе, может быть выполнен с привлечением упрощенных моделей объединенных энергосистем. Структурный подход к исследованию динамических свойств энергообъединений, предложенный в [67, 69, 74, 75], позволяет на предварительном этапе анализа без детального математического моделирования определить область потенциально устойчивых режимов. Распознавание режимов, в которых регулируемая ЭЭС является потенциально устойчивой, позволяет значительно сократить объем первоначальных расчетов для определения слабых межсистемных связей и предельных по условиям колебательной устойчивости режимов [30]. Применение позиционной модели не позволяет качественно определять область потенциально устойчивых режимов энергосистем произвольной структуры, поэтому настоящие поисковые исследования аналитического критерия колебательного нарушения статической устойчивости являются продолжением работ в этом направлении.

### **4.1 Исследование характера изменения свободного члена характеристического уравнения системы электропередачи цепочечной структуры**

Существующим критерием аperiodического нарушения устойчивости является равенство нулю свободного члена характеристического уравнения системы. Расчет статической устойчивости основывается при этом на анализе

знака свободного члена характеристического уравнения в ходе постепенного утяжеления режима. Необходимым и достаточным условием сохранения устойчивости является отрицательный знак всех вещественных частей корней характеристического уравнения.

В данном исследовании первоначально выполнялся численный анализ корней, отвечающих электромеханическим составляющим движения, для которого были выявлены признаки апериодического или колебательного нарушения устойчивости. Задача исследования устойчивости в данной постановке не может быть решена с применением традиционных подходов и требует поиска и теоретического обоснования качественно новых, структурных критериев устойчивости электроэнергетических систем. В данной главе формулируются требования к качественным критериям с последующим численным обоснованием предлагаемого критерия колебательного нарушения статической устойчивости.

Подтверждение сформулированных тезисов о признаках нарушения статической устойчивости ОЭС различной структуры (Глава 3) производится в результате численного анализа свободного члена  $A_n$ , вычисляемого как определитель матрицы частных производных системы линеаризованных дифференциальных уравнений (1.55), (1.58).

В ходе исследования рассматривались схемы цепочечной структуры с протяженными межсистемными связями при вариации их жесткости и установленных мощностей эквивалентов энергообъединений. Величина и направление обменной мощности, а также параметры генераторов и их систем возбуждения указаны в разделе 3.1. Информация об используемых моделях нагрузки, силового оборудования и принятых упрощенных моделях ЭЭС также изложена в разделе 3.1.

Нарушение устойчивости при утяжелении режима в позиционной модели, как было отмечено в предыдущем разделе, имеет апериодический

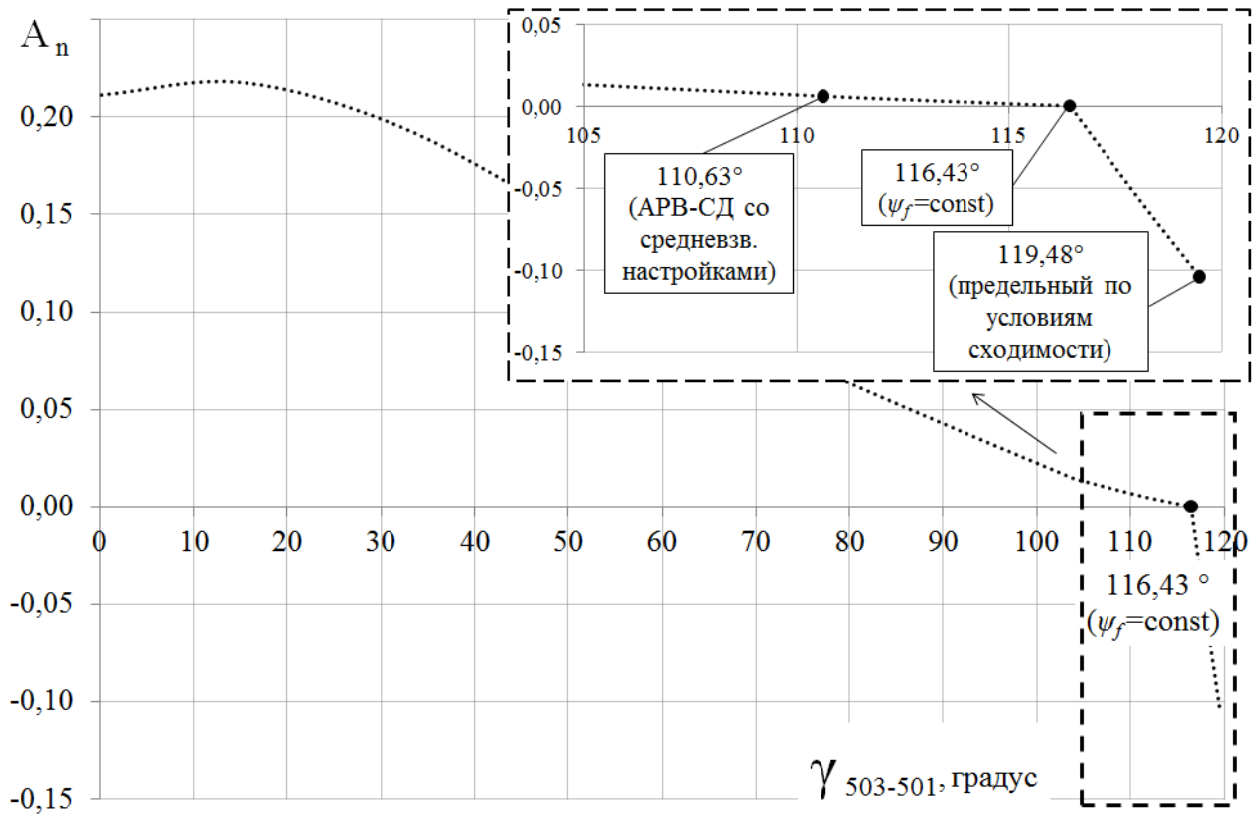


Рисунок 4.1 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для позиционной ( $\psi_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС  $P^{(T1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(T2)} = P^{(T3)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$  (одноцепное исполнение)

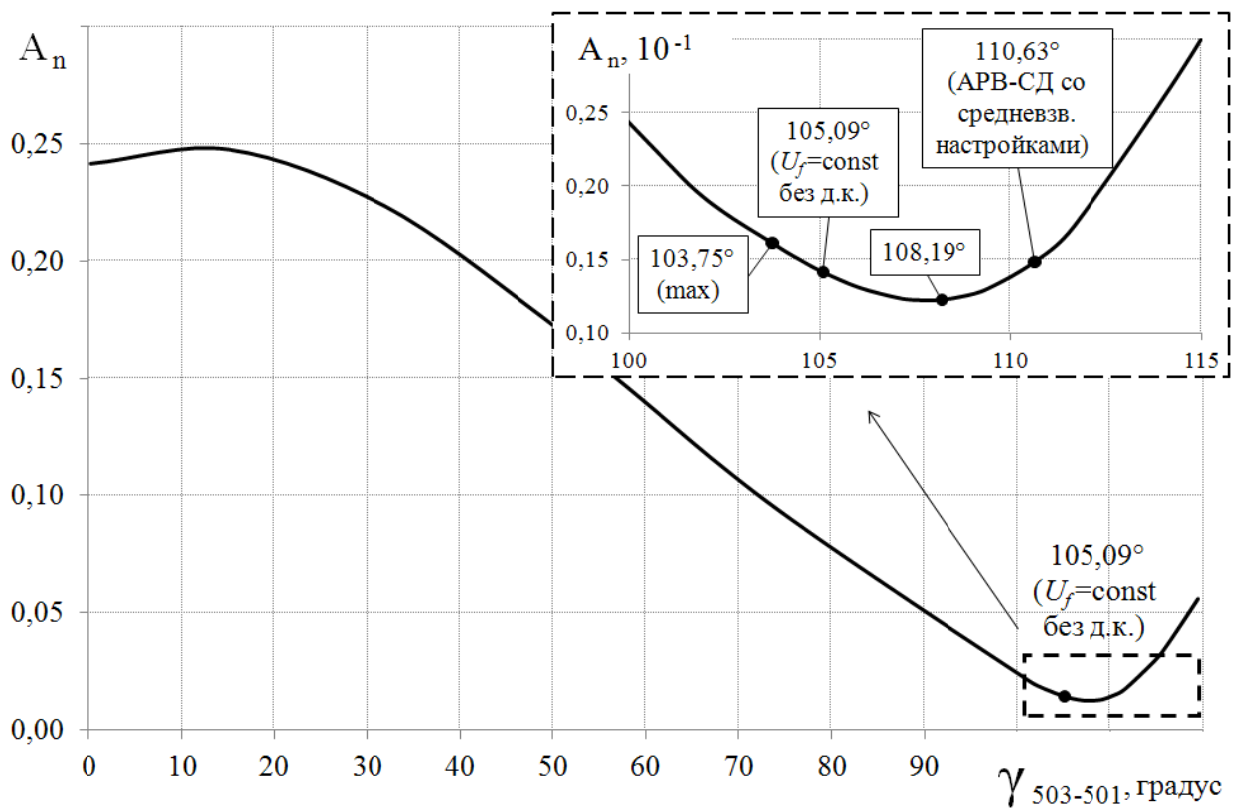


Рисунок 4.2 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для нерегулируемой ( $U_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС  $P^{(T1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(T2)} = P^{(T3)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$  (одноцепное исполнение)



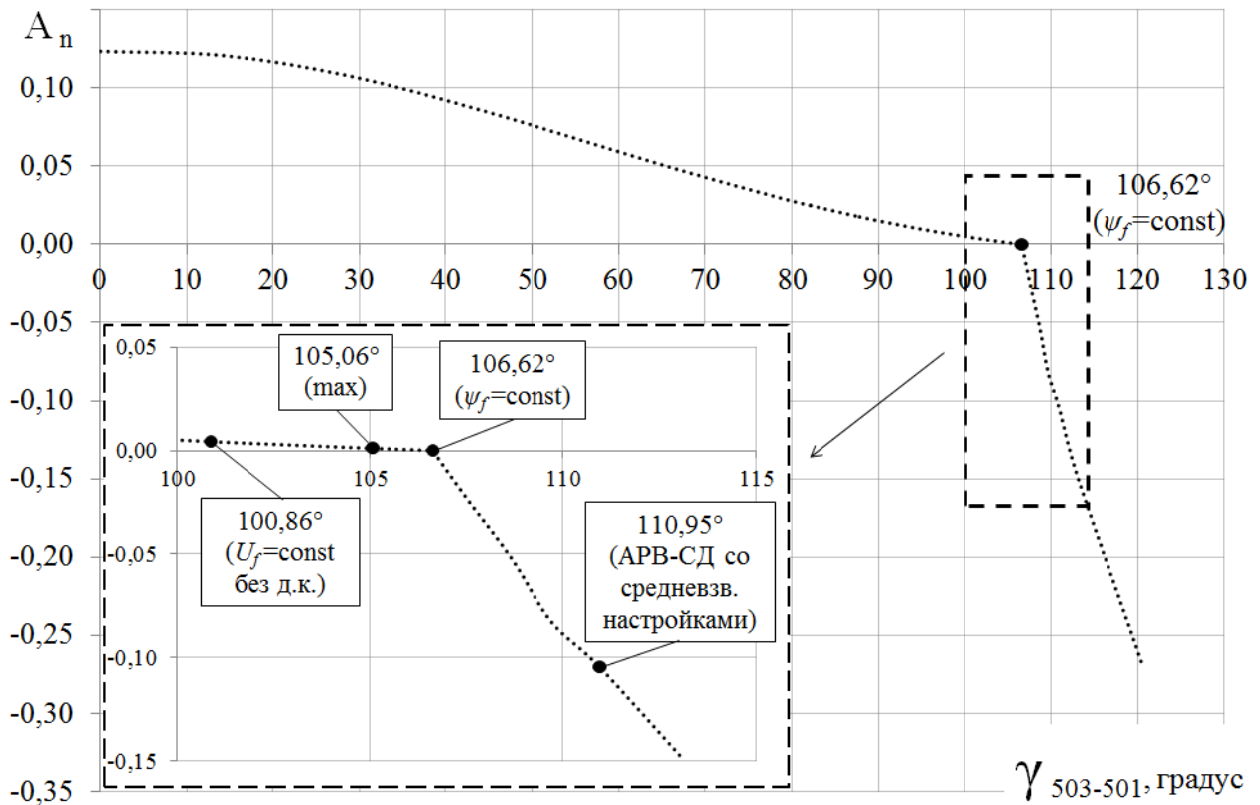


Рисунок 4.3 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для позиционной ( $\psi_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС  $P_{\text{ном}}^{(\Gamma 1)} = P_{\text{ном}}^{(\Gamma 2)} = P_{\text{ном}}^{(\Gamma 3)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$  (одноцепное исполнение)

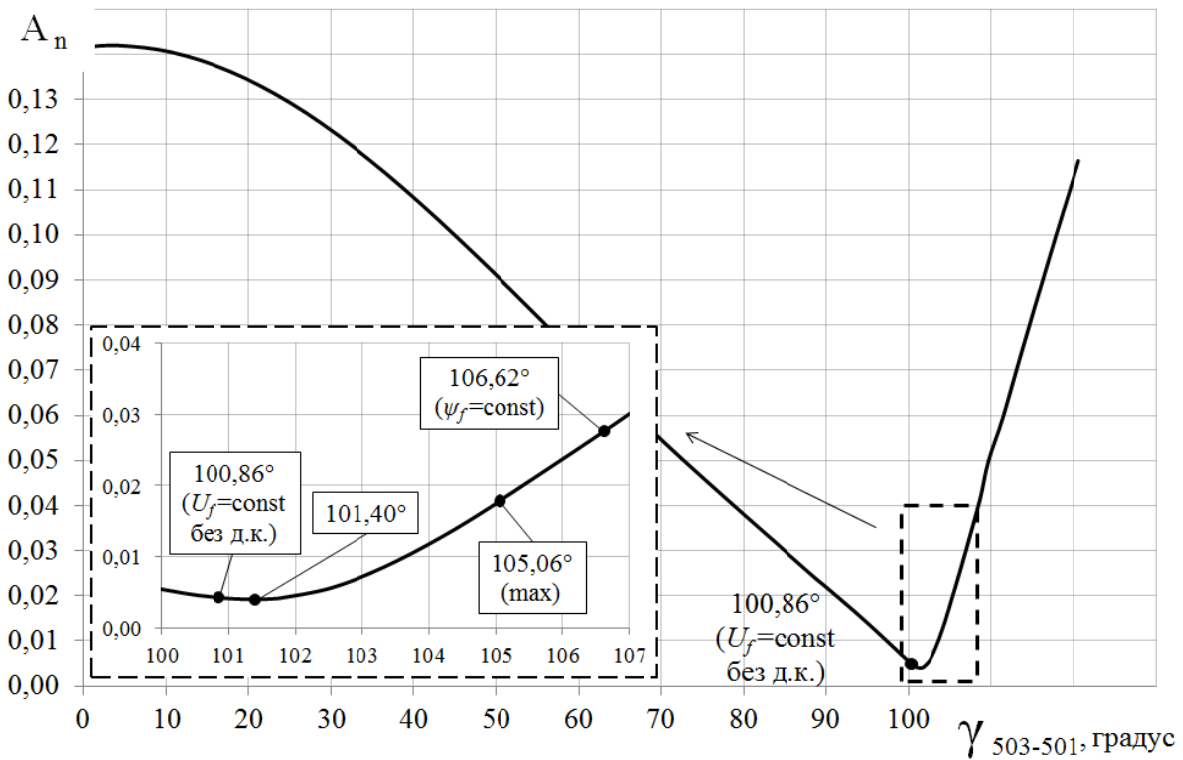


Рисунок 4.4 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для нерегулируемой ( $U_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС  $P^{(\Gamma 1)} = P^{(\Gamma 2)} = P^{(\Gamma 3)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$  (одноцепное исполнение)

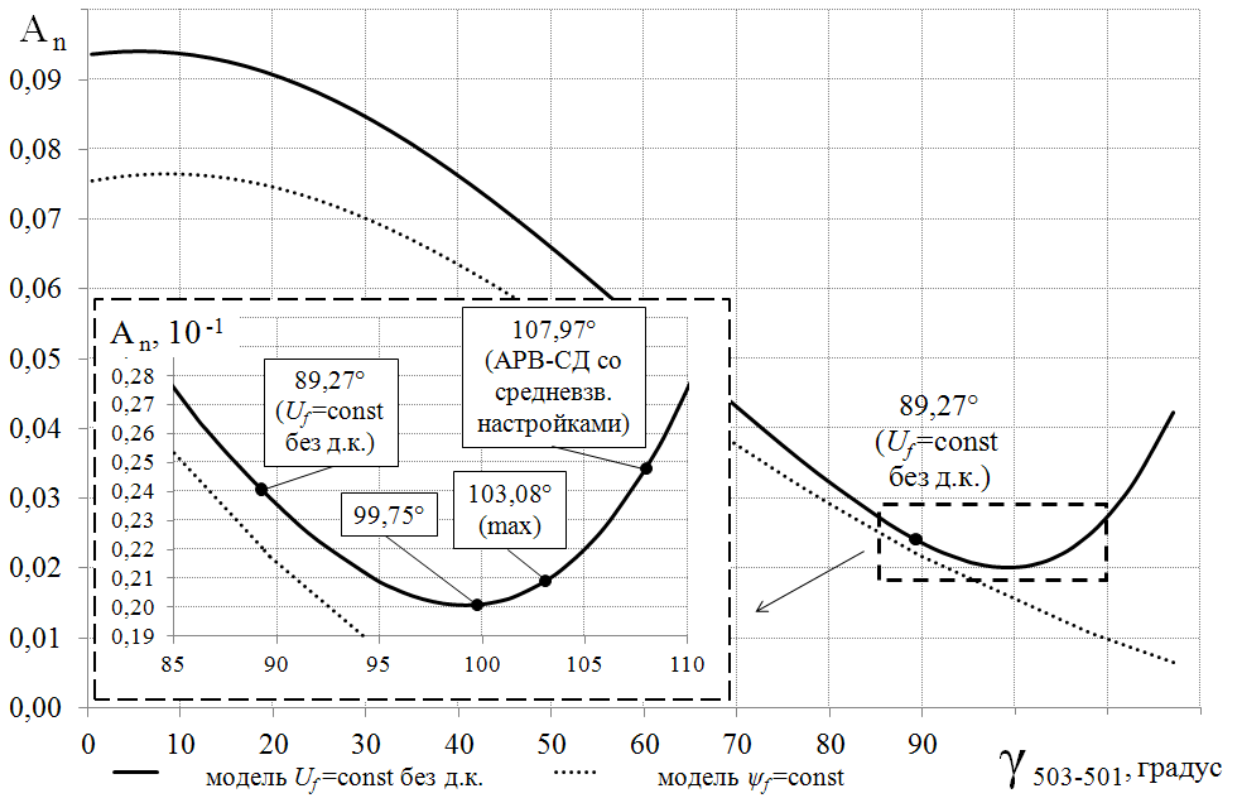


Рисунок 4.5 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы в процессе утяжеления режима ЭЭС  $P^{(I)} = P^{(II)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(III)} = S_{\text{баз}}$  (одноцепное исполнение)

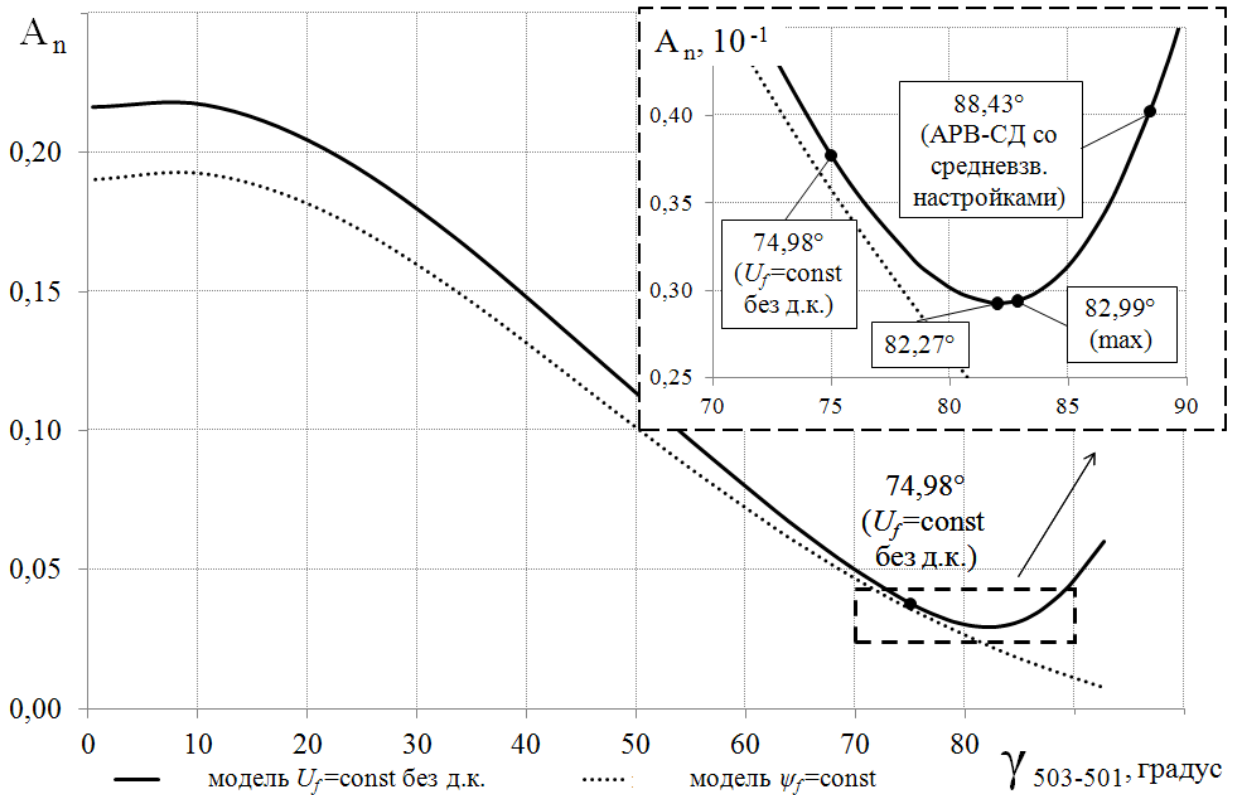


Рисунок 4.6 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы в процессе утяжеления режима ЭЭС  $P^{(I)} = P^{(II)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(III)} = S_{\text{баз}}$  (двухцепное исполнение)

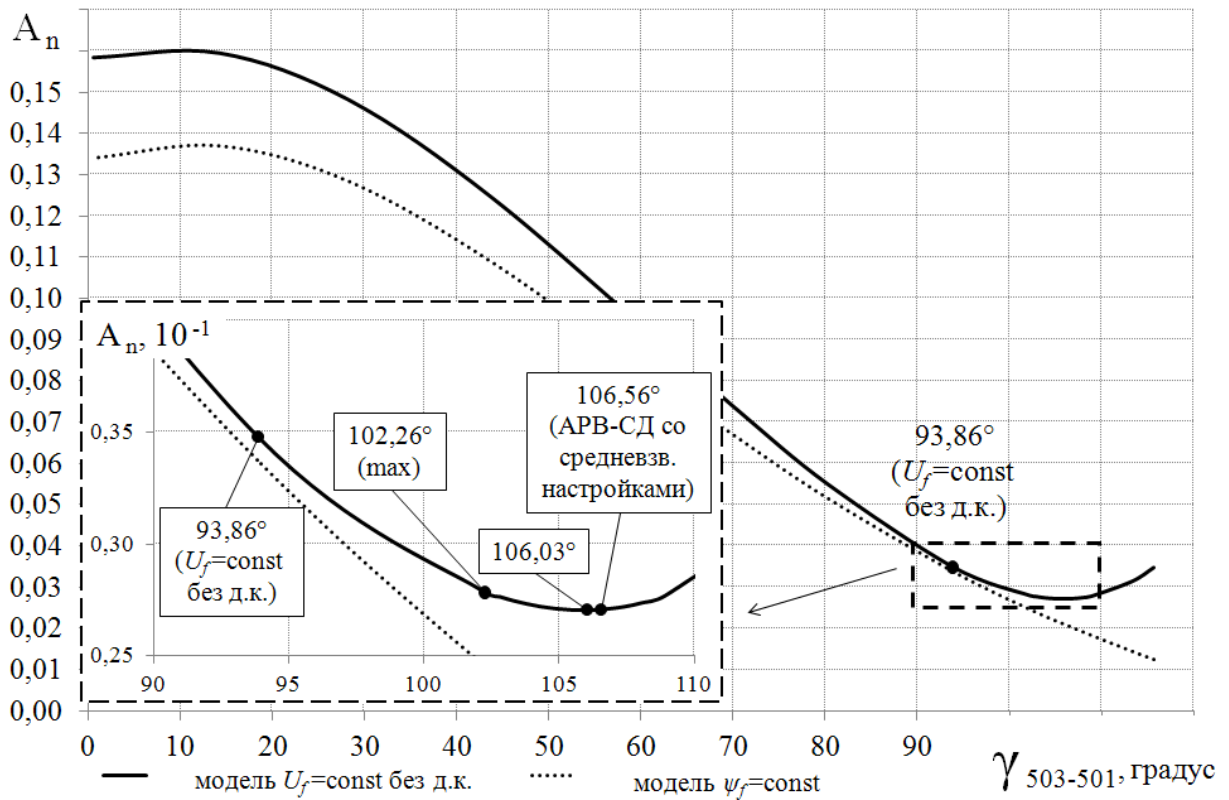


Рисунок 4.7 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы в процессе утяжеления режима ЭЭС  $P^{(1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(2)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(3)} = S_{\text{баз}}$  (одноцепное исполнение)

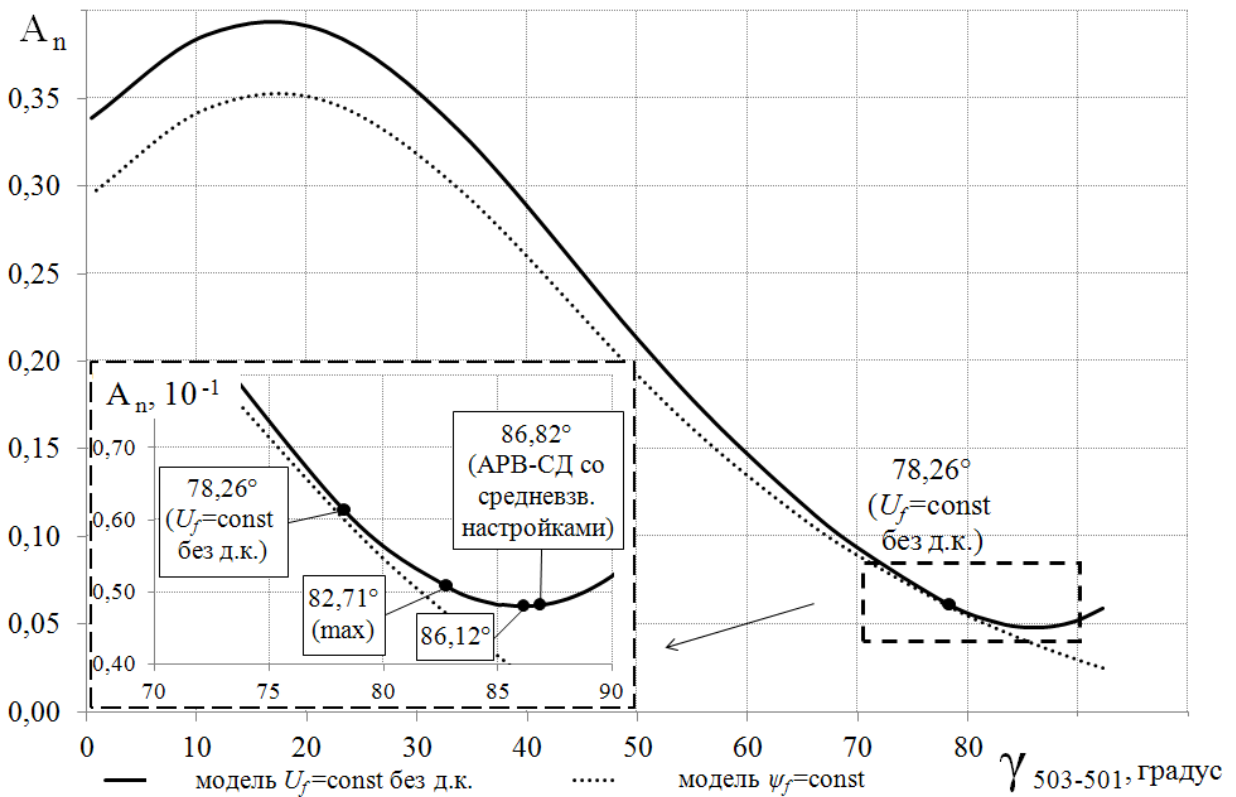


Рисунок 4.8 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы в процессе утяжеления режима ЭЭС  $P^{(1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(2)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(3)} = S_{\text{баз}}$  (двухцепное исполнение)

характер и сопровождается распадом пары комплексно-сопряженных корней на два действительных корня. Экстремумы представленных на рисунках 4.1 и 4.3 характеристик отвечают границе области устойчивости, определенной при постоянстве потокосцеплений контуров ротора  $\psi_f = \text{const}$ , и соответствуют переходу через нуль свободного члена  $A_n$ . Границы области потенциально устойчивых режимов, определенные согласно предложенному структурному критерию (рисунки 4.1 и 4.3) находятся правее максимума угловой характеристики (рисунок 3.2 и 3.3) и отвечают малым значениям запаса.

При представлении эквивалентных генераторов нерегулируемой моделью ( $U_f = \text{const}$ ) нарушение устойчивости сопровождается образованием колебательной пары. Область потенциально устойчивых режимов, определенная таким образом, находится левее минимума характеристики, представленной на рисунках 4.2, 4.4 - 4.8. Граница области устойчивости в этом случае не характеризуется сменой знака свободного члена.

Как было показано в предыдущем разделе, область устойчивости, определенная с помощью позиционной модели ( $\psi_f = \text{const}$ ) в трехмашинной схеме при двукратном и четырехкратном соотношении установленных мощностей передающей и приемной частей ОЭС включает в себя предельный по условиям сходимости режим, а ее граница располагается относительно него в некотором отдалении (невозможно определить расчетным способом). На рисунках 4.5 - 4.8 пунктиром показано изменение свободного члена в процессе утяжеления режима электропередачи при позиционном представлении ЭЭС. При углах электропередачи более  $70^\circ$  экстремумы на указанных характеристиках отсутствуют, указанную границу, как отмечалось в предыдущем разделе, невозможно определить расчетным способом.

Таблица 4.1 – Предельные по передаваемой мощности режимы трехмашинной электропередачи цепочечной структуры

Расчетные соотношения	Максимум угловой характеристики, МВт / угол электропередачи, градус	Позиционная модель ЭЭС $\psi_f = \text{const}$		Нерегулируемая ЭЭС $U_f = \text{const}$	
		Предельная передаваемая мощность, % / угол электропередачи, градус	Мощность при $\partial A_n / \partial \delta_{отн} = 0$ , % / угол электропередачи, градус	Предельная передаваемая мощность, % / угол электропередачи, градус	Мощность при $\partial A_n / \partial \delta_{отн} = 0$ , % / угол электропередачи, градус
Одноцепное исполнение (рисунок 3.1)					
$P_{ном}^{(\Gamma 1)} = 0,25 \cdot S_{баз}$ ; $P_{ном}^{(\Gamma 2)} = P_{ном}^{(\Gamma 3)} = 0,5 \cdot S_{баз}$	840 / 103,75°	98,70 / 116,43°	98,70 / 116,43°	99,99 / 105,09°	99,85 / 108,19°
$P_{ном}^{(\Gamma 1)} = P_{ном}^{(\Gamma 2)} = P_{ном}^{(\Gamma 3)} = 0,5 \cdot S_{баз}$	828 / 105,06°	99,96 / 106,62°	99,96 / 106,62°	99,90 / 100,86°	99,93 / 101,40°
$P_{ном}^{(\Gamma 1)} = P_{ном}^{(\Gamma 2)} = 0,5 \cdot S_{баз}$ ; $P_{ном}^{(\Gamma 3)} = S_{баз}$	779 / 103,08°	—	—	98,25 / 89,27°	99,90 / 99,75°
$P_{ном}^{(\Gamma 1)} = 0,25 \cdot S_{баз}$ ; $P_{ном}^{(\Gamma 2)} = 0,5 \cdot S_{баз}$ ; $P_{ном}^{(\Gamma 3)} = S_{баз}$	789 / 102,26°	—	—	99,33 / 93,86°	99,87 / 106,03°
Двухцепное исполнение (рисунок 3.4)					
$P_{ном}^{(\Gamma 1)} = P_{ном}^{(\Gamma 2)} = 0,5 \cdot S_{баз}$ ; $P_{ном}^{(\Gamma 3)} = S_{баз}$	1416 / 82,99°	—	—	99,22 / 74,98°	99,99 / 82,27°
$P_{ном}^{(\Gamma 1)} = 0,25 \cdot S_{баз}$ ; $P_{ном}^{(\Gamma 2)} = 0,5 \cdot S_{баз}$ ; $P_{ном}^{(\Gamma 3)} = S_{баз}$	1439 / 82,71°	—	—	99,77 / 78,26°	99,86 / 86,12°

Граница области устойчивости в позиционной модели ( $\psi_f = \text{const}$ ), определяемая на основе смены знака свободного члена, будет включать в себя режимы, характеризующиеся неустойчивым состоянием регулируемой ЭЭС с интенсивным управлением (рисунок 4.1, 4.5 - 4.8).

В то время как граница области устойчивости действительной ЭЭС с интенсивным управлением возбуждением синхронных машин АРВ-СД находится правее минимума характеристик, представленных для нерегулируемой модели ( $U_f = \text{const}$ ) на рисунках 4.2, 4.4 - 4.8. Это позволяет сделать предположение, что в качестве определяющего критерия колебательного нарушения статической устойчивости может быть использован переход через нуль частной производной  $\partial A_n / \partial \delta = 0$ .

В таблице 4.1 представлены результаты сопоставления предельных по условиям устойчивости режимов в упрощенных моделях и режимов, отвечающих минимуму характеристик  $A_n = f(\delta_{\text{отн}})$ . Применение предложенного критерия нарушения устойчивости позволяет снизить величину запаса по обменной мощности от 0,09% (1,3 МВт) (в двухцепных электропередачах с четырехкратным соотношением мощностей) до 0,65% (5,1 МВт) (для одноцепных электропередач с двухкратным соотношением мощностей) по сравнению с запасами, определенными для нерегулируемой модели ( $U_f = \text{const}$ ).

С целью обобщения полученных ранее критериев применения упрощенных моделей выполнено исследование характера изменения свободного члена  $A_n$  и в эквивалентной пятимашинной схеме. Сопоставительный анализ динамических свойств эквивалентной пятимашинной схемы электропередачи выявил некоторые отличительные особенности.

Граница области устойчивости, определенная с помощью предлагаемых упрощенных моделей вне зависимости от соотношения установленных мощностей приемной и передающей частей энергообъединения, не характеризуется сменой знака свободного члена.

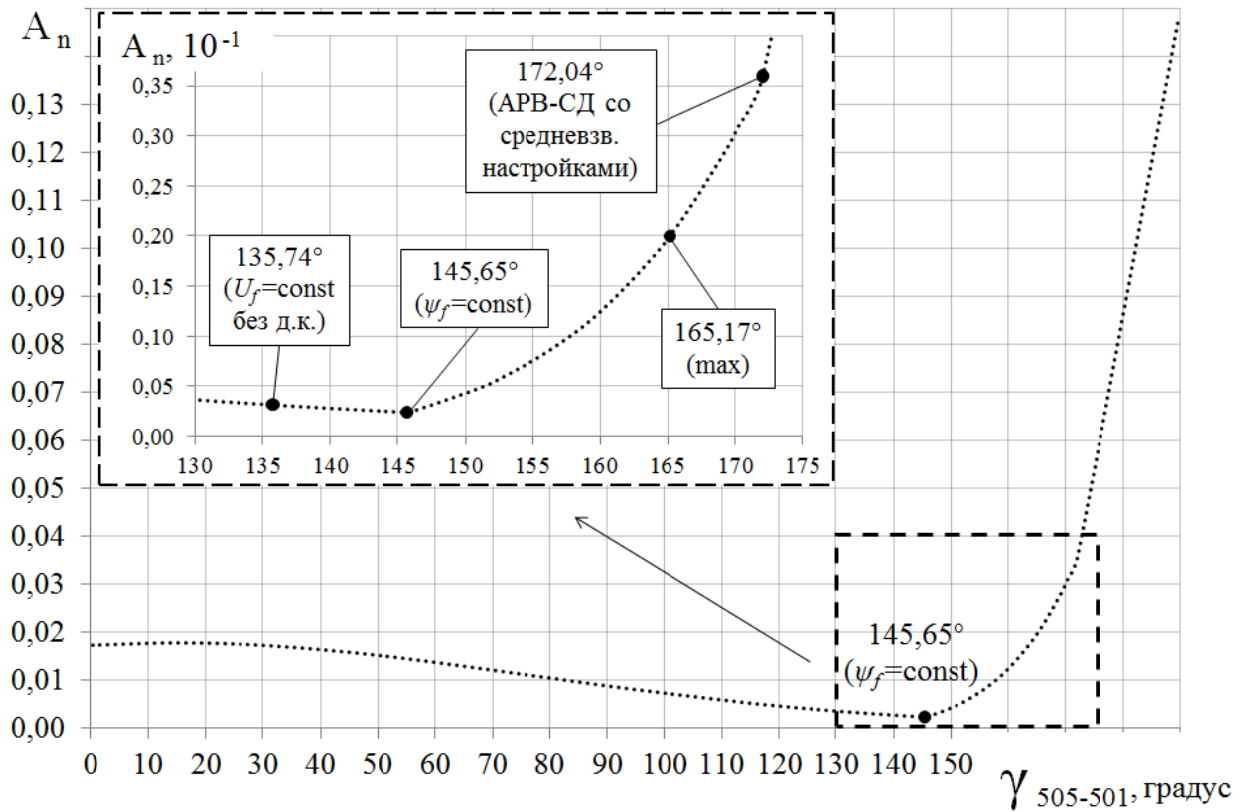


Рисунок 4.9 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для позиционной ( $\psi_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС  $P^{(T1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(T2)} = P^{(T3)} = P^{(T4)} = P^{(T5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$  (одноцепное исполнение)

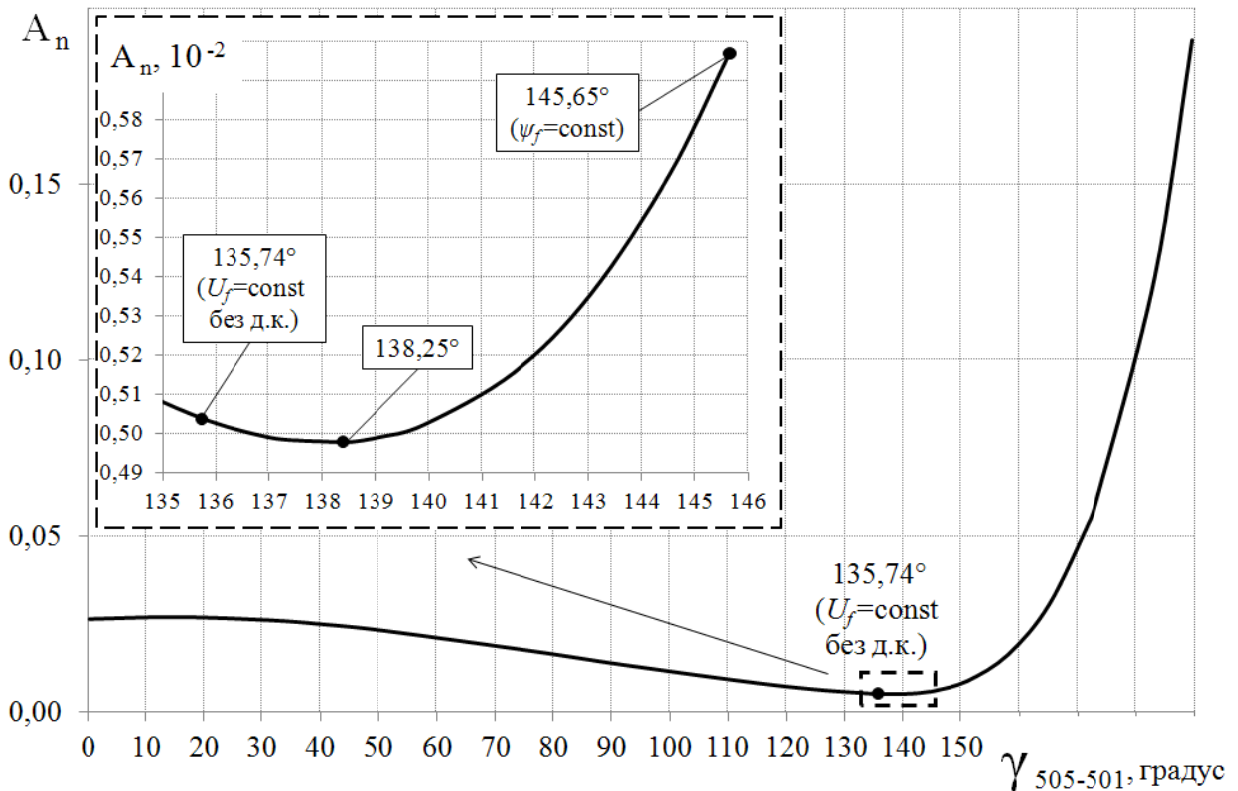


Рисунок 4.10 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для нерегулируемой ( $U_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС  $P^{(T1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(T2)} = P^{(T3)} = P^{(T4)} = P^{(T5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$  (одноцепное исполнение)

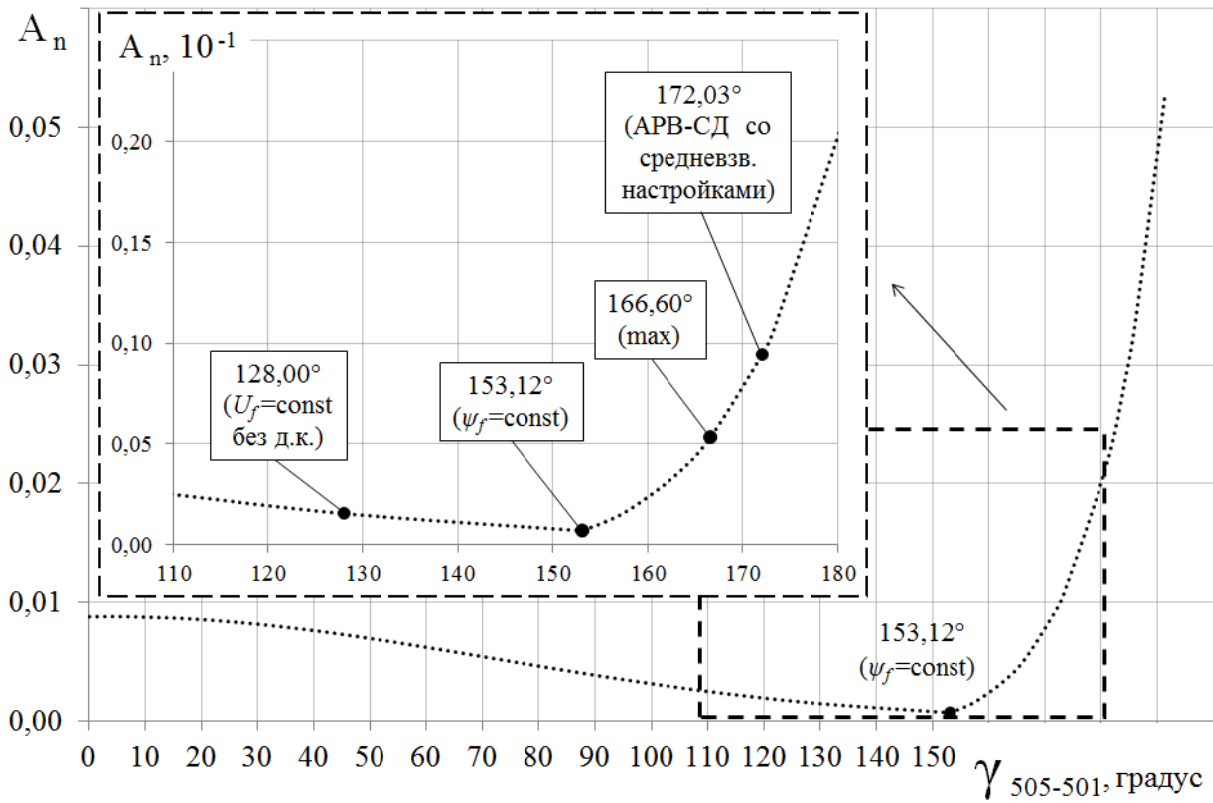


Рисунок 4.11 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для позиционной ( $\psi_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС  $P^{(\Gamma 1)} = P^{(\Gamma 2)} = P^{(\Gamma 3)} = P^{(\Gamma 4)} = P^{(\Gamma 5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$  (одноцепное исполнение)

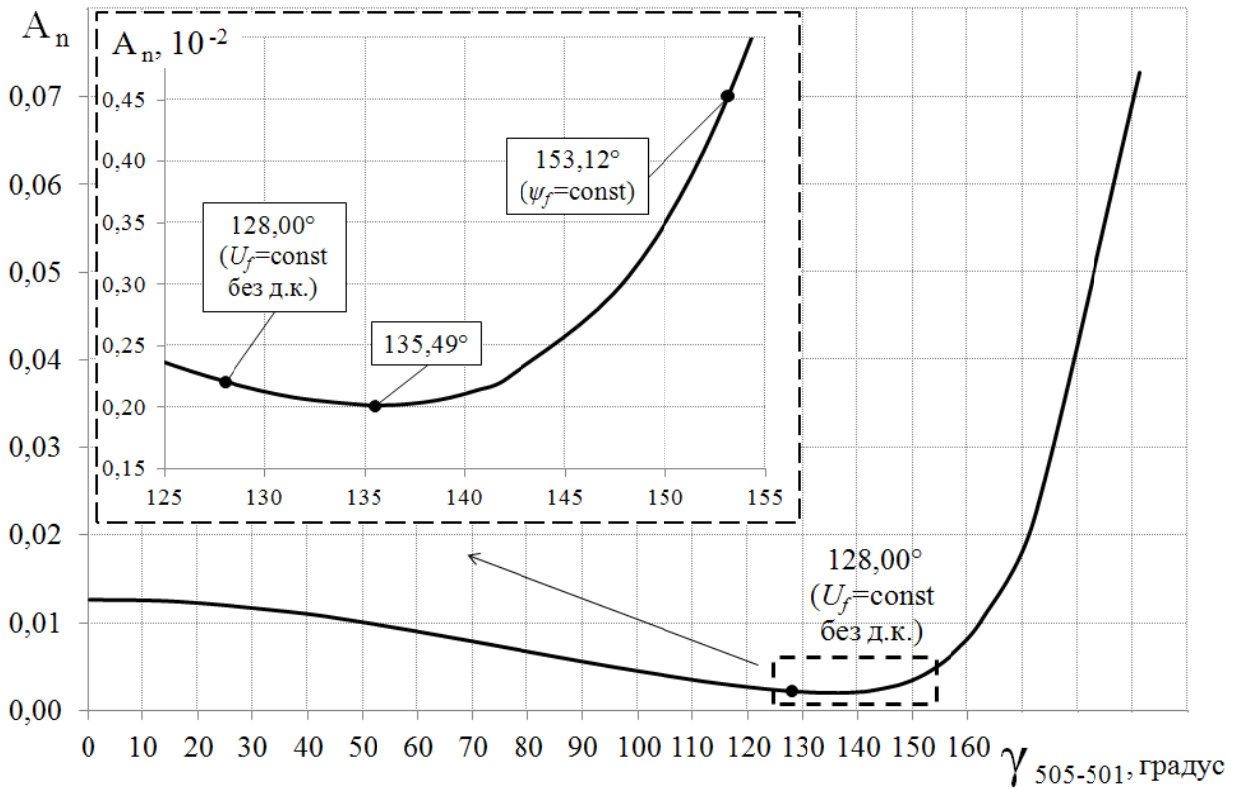


Рисунок 4.12 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для нерегулируемой ( $U_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС  $P^{(\Gamma 1)} = P^{(\Gamma 2)} = P^{(\Gamma 3)} = P^{(\Gamma 4)} = P^{(\Gamma 5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$  (одноцепное исполнение)



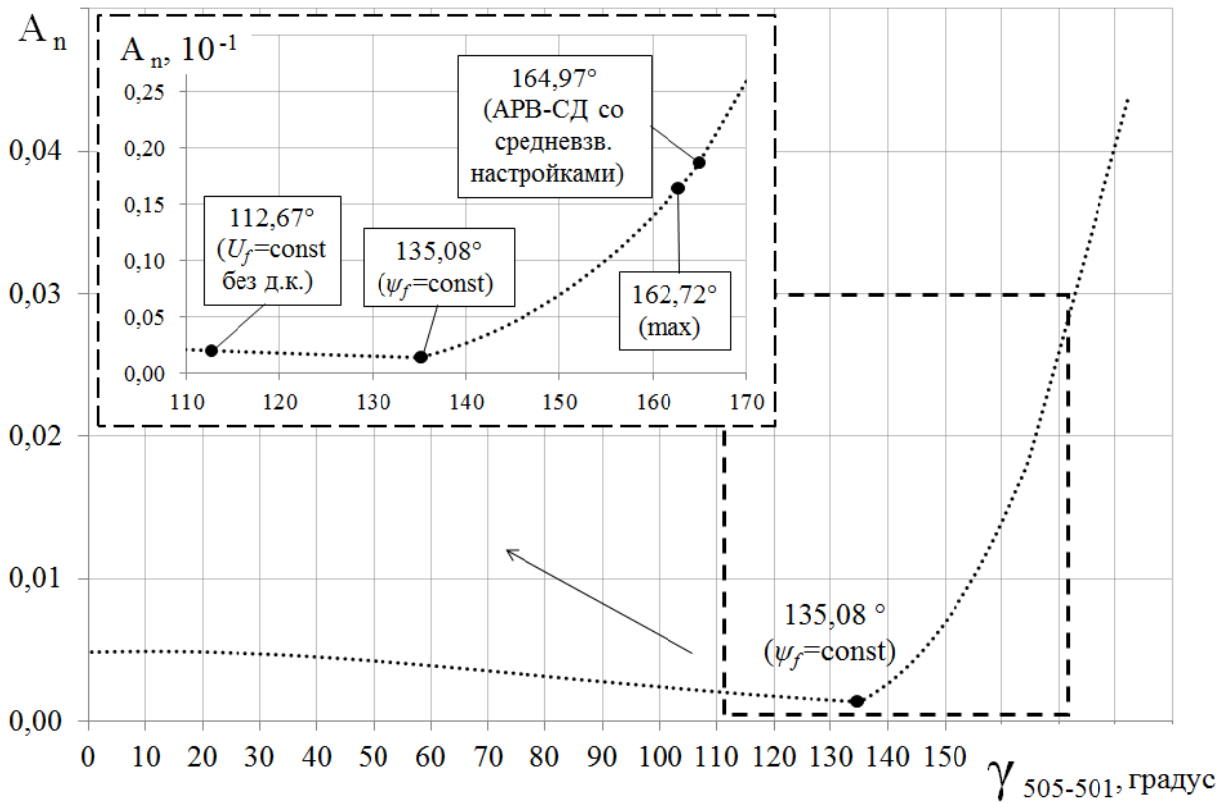


Рисунок 4.13 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для позиционной ( $\psi_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС  $P^{(T1)} = P^{(T2)} = P^{(T3)} = P^{(T4)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(T5)} = S_{\text{баз}}$  (одноцепное исполнение)

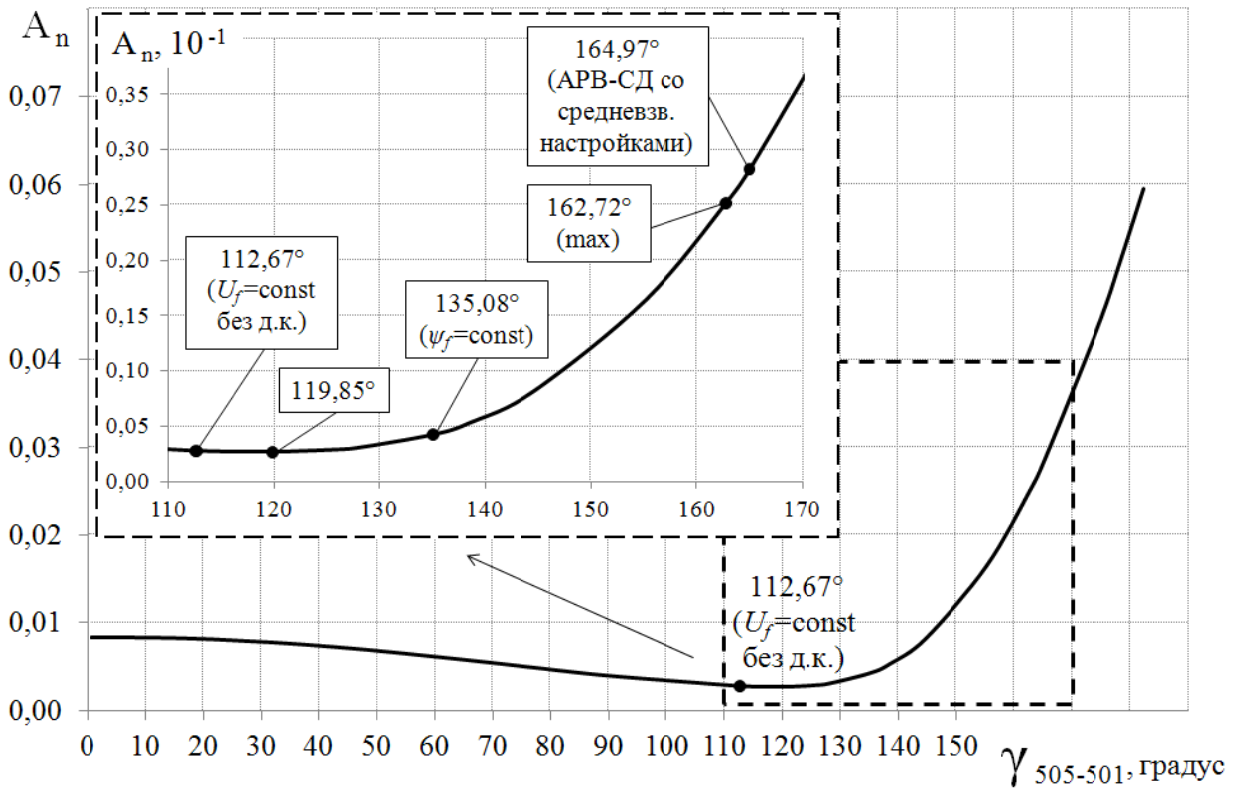


Рисунок 4.14 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для нерегулируемой ( $U_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС  $P^{(T1)} = P^{(T2)} = P^{(T3)} = P^{(T4)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(T5)} = S_{\text{баз}}$  (одноцепное исполнение)

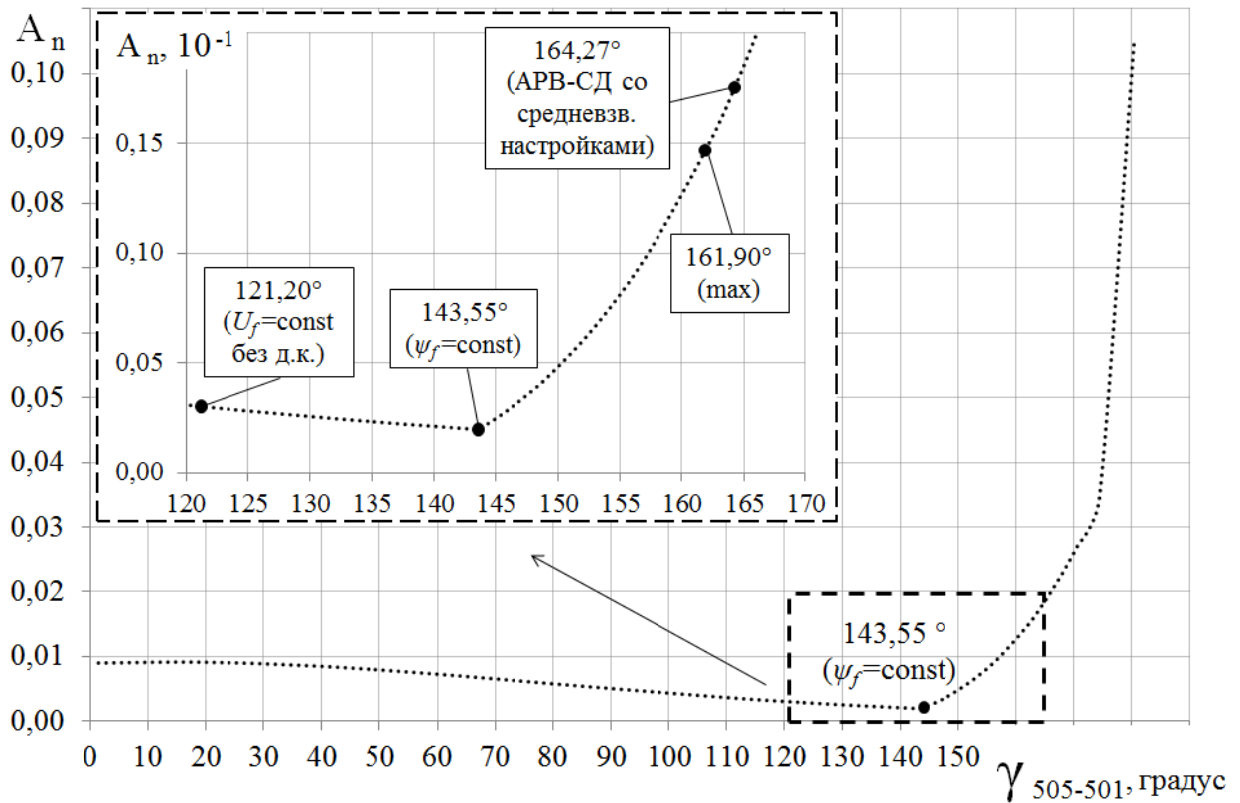


Рисунок 4.15 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для позиционной ( $\psi_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС  $P^{(1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(2)} = P^{(3)} = P^{(4)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(5)} = S_{\text{баз}}$ . (одноцепное исполнение)

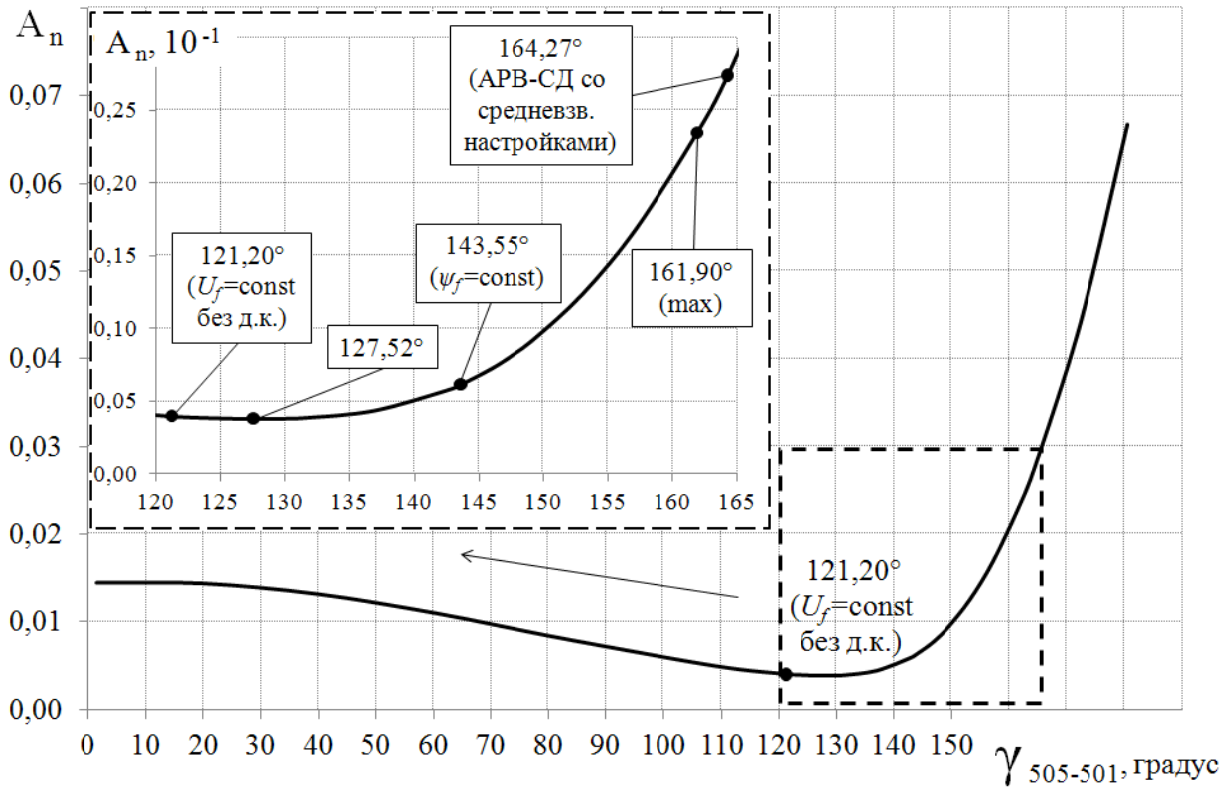


Рисунок 4.16 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для нерегулируемой ( $U_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС  $P^{(1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(2)} = P^{(3)} = P^{(4)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(5)} = S_{\text{баз}}$ . (одноцепное исполнение)

Таблица 4.2 – Предельные по передаваемой мощности режимы пятимашинной электропередачи цепочечной структуры

Расчетные соотношения	Максимум угловой характеристики, МВт / угол электропередачи, градус	Позиционная модель ЭЭС $\psi_f = \text{const}$		Нерегулируемая ЭЭС $U_f = \text{const}$	
		Предельная передаваемая мощность, % / угол электропередачи, градус	Мощность при $\partial A_n / \partial \delta_{\text{отн}} = 0$ , % / угол электропередачи, градус	Предельная передаваемая мощность, % / угол электропередачи, градус	Мощность при $\partial A_n / \partial \delta_{\text{отн}} = 0$ , % / угол электропередачи, градус
Одноцепное исполнение (рисунок 3.9)					
$P^{(T1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}; P^{(T2)} = P^{(T3)} =$ $= P^{(T4)} = P^{(T5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$	723 / 165,17°	98,55 / 145,65°	98,55 / 145,65°	96,68 / 135,74°	97,22 / 138,25°
$P^{(T1)} = P^{(T2)} =$ $= P^{(T3)} = P^{(T4)} =$ $= P^{(T5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$	720 / 166,60°	99,35 / 153,12°	99,35 / 153,12°	94,45 / 128,00°	96,41 / 135,49°
$P^{(T1)} = P^{(T2)} =$ $= P^{(T3)} = P^{(T4)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}};$ $P^{(T5)} = S_{\text{баз}}$	693 / 162,72°	96,75 / 135,08°	96,75 / 135,08°	89,56 / 112,67°	92,29 / 119,85°
$P^{(T1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}; P^{(T2)} = P^{(T3)} =$ $= P^{(T4)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}};$ $P^{(T5)} = S_{\text{баз}}$	696 / 161,90°	98,60 / 143,55°	98,60 / 143,55°	93,05 / 121,20°	95,04 / 127,52°
Двухцепное исполнение					
$P^{(T1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}; P^{(T2)} = P^{(T3)} =$ $= P^{(T4)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}};$ $P^{(T5)} = S_{\text{баз}}$	1367 / 126,09°	—	—	99,23 / 115,04°	99,90 / 122,14°

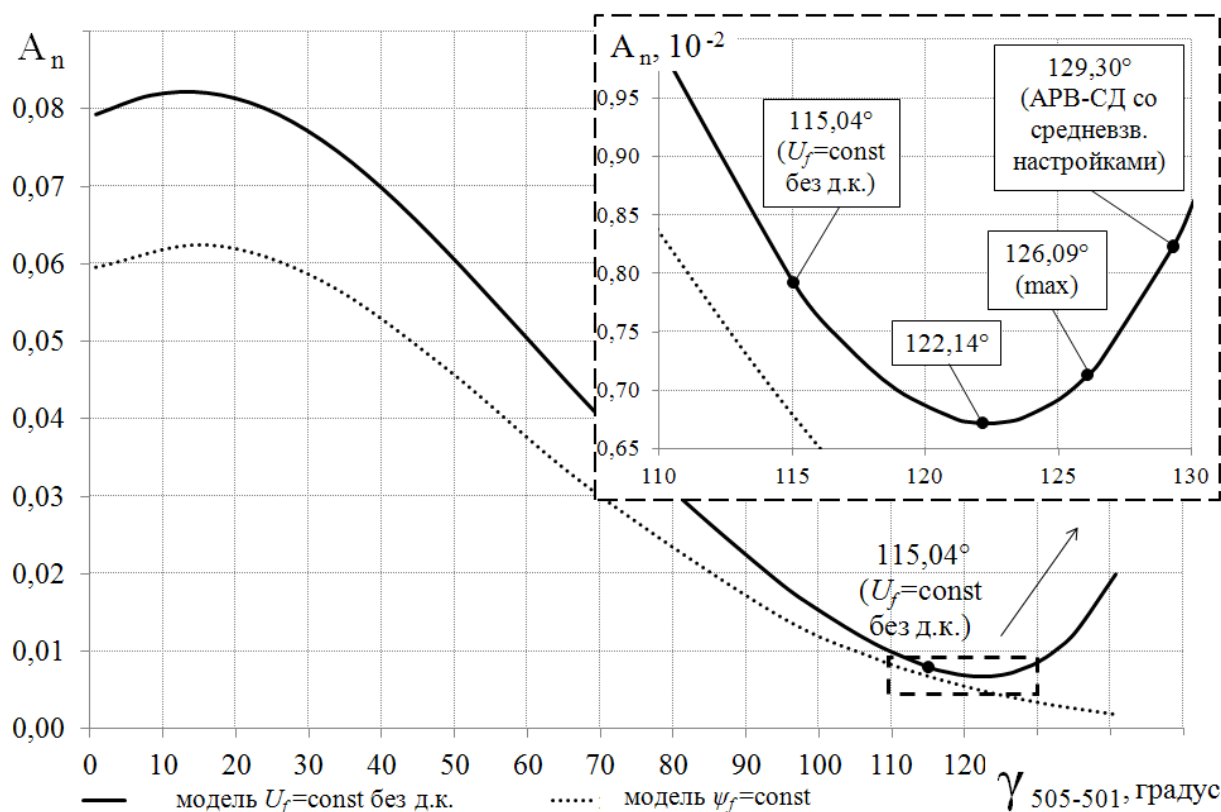


Рисунок 4.17 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы в процессе утяжеления режима ЭЭС  $P^{(I1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(I2)} = P^{(I3)} = P^{(I4)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(I5)} = S_{\text{баз}}$ . (двухцепное исполнение)

Границы области потенциально устойчивых режимов, определенные согласно предложенному структурному критерию постоянства потокосцеплений отвечают минимумам характеристик, представленных на рисунках 4.9, 4.11, 4.13, 4.15. В случае применения упрощенной модели, построенной при постоянстве напряжения возбуждения, граница области потенциально устойчивых режимов лежит левее экстремумов представленных на рисунках 4.10, 4.12, 4.14, 4.16, 4.17 характеристик.

Применение предложенного критерия колебательного нарушения статической устойчивости, основанного на переходе через нуль частной производной  $\partial A_n / \partial \delta = 0$ , позволяет увеличить передаваемую мощность (таблица 4.2) на величину от 0,67% (9,2 МВт) (для двухцепной электропередачи) до 2,73% (18,9 МВт) (для одноцепной электропередачи с двухкратным соотношением мощностей) по сравнению с предельным по устойчивости в нерегулируемой модели ( $U_f = \text{const}$ ).

## 4.2 Исследование характера изменения свободного члена характеристического уравнения системы электропередачи кольцевой структуры

С целью обобщения полученных ранее критериев применения упрощенных моделей выполнялось исследование характера изменения свободного члена  $A_n$  для кольцевых схем энергообъединений. Оценка устойчивости в кольцевой схеме электропередачи производилась аналогично цепочечным схемам при вариации соотношения установленных мощностей эквивалентных генераторов энергосистем. На рисунках 4.18 - 4.25 показано изменение свободного члена при последовательной загрузке контролируемого сечения. Граница области устойчивости, определенная с помощью предлагаемых упрощенных моделей  $\psi_f = \text{const}$  и  $U_f = \text{const}$ , вне зависимости от соотношения установленных мощностей приемной и передающей частей энергообъединения не характеризуется сменой знака свободного члена.

Области устойчивости, определенные при постоянстве потокосцеплений контуров ротора  $\psi_f = \text{const}$  и постоянстве напряжения возбуждения  $U_f = \text{const}$  располагаются левее экстремумов представленных на рисунках 4.18 - 4.25 характеристик.

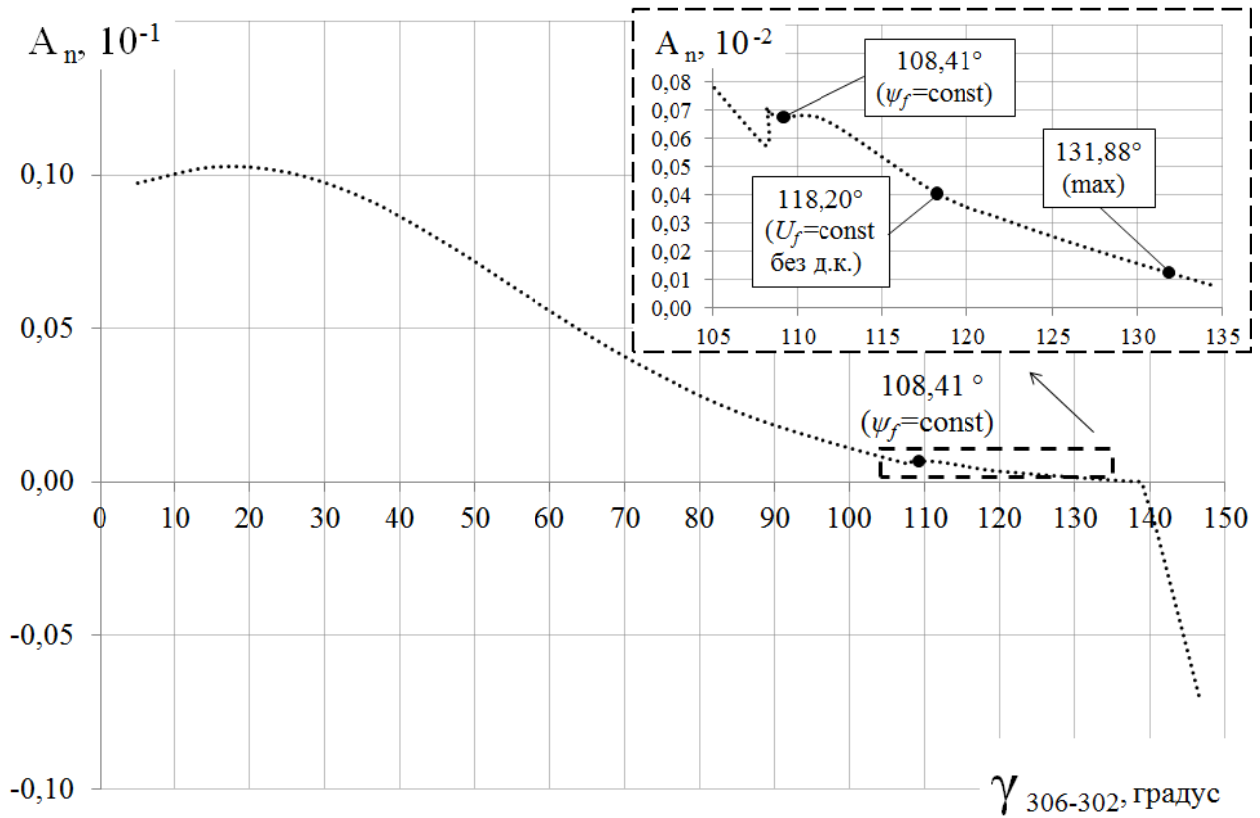


Рисунок 4.18 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для позиционной ( $\psi_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС  $P^{(2)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(1)} = P^{(3)} = P^{(4)} = P^{(5)} = P^{(6)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$  (контролируемое сечение I)

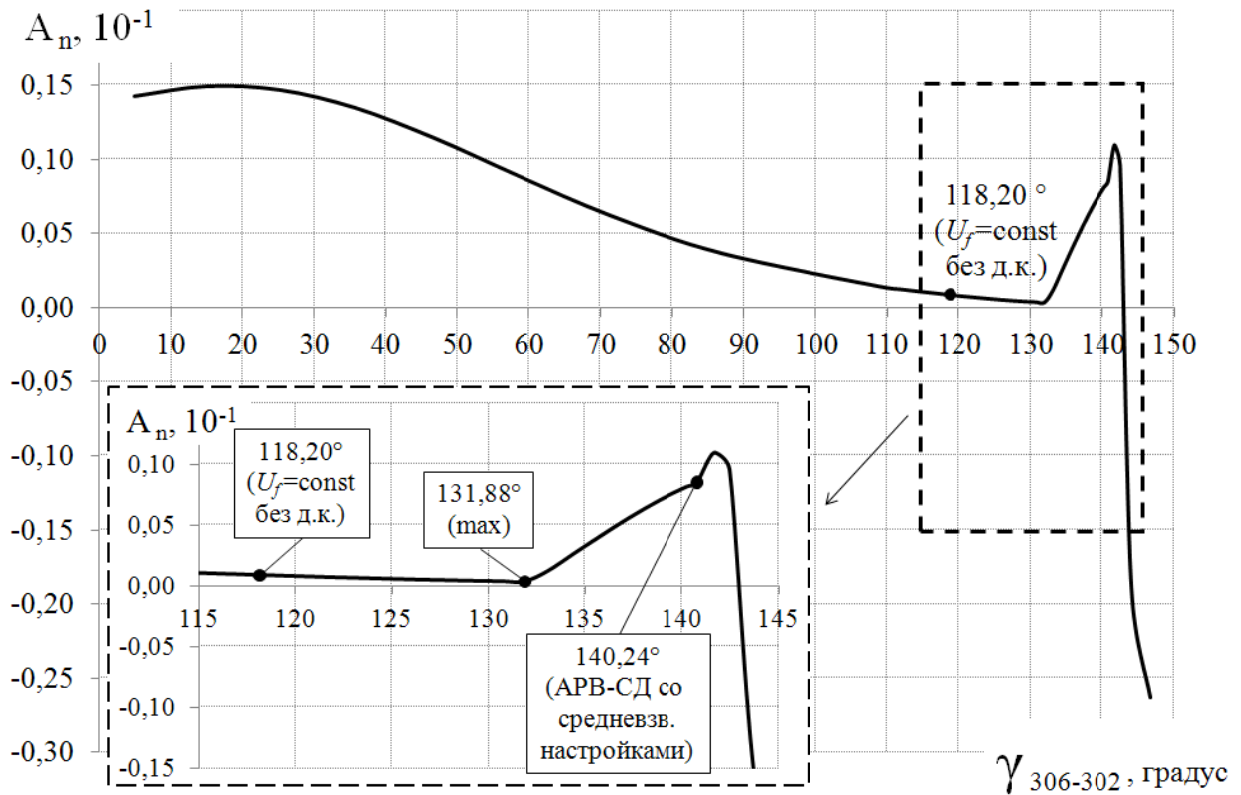


Рисунок 4.19 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для нерегулируемой ( $U_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС при  $P^{(2)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(1)} = P^{(3)} = P^{(4)} = P^{(5)} = P^{(6)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$  (контролируемое сечение I)

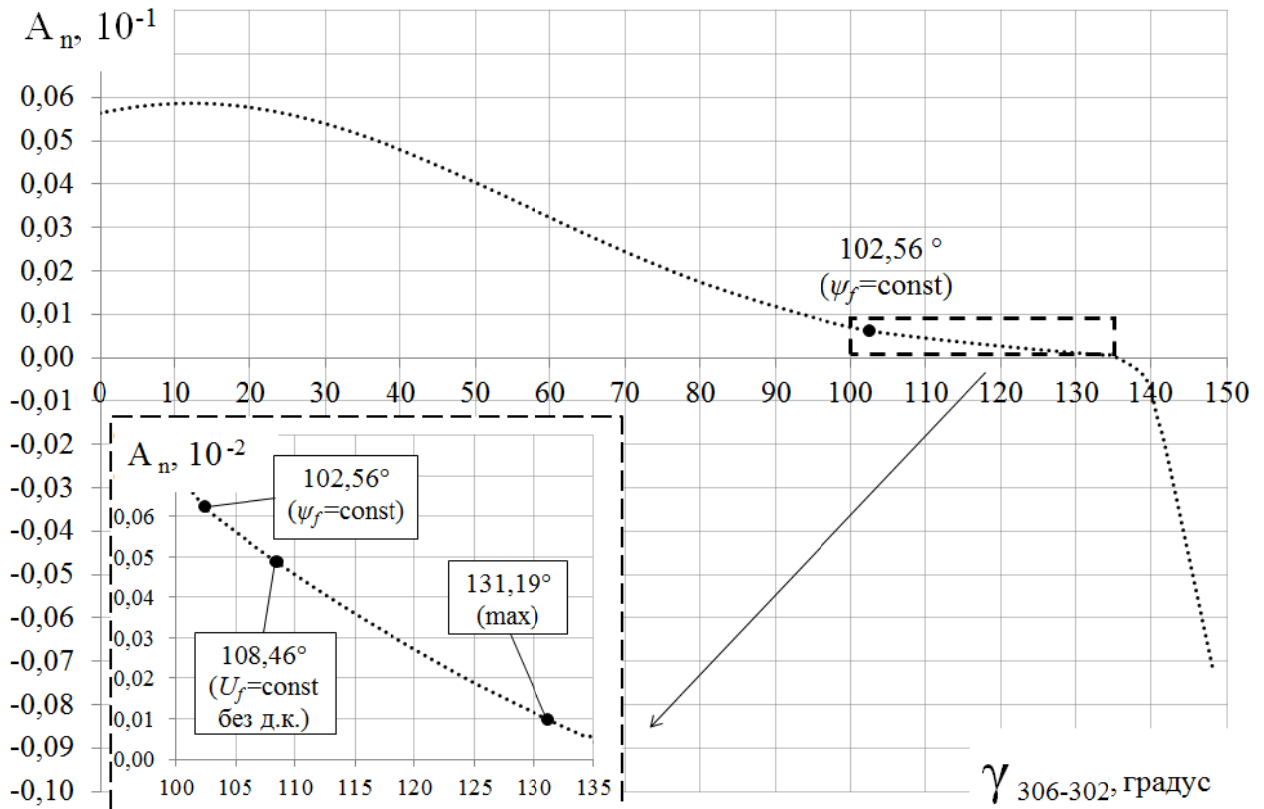


Рисунок 4.20 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для позиционной ( $\psi_f = \text{const}$ ) модели  $P^{(\Gamma 1)} = P^{(\Gamma 2)} = P^{(\Gamma 3)} = P^{(\Gamma 4)} = P^{(\Gamma 5)} = P^{(\Gamma 6)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$  (контролируемое сечение I)

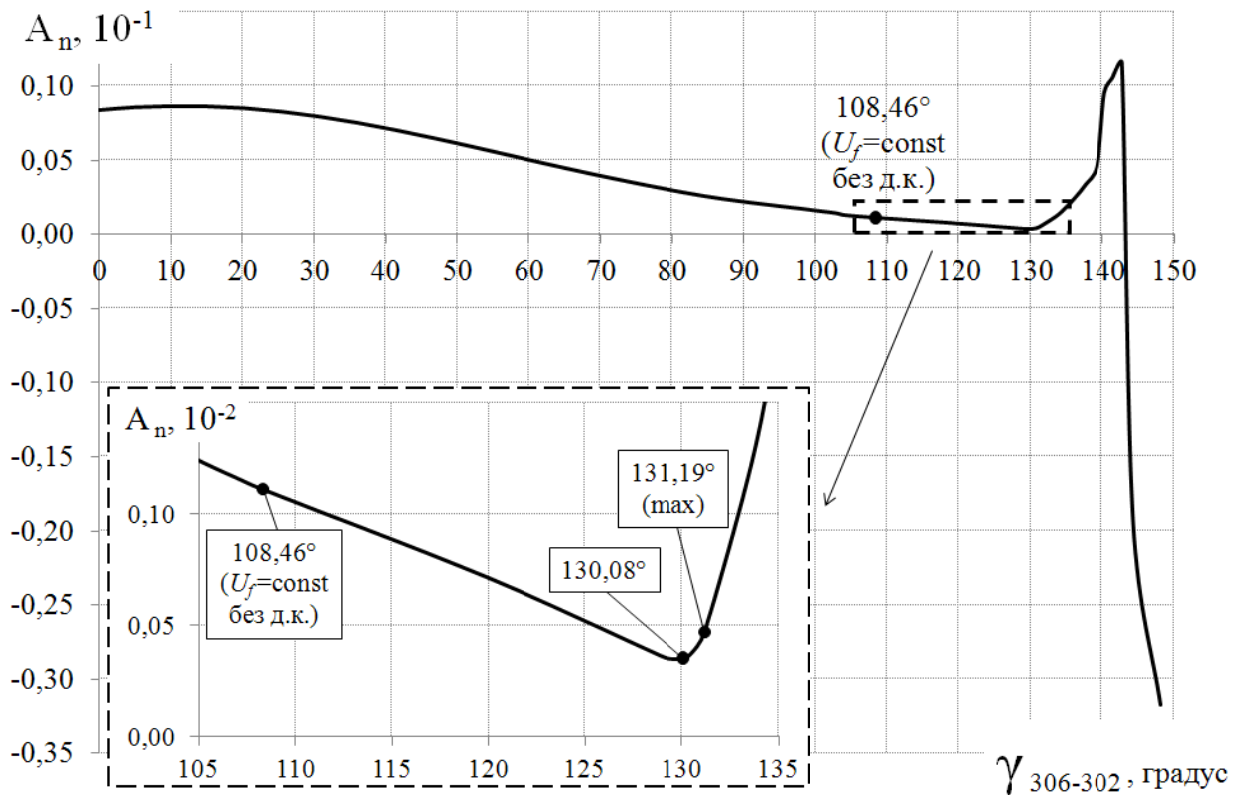


Рисунок 4.21 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для нерегулируемой ( $U_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС при  $P^{(\Gamma 1)} = P^{(\Gamma 2)} = P^{(\Gamma 3)} = P^{(\Gamma 4)} = P^{(\Gamma 5)} = P^{(\Gamma 6)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$  (контролируемое сечение I)

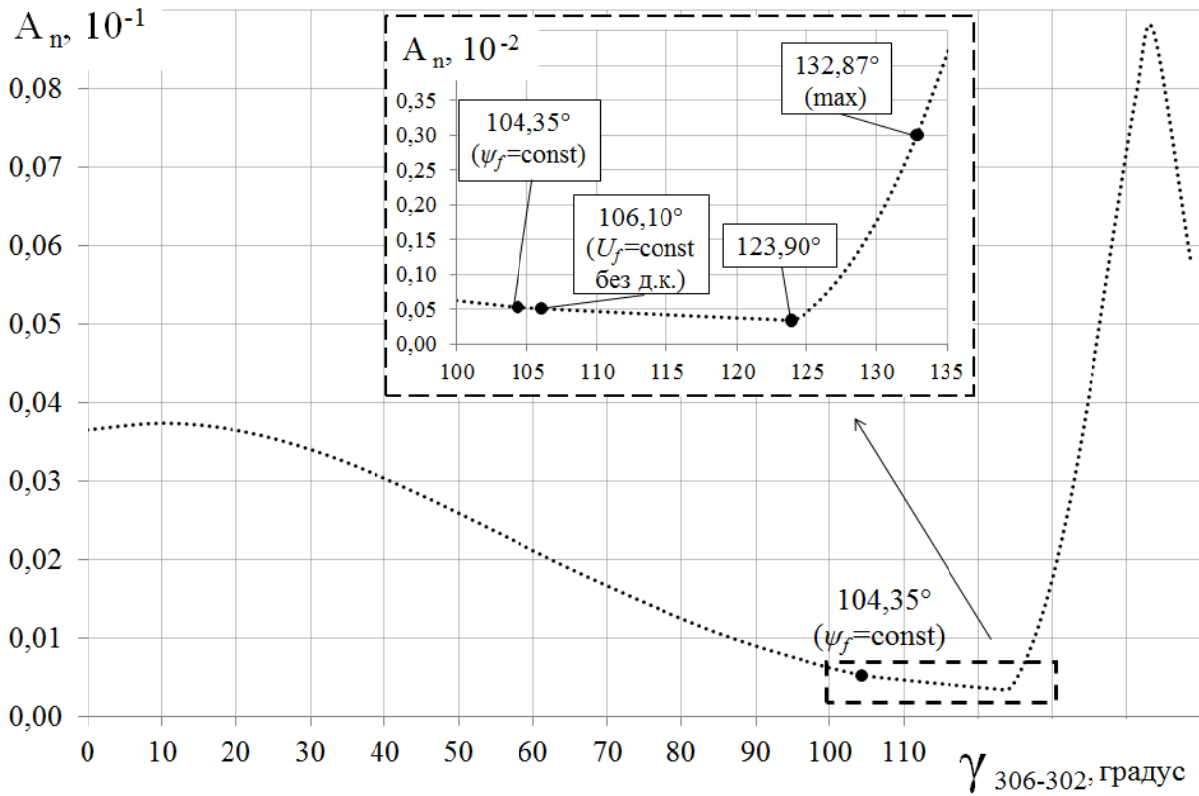


Рисунок 4.22 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для позиционной ( $\psi_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС  $P^{(1)} = P^{(2)} = P^{(3)} = P^{(4)} = P^{(5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(6)} = S_{\text{баз}}$  (контролируемое сечение I)

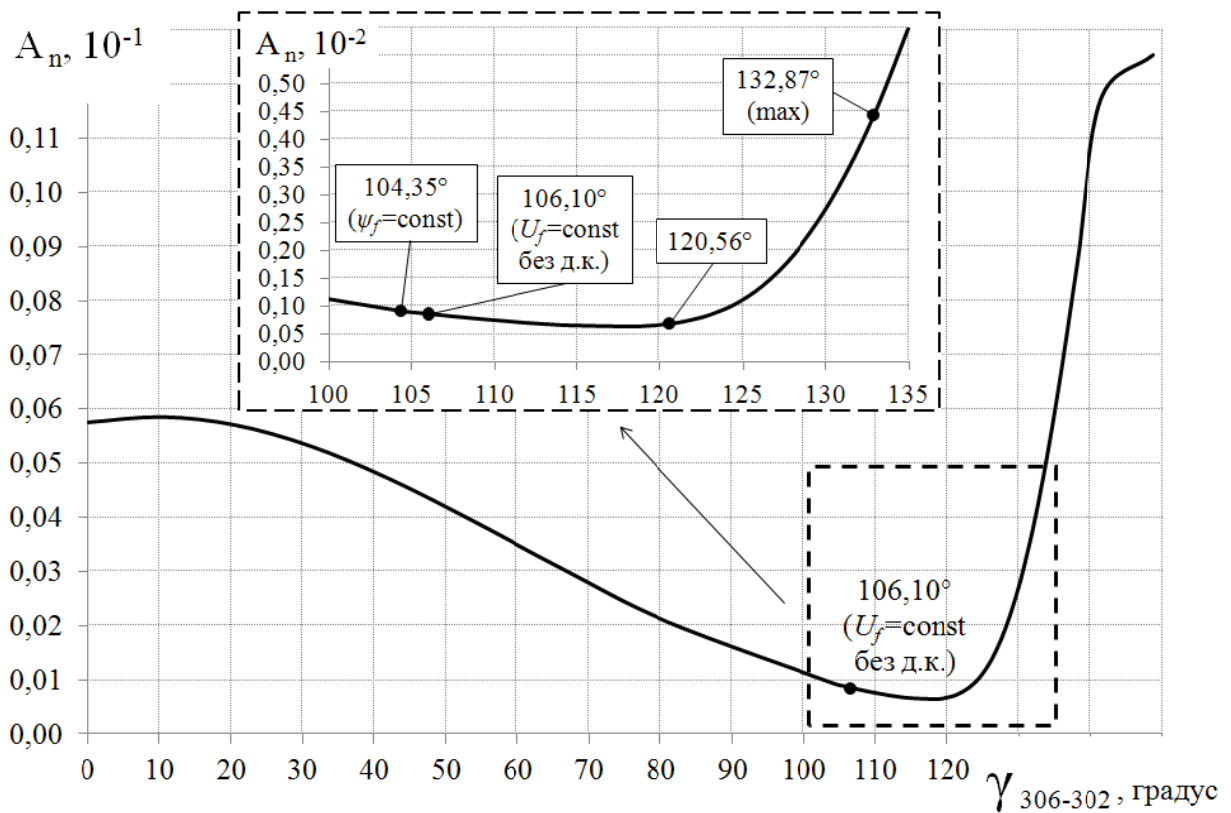


Рисунок 4.23 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для нерегулируемой ( $U_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС при  $P^{(1)} = P^{(2)} = P^{(3)} = P^{(4)} = P^{(5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(6)} = S_{\text{баз}}$  (контролируемое сечение I)



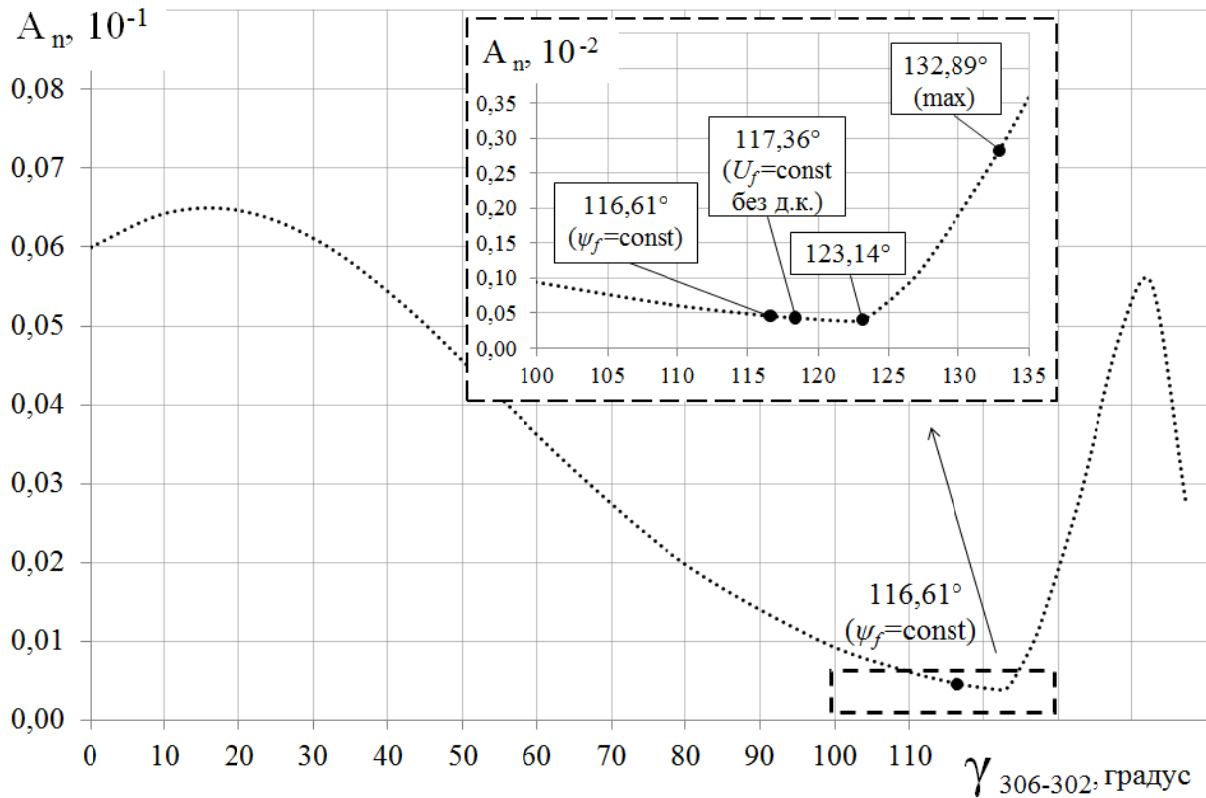


Рисунок 4.24 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для позиционной ( $\psi_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС  $P^{(I2)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(I1)} = P^{(I3)} = P^{(I4)} = P^{(I5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(I6)} = S_{\text{баз}}$  (контролируемое сечение I)

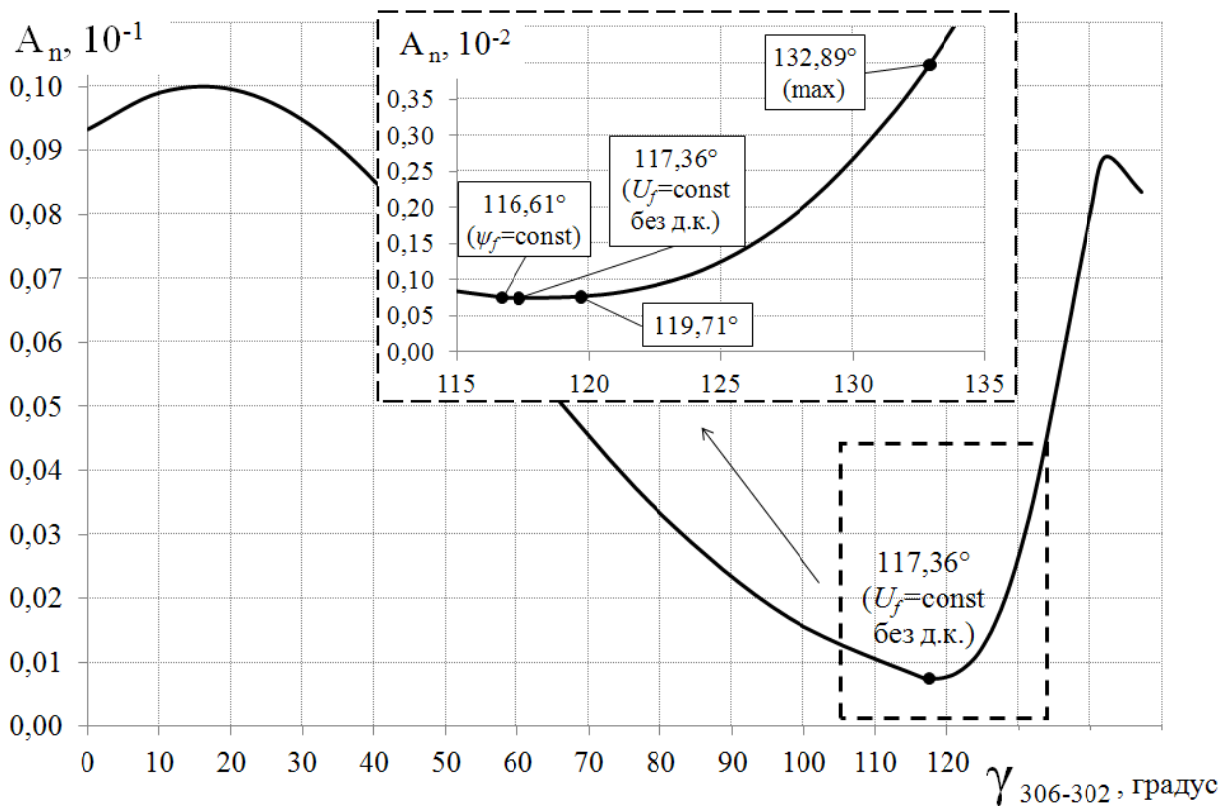


Рисунок 4.25 – Изменение свободного члена характеристического уравнения системы для нерегулируемой ( $U_f = \text{const}$ ) модели ЭЭС при  $P^{(I2)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(I1)} = P^{(I3)} = P^{(I4)} = P^{(I5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$ ;  $P^{(I6)} = S_{\text{баз}}$  (контролируемое сечение I)

Таблица 4.3 – Предельные по передаваемой мощности режимы электропередачи кольцевой структуры

Расчетные соотношения	Максимум угловой характеристики, МВт / угол электропередачи, градус	Позиционная модель ЭЭС $\psi_f = \text{const}$		Нерегулируемая ЭЭС $U_f = \text{const}$	
		Предельная передаваемая мощность, % / угол электропередачи, градус	Мощность при $\partial A_n / \partial \delta_{\text{отн}} = 0$ , % / угол электропередачи, градус	Предельная передаваемая мощность, % / угол электропередачи, градус	Мощность при $\partial A_n / \partial \delta_{\text{отн}} = 0$ , % / угол электропередачи, градус
Контролируемое сечение I (рисунок 3.15)					
$P^{(\Gamma 2)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}};$ $P^{(\Gamma 1)} = P^{(\Gamma 3)} =$ $= P^{(\Gamma 4)} = P^{(\Gamma 5)} =$ $= P^{(\Gamma 6)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$	1415 / 131,88°	97,02 / 108,41°	97,02 / 108,41°	99,01 / 118,20°	100,00 / 131,88°
$P^{(\Gamma 1)} = P^{(\Gamma 2)} =$ $= P^{(\Gamma 3)} = P^{(\Gamma 4)} =$ $= P^{(\Gamma 5)} = P^{(\Gamma 6)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$	1431 / 133,56°	95,25 / 102,56°	95,25 / 102,56°	96,98 / 108,46°	99,98 / 130,08°
$P^{(\Gamma 1)} = P^{(\Gamma 2)} =$ $= P^{(\Gamma 3)} = P^{(\Gamma 4)} =$ $= P^{(\Gamma 5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}; P^{(\Gamma 6)} = S_{\text{баз}}$	1427 / 132,87°	95,56 / 104,35°	99,56 / 123,90°	96,10 / 106,10°	99,18 / 120,56°
$P^{(\Gamma 2)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}}; P^{(\Gamma 1)} = P^{(\Gamma 3)} =$ $= P^{(\Gamma 4)} = P^{(\Gamma 5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}};$ $P^{(\Gamma 6)} = S_{\text{баз}}$	1434 / 132,89°	98,65 / 116,61°	99,55 / 123,14°	98,78 / 117,36°	99,13 / 119,71°

В таблице 4.3 представлены результаты сопоставления предельных по условиям устойчивости режимов в упрощенных моделях и режимов, отвечающих нулевому значению частной производной  $\partial A_n / \partial \delta_{отн} = 0$  для кольцевых схем электропередачи. Величина запаса по обменной мощности, определенная ранее в упрощенных моделях, уточнена и уменьшена в максимальном случае от 3,02% (43,2 МВт) до 0,02% (0,3 МВт) (для эквивалентных генераторов соизмеримой мощности).

Обобщая результаты исследований данного раздела можно заключить, что независимо от структуры (цепочечная или кольцевая) и жесткости электропередачи, граница области статической колебательной устойчивости также характеризуется минимумом зависимости  $A_n = f(\delta_{отн})$  без смены знака свободного члена. На основе выполненного анализа сформулирован и предложен новый критерий колебательного нарушения статической устойчивости  $\partial A_n / \partial \delta_{отн} = 0$ . Применение данного практического критерия позволяет выполнить быструю и достоверную оценку границы области потенциально устойчивых режимов протяженных энергообъединений с интенсивным управлением.

### 4.3 Выводы

1. Выполнено исследование 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.

2. Расчетными исследованиями установлено, что область устойчивости, определяемая ранее 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%.

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

4. Работа энергосистемы в найденной области потенциально устойчивых режимов характеризуется минимальными и допустимыми по условиям обеспечения статической 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.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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.

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 не более 1200 км.

Граница области потенциально устойчивых (стабилизируемых) в колебательном отношении режимов объединенных энергосистем кольцевой структуры отвечает их нерегулируемому представлению (модель  $U_f = \text{const}$  без демпферных контуров). Граница области устойчивости позиционной модели ( $\psi_f = \text{const}$ ) для ОЭС этой же структуры также находится в непосредственной близости предельных режимов нерегулируемой системы.

Введение интенсивного (быстродействующего) управления возбуждением синхронных машин со средневзвешенными (неоптимальными) 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.

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 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%.

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

Работа энергосистемы в найденной области потенциально 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.

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 потенциально устойчивых режимов. Показано,

что предложенная методика обладает лучшими показателями быстродействия и позволяет сократить вычислительные затраты.

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.

**Приложение А**  
**(обязательное)**  
**Справка о внедрении**

Научно-производственное  
предприятие  
ООО «НПП «РТС-ЭЛЕКТРО»

196601, Санкт-Петербург  
г. Пушкин, ул. Глинки, д.16/8, оф. 50  
т/ф +7 (812) 534-48-00, +7 (812) 451-37-61  
тел. +7 (812) 535-62-56

«14» марта 2016 г. № \_\_\_\_\_

Справка

о внедрении результатов диссертационной работы Захаровой Е.В.  
«Критерий экспресс-оценки статической устойчивости  
объединенных энергосистем»

Результаты диссертационной работы Захаровой Елены Вячеславовны «Критерий экспресс-оценки статической устойчивости объединенных энергосистем», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, а именно: алгоритм процедуры определения области потенциально устойчивых режимов внедрен в цифровой диагностический комплекс программно-аппаратного моделирования ЦДК-РТ, разработанный ООО «НПП «РТС-Электро».

Использование указанных результатов позволяет сократить вычислительные затраты на проведение первичной оценки предельных по передаваемой мощности режимов электрических станций и объединенных энергосистем.

Генеральный директор  
ООО «НПП «РТС-Электро»  
к.т.н., с.н.с.



В.Н. Рябов



## Приложение Б (справочное)

**Программная реализация алгоритма процедуры формирования матрицы,  
вычисления коэффициентов характеристического полинома  
и собственных значений матрицы коэффициентов  
системы линеаризованных дифференциальных уравнений**

```
function [eig_2m,dPQ_dDW] =eig_2m_balance_PQqd()
clc;
% boSymbolicSolution = true;
boSymbolicSolution = false;
NumberNode_1 = 1; Pnom_MWt_1 = 2500; cosFnom_pu_1 = 0.85; Unom_kV_1 =
15.75; Rq_Om_1 = 0.00; Lq_pu_1 = 2.00; Rd_Om_1 = 0.00; Ld_pu_1 = 2.00;
Lsigma_q_pu_1 = 0.13; Lsigma_d_pu_1 = 0.13; L_d_pu_1 = 0.28;
L_q_pu_1 = NaN; L_d_pu_1 = NaN; L_q_pu_1 = NaN;
Td0_s_1 = 7.00; Tq0_s_1 = NaN; T_d0_s_1 = NaN;
T_q0_s_1 = NaN; T_d0_s_1 = NaN; T_q0_s_1 = NaN; T_da_s_1 = NaN;
T_qa_s_1 = NaN; T_d_s_1 = NaN;
T_q_s_1 = NaN; T_d_s_1 = NaN; T_q_s_1 = NaN; Tj_s_1 = 7.00;
NumberNode_2 = 2; Pnom_MWt_2 = 5000; cosFnom_pu_2 = 0.85; Unom_kV_2 =
15.75;
Rq_Om_2 = 0.00; Lq_pu_2 = 2.00; Rd_Om_2 = 0.00; Ld_pu_2 = 2.00;
Lsigma_q_pu_2 = 0.13; Lsigma_d_pu_2 = 0.13;
L_d_pu_2 = 0.28; L_q_pu_2 = NaN; L_d_pu_2 = NaN; L_q_pu_2 = NaN;
Td0_s_2 = 7.00; Tq0_s_2 = NaN; T_d0_s_2 = NaN;
T_q0_s_2 = NaN; T_d0_s_2 = NaN; T_q0_s_2 = NaN; T_da_s_2 = NaN;
T_qa_s_2 = NaN; T_d_s_2 = NaN;
T_q_s_2 = NaN; T_d_s_2 = NaN; T_q_s_2 = NaN; Tj_s_2 = 7.00;
% предельный по сходимости
Pmode_MWt_1 = 1467.3770; Qmode_Mvar_1 = 2210.8736; Pmode_MWt_2 = 4212.7023;
Qmode_Mvar_2 = 2923.5164;
Umode_kV_1 = 15.75; YUmode_degree_1 = 00.00; Umode_kV_2 = 15.75;
YUmode_degree_2 = 92.6729430;
Ynets_1_Re_uSm = 10361020.0000; Ynets_1_Im_uSm = -4061776.2000;
Znets_12_Re_Om = 0.0044468; Znets_12_Im_Om = 0.2198413; Znets_21_Re_Om =
0.0044468; Znets_21_Im_Om = 0.2198413; Ynets_2_Re_uSm = 12344233.0000;
Ynets_2_Im_uSm = -7118355.9000; E_q_const_poisk_X_qX_d = NaN;
E_q_const_poisk_XqX_d = +0.0000001; % E'q = const %U_f_const_poisk_X_qX_d =
NaN;
U_f_const_poisk_XqX_d = 0.000001+i*0.00001;
% Uf = const, без д.к. [E_q_const_eig_2m_solve, E_q_const_eig_2m_eig] =
E_q_const_eig_2m_balance_PQqd( boSymbolicSolution,
NumberNode_1,Pnom_MWt_1,cosFnom_pu_1,Unom_kV_1,
Rq_Om_1,Lq_pu_1,Rd_Om_1,Ld_pu_1,
Lsigma_q_pu_1,Lsigma_d_pu_1,L_d_pu_1,L_q_pu_1,L_d_pu_1,L_q_pu_1,
Td0_s_1,Tq0_s_1,T_d0_s_1,T_q0_s_1,T_d0_s_1,T_q0_s_1,
T_da_s_1,T_qa_s_1,T_d_s_1,T_q_s_1,T_d_s_1,T_q_s_1, Tj_s_1,
NumberNode_2,Pnom_MWt_2,cosFnom_pu_2,Unom_kV_2,
Rq_Om_2,Lq_pu_2,Rd_Om_2,Ld_pu_2,
Lsigma_q_pu_2,Lsigma_d_pu_2,L_d_pu_2,L_q_pu_2,L_d_pu_2,L_q_pu_2,
Td0_s_2,Tq0_s_2,T_d0_s_2,T_q0_s_2,T_d0_s_2,T_q0_s_2,
T_da_s_2,T_qa_s_2,T_d_s_2,T_q_s_2,T_d_s_2,T_q_s_2, Tj_s_2, Pmode_MWt_1,
Qmode_Mvar_1, Umode_kV_1, YUmode_degree_1, Pmode_MWt_2, Qmode_Mvar_2,
Umode_kV_2, YUmode_degree_2, Ynets_1_Re_uSm, Ynets_1_Im_uSm, Znets_12_Re_Om,
Znets_12_Im_Om, Znets_21_Re_Om, Znets_21_Im_Om, Ynets_2_Re_uSm,
Ynets_2_Im_uSm);
[U_f_const_eig_2m_solve, U_f_const_eig_2m_eig] =
U_f_const_eig_2m_balance_PQqd( boSymbolicSolution,
NumberNode_1,Pnom_MWt_1,cosFnom_pu_1,Unom_kV_1,
Rq_Om_1,Lq_pu_1,Rd_Om_1,Ld_pu_1,
```

```

Lsigma_q_pu_1,Lsigma_d_pu_1,L_d_pu_1,L_q_pu_1,L_d_pu_1,L_q_pu_1,
Td0_s_1,Tq0_s_1,T_d0_s_1,T_q0_s_1,T_d0_s_1,T_q0_s_1,
T_da_s_1,T_qa_s_1,T_d_s_1,T_q_s_1,T_d_s_1,T_q_s_1, Tj_s_1,
NumberNode_2,Pnom_MWt_2,cosFnom_pu_2,Unom_kV_2,
Rq_Om_2,Lq_pu_2,Rd_Om_2,Ld_pu_2,
Lsigma_q_pu_2,Lsigma_d_pu_2,L_d_pu_2,L_q_pu_2,L_d_pu_2,L_q_pu_2,
Td0_s_2,Tq0_s_2,T_d0_s_2,T_q0_s_2,T_d0_s_2,T_q0_s_2,
T_da_s_2,T_qa_s_2,T_d_s_2,T_q_s_2,T_d_s_2,T_q_s_2, Tj_s_2, Pmode_MWt_1,
Qmode_Mvar_1, Umode_kV_1, YUmode_degree_1, Pmode_MWt_2, Qmode_Mvar_2,
Umode_kV_2, YUmode_degree_2, Ynets_1_Re_uSm, Ynets_1_Im_uSm, Znets_12_Re_Om,
Znets_12_Im_Om, Znets_21_Re_Om, Znets_21_Im_Om, Ynets_2_Re_uSm,
Ynets_2_Im_uSm);
    format short g;
    clc;
    disp('2-х машинная схема. ');
    switch ((L_q_pu_1 == L_d_pu_1)&&(L_q_pu_2 == L_d_pu_2))
    case {true}
        disp('Модель E''q = const за X''q = X''d.
Решение характеристического уравнения: ')
        disp(E_q_const_eig_2m_solve);
        disp('Модель E''q = const за X''q = X''d. Собственные числа матрицы: ')
        disp(E_q_const_eig_2m_eig);
        disp('Модель E''q = const за X''q = X''d. "ПОИСК": ')
        disp(E_q_const_poisk_X_qX_d);
        disp('Модель Uf = const без д.к., X''q = X''d.
Решение характеристического уравнения: ')
        disp(U_f_const_eig_2m_solve);
        disp('Модель Uf = const без д.к., X''q = X''d.
Собственные числа матрицы: ')
        disp(U_f_const_eig_2m_eig);
        disp('Модель Uf = const без д.к., X''q = X''d. "ПОИСК": ')
        disp(U_f_const_poisk_X_qX_d);
    otherwise
        disp('Модель E''q = const за Xq, X''d.
Решение характеристического уравнения: ')
        disp(E_q_const_eig_2m_solve);
        disp('Модель E''q = const за Xq, X''d. Собственные числа матрицы: ')
        disp(E_q_const_eig_2m_eig);
        disp('Модель E''q = const за Xq, X''d. "ПОИСК": ')
        disp(E_q_const_poisk_XqX_d);
        disp('Модель Uf = const без д.к., Xq, X''d.
Решение характеристического уравнения: ')
        disp(U_f_const_eig_2m_solve);
        disp('Модель Uf = const без д.к., Xq, X''d. Собственные числа матрицы: ')
        disp(U_f_const_eig_2m_eig);
        disp('Модель Uf = const без д.к., Xq, X''d. "ПОИСК": ')
        disp(U_f_const_poisk_XqX_d);
    end;
end;

function [eig_2m_solve, eig_2m_eig] =
U_f_const_eig_2m_balance_PQqd(SymbolicSolution,
NumberNode_1,Pnom_MWt_1,cosFnom_pu_1,Unom_kV_1,
Rq_Om_1,Lq_pu_1,Rd_Om_1,Ld_pu_1,
Lsigma_q_pu_1,Lsigma_d_pu_1,L_d_pu_1,L_q_pu_1,L_d_pu_1,L_q_pu_1,
Td0_s_1,Tq0_s_1,T_d0_s_1,T_q0_s_1,T_d0_s_1,T_q0_s_1,
T_da_s_1,T_qa_s_1,T_d_s_1,T_q_s_1,T_d_s_1,T_q_s_1, Tj_s_1,
NumberNode_2,Pnom_MWt_2,cosFnom_pu_2,Unom_kV_2,
Rq_Om_2,Lq_pu_2,Rd_Om_2,Ld_pu_2,
Lsigma_q_pu_2,Lsigma_d_pu_2,L_d_pu_2,L_q_pu_2,L_d_pu_2,L_q_pu_2,
Td0_s_2,Tq0_s_2,T_d0_s_2,T_q0_s_2,T_d0_s_2,T_q0_s_2,
T_da_s_2,T_qa_s_2,T_d_s_2,T_q_s_2,T_d_s_2,T_q_s_2, Tj_s_2, Pmode_MWt_1,
Qmode_Mvar_1, Umode_kV_1, YUmode_degree_1, Pmode_MWt_2, Qmode_Mvar_2,

```

```

Umode_kV_2, YUmode_degree_2, Ynets_1_Re_uSm, Ynets_1_Im_uSm, Znets_12_Re_Om,
Znets_12_Im_Om, Znets_21_Re_Om, Znets_21_Im_Om, Ynets_2_Re_uSm,
Ynets_2_Im_uSm)
    clc;
    eig_2m_solve = NaN; eig_2m_eig = NaN;
    syms p dPdD
    switch SymbolicSolution
    case {true}
    syms w0
    syms Tj1 Tdo1 dPg1_dUq1 dPg1_dUd1 dQg1_dUq1 dQg1_dUd1 dPg1_dE_q1 dPg1_dE_d1
dQg1_dE_q1 dQg1_dE_d1 dEq1_dE_q1 dEq1_dE_d1 dEd1_dE_q1 dEd1_dE_d1 syms Tj2
Tdo2 dPg2_dUq2 dPg2_dUd2 dQg2_dUq2 dQg2_dUd2 dPg2_dE_q2 dPg2_dE_d2 dQg2_dE_q2
dQg2_dE_d2 dEq2_dE_q2 dEq2_dE_d2 dEd2_dE_q2 dEd2_dE_d2
    syms dPn1_dUq1 dPn1_dUd1 dPn1_dUq2 dPn1_dUd2 dQn1_dUq1 dQn1_dUd1 dQn1_dUq2
dQn1_dUd2 dPn2_dUq1 dPn2_dUd1 dPn2_dUq2 dPn2_dUd2 dQn2_dUq1 dQn2_dUd1
dQn2_dUq2 dQn2_dUd2 dPn1_dD1 dPn1_dD2 dQn1_dD1 dQn1_dD2 dPn2_dD1 dPn2_dD2
dQn2_dD1 dQn2_dD2
    syms dPg_dDelta dPg_dU dPg_dYu dQg_dDelta dQg_dU dQg_dYu dPn_dDelta dPn_dU
dPn_dYu dQn_dDelta dQn_dU dQn_dYu
    syms Rq_Om_1 Xq_Om_1 Rd_Om_1 Xd_Om_1 Rq_Om_2 Xq_Om_1 Rd_Om_2 Xd_Om_2
Ynets_1_Re_Sm Ynets_1_Im_Sm Znets_12_Re_Om Znets_12_Im_Om Znets_21_Re_Om
Znets_21_Im_Om Ynets_2_Re_Sm Ynets_2_Im_uSm dPQg1_dUqd1_2x2 = [% d_Uq1 d_Ud1
dPg1_dUq1, dPg1_dUd1;
dQg1_dUq1, dQg1_dUd1];
dPQg2_dUqd2_2x2 = [% d_Uq2 d_Ud2
dPg2_dUq2, dPg2_dUd2;
dQg2_dUq2, dQg2_dUd2];
dPQg1_dE_qd1_2x2 = [% d_E_q1 d_E_d1
dPg1_dE_q1, dPg1_dE_d1;
dQg1_dE_q1, dQg1_dE_d1];
dPQg2_dE_qd2_2x2 = [% d_E_q2 d_E_d2
dPg2_dE_q2, dPg2_dE_d2;
dQg2_dE_q2, dQg2_dE_d2];
dEqd1_dE_qd1_2x2 = [% d_E_q1 d_E_d1
dEq1_dE_q1, dEq1_dE_d1;
dEd1_dE_q1, dEd1_dE_d1];
dEqd2_dE_qd2_2x2 = [% d_E_q2 d_E_d2
dEq2_dE_q2, dEq2_dE_d2;
dEd2_dE_q2, dEd2_dE_d2];
dPQn_Uqd_4x4 = [% d_Uq1 d_Ud1 d_Uq2 d_Ud2
dPn1_dUq1, dPn1_dUd1, dPn1_dUq2, dPn1_dUd2;
dQn1_dUq1, dQn1_dUd1, dQn1_dUq2, dQn1_dUd2;
dPn2_dUq1, dPn2_dUd1, dPn2_dUq2, dPn2_dUd2;
dQn2_dUq1, dQn2_dUd1, dQn2_dUq2, dQn2_dUd2];
dPQn1_dD_2x2 = [% d_D1 d_D2
dPn1_dD1, dPn1_dD2;
dQn1_dD1, dQn1_dD2];
dPQn1_dW_2x2 = zeros(2);
dPQn2_dD_2x2 = [% d_D1 d_D2
dPn2_dD1, dPn2_dD2;
dQn2_dD1, dQn2_dD2];
dPQn2_dW_2x2 = zeros(2);
    otherwise format long; f0 = 50; w0 = 2*pi*f0;
    [SM1_TBParameters, SM1_CalculationTBParameters,
SM1_CalculationModeParameters] =
eig_get_JacobiMatrix_generator_balancePQqd(NumberNode_1,
Pnom_MWt_1, cosFnom_pu_1, Unom_kV_1, Rq_Om_1, Lq_pu_1, Rd_Om_1, Ld_pu_1,
Lsigma_q_pu_1, Lsigma_d_pu_1, L_d_pu_1, L_q_pu_1, L_d_pu_1, L_q_pu_1,
Td0_s_1, Tq0_s_1, T_d0_s_1, T_q0_s_1, T_d0_s_1, T_q0_s_1,
T_da_s_1, T_qa_s_1, T_d_s_1, T_q_s_1, T_d_s_1, T_q_s_1, Tj_s_1, Pmode_MWt_1,
Qmode_Mvar_1, Umode_kV_1, YUmode_degree_1);
    [SM2_TBParameters, SM2_CalculationTBParameters,
SM2_CalculationModeParameters] =

```

```

eig_get_JacobiMatrix_generator_balancePQqd(NumberNode_2,
Pnom_MWt_2,cosFnom_pu_2,Unom_kV_2, Rq_Om_2,Lq_pu_2,Rd_Om_2,Ld_pu_2,
Lsigma_q_pu_2,Lsigma_d_pu_2,L_d_pu_2,L_q_pu_2,L__d_pu_2,L__q_pu_2,
Td0_s_2,Tq0_s_2,T_d0_s_2,T_q0_s_2,T__d0_s_2,T__q0_s_2,
T__da_s_2,T__qa_s_2,T__d_s_2,T__q_s_2,T__d_s_2,T__q_s_2,Tj_s_2, Pmode_MWt_2,
Qmode_Mvar_2, Umode_kV_2, YUmode_degree_2);
[Nets_CalculationModeParameters] =
eig_2m_get_JacobiMatrix_nets_balancePQ(SM1_CalculationModeParameters,SM2_CalculationModeParameters, Ynets_1_Re_uSm, Ynets_1_Im_uSm, Znets_12_Re_Om, Znets_12_Im_Om, Znets_21_Re_Om, Znets_21_Im_Om, Ynets_2_Re_uSm, Ynets_2_Im_uSm);
Tj1 = SM1_CalculationTBParameters.Tj_VAs;
Tj2 = SM2_CalculationTBParameters.Tj_VAs;
Tdo1 = SM1_TBParameters.Td0_s;
Tdo2 = SM2_TBParameters.Td0_s;
dEqd1_dE_qd1_2x2 = SM1_CalculationModeParameters.dEqd_dE_qd_2x2_pu;
dEqd2_dE_qd2_2x2 = SM2_CalculationModeParameters.dEqd_dE_qd_2x2_pu;
dEqd1_dUqd1_2x2 = SM1_CalculationModeParameters.dEqd_dUqd_2x2_pu;
dEqd2_dUqd2_2x2 = SM2_CalculationModeParameters.dEqd_dUqd_2x2_pu;
dPQg1_dUqd1_2x2 =SM1_CalculationModeParameters.dPQg_dUqd_withE_qd_2x2_VA_V;
dPQg2_dUqd2_2x2 = SM2_CalculationModeParameters.dPQg_dUqd_withE_qd_2x2_VA_V;
dPQg1_dE_qd1_2x2 = SM1_CalculationModeParameters.dPQg_dE_qd_2x2_VA_V;
dPQg2_dE_qd2_2x2 = SM2_CalculationModeParameters.dPQg_dE_qd_2x2_VA_V;
dPQn_Uqd_4x4 = Nets_CalculationModeParameters.dPQnets_dUqd_4x4_VA_V;
dPQn1_dD_2x2 = Nets_CalculationModeParameters.dPQnets1_dD1D2_2x2_VA_radian;
dPQn1_dW_2x2 = Nets_CalculationModeParameters.dPQnets1_dW1W2_2x2_VA_radian_s;
dPQn2_dD_2x2 = Nets_CalculationModeParameters.dPQnets2_dD1D2_2x2_VA_radian;
dPQn2_dW_2x2 = Nets_CalculationModeParameters.dPQnets2_dW1W2_2x2_VA_radian_s;
end;
pDWotnE_q_4x4 = [%d_D21 d_w21 d_E_q1 d_E_q2
p, -1, 0, 0;
0, p, 0, 0;
0, 0, p+dEqd1_dE_qd1_2x2(1,1)/Tdo1, 0;
0, 0, 0, p+dEqd2_dE_qd2_2x2(1,1)/Tdo2];
invTjotn_4x4 = [% d_Pg1 d_Qg1 d_Pg2 d_Qg2
0, 0, 0, 0;
w0/Tj1, 0, -w0/Tj2, 0;
0, 0, 0, 0;
0, 0, 0, 0]; invTd0otn_4x4 = [% d_Uq1 d_Ud1 d_Uq2 d_Ud2
0, 0, 0, 0;
0, 0, 0, 0;
dEqd1_dUqd1_2x2(1,1)/Tdo1, dEqd1_dUqd1_2x2(1,2)/Tdo1, 0, 0;
0, 0, dEqd2_dUqd2_2x2(1,1)/Tdo2, dEqd2_dUqd2_2x2(1,2)/Tdo2]; dPQg_Uqd_4x4 =
[% d_Uq1 d_Ud1 d_Uq2 d_Ud2
dPQg1_dUqd1_2x2, zeros(2);
zeros(2), dPQg2_dUqd2_2x2];
dPQg1_dE_q1_2x1 = [dPQg1_dE_qd1_2x2(1,1); dPQg1_dE_qd1_2x2(2,1)];
dPQg2_dE_q2_2x1 = [dPQg2_dE_qd2_2x2(1,1); dPQg2_dE_qd2_2x2(2,1)];
dPQg_dE_q_4x2 = [dPQg1_dE_q1_2x1, zeros(2,1); zeros(2,1), dPQg2_dE_q2_2x1];
dPQn1_dD_2x1 = [dPQn1_dD_2x2(1,2); dPQn1_dD_2x2(2,2)];
dPQn2_dD_2x1 = [dPQn2_dD_2x2(1,2); dPQn2_dD_2x2(2,2)];
dPQn1_dW_2x1 = [dPQn1_dW_2x2(1,2); dPQn1_dW_2x2(2,2)];
dPQn2_dW_2x1 = [dPQn2_dW_2x2(1,2); dPQn2_dW_2x2(2,2)];
dPQn_dDWotn_4x2 = [% d_D21 d_w21
dPQn1_dD_2x1, dPQn1_dW_2x1;
dPQn2_dD_2x1, dPQn2_dW_2x1];
[dMotn, dMotn_iskl_1, dPQ_dDWotnE_q_4x4, Add_pDWotnE_q_4x4] =
get_dPQ_dDWotn_2(pDWotnE_q_4x4,invTjotn_4x4,invTd0otn_4x4,
dPQg_dE_q_4x2,dPQg_Uqd_4x4,dPQn_dDWotn_4x2,dPQn_Uqd_4x4);
det_dMotn = vpa(det(dMotn));
disp(det_dMotn)
det_dMotn_iskl_1 = vpa(det(dMotn_iskl_1)); disp(det_dMotn_iskl_1)
dMotn_iskl_2 = Add_pDWotnE_q_4x4 + dMotn_iskl_1(1:4,1:4);

```

```

det_dMotn_iskl_2_solve = vpa(det(dMotn_iskl_2));
dMotn_iskl_2_eig = vpa(dMotn_iskl_2 - diag([p, p, p, p]));
eig_2m_solve = double(solve(det_dMotn_iskl_2_solve,p));
iCount = size(eig_2m_solve,1);
for iIndex = 1:iCount
switch (~isreal(eig_2m_solve(iIndex)))
case {true}
eig_2m_solve(iIndex)=complex(real(eig_2m_solve(iIndex)),imag(eig_2m_solve(iIndex)))/(2*pi));
end; end; eig_2m_eig = (-1) * double(eig(dMotn_iskl_2_eig));
iCount = size(eig_2m_eig,1);
for iIndex = 1:iCount
switch (~isreal(eig_2m_eig(iIndex)))
case {true} eig_2m_eig(iIndex)=
complex(real(eig_2m_eig(iIndex)),imag(eig_2m_eig(iIndex)))/(2*pi));
end; end; end function [Result_dMotn, Result_dMotn_iskl_1,
Result_dPQ_dDWotnE_q, Result_Add_pDWotnE_q] =
get_dPQ_dDWotn_2(pDWotnE_q_4x4,invTjotn_4x4,invTd0otn_4x4,
dPQg_dE_q_4x2,dPQg_Uqd_4x4,dPQn_dDWotn_4x2,dPQn_Uqd_4x4)
A11 = [pDWotnE_q_4x4, -invTjotn_4x4; [zeros(4,2), -dPQg_dE_q_4x2;], eye(4)];
A12 = [invTd0otn_4x4; -dPQg_Uqd_4x4];
A21 = [-dPQn_dDWotn_4x2, dPQg_dE_q_4x2, zeros(4,4)];
A22 = dPQg_Uqd_4x4 - dPQn_Uqd_4x4;
Result_dMotn = [A11, A12;
A21, A22];
A21_ = A22 \ A21;
A11_ = -A12 * A21_;
Result_dMotn_iskl_1 = A11 + A11_;
dMotn_iskl_1_01_04_01_04 = Result_dMotn_iskl_1(1:4,1:4);
dMotn_iskl_1_01_04_05_08 = Result_dMotn_iskl_1(1:4,5:8);
dMotn_iskl_1_05_08_01_04 = Result_dMotn_iskl_1(5:8,1:4);
dMotn_iskl_1_05_08_05_08 = Result_dMotn_iskl_1(5:8,5:8); Result_dPQ_dDWotnE_q
= dMotn_iskl_1_05_08_05_08 \ dMotn_iskl_1_05_08_01_04;
Result_Add_pDWotnE_q = invTjotn_4x4 * Result_dPQ_dDWotnE_q;
end;

function [Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets] =
eig_2m_get_JacobiMatrix_nets_balancePQ(SM1_CalculationModeParameters,SM2_CalculationModeParameters, Ynets_1_Re_uSm, Ynets_1_Im_uSm, Znets_12_Re_Om, Znets_12_Im_Om, Znets_21_Re_Om, Znets_21_Im_Om, Ynets_2_Re_uSm, Ynets_2_Im_uSm)
clc;
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets =
{'Ynets1ReIm_Sm','Znets12ReIm_Om','Znets21ReIm_Om','Ynets2ReIm_Sm',
'Znets1ReIm_Om','Ynets12ReIm_Sm','Ynets21ReIm_Sm','Znets2ReIm_Om',
'Y11_ReIm_Sm','Y12_ReIm_Sm','Y21_ReIm_Sm','Y22_ReIm_Sm',
'Y11_ReIm_2x2_Sm','Y12_ReIm_2x2_Sm','Y21_ReIm_2x2_Sm','Y22_ReIm_2x2_Sm',
'Ynets_ReIm_4x4_Sm','Unets_ReIm_4x1_V','Inets_ReIm_4x1_A','Inets1_ReIm_A',
'Inets2_ReIm_A','PQnets1_ReIm_VA','PQnets2_ReIm_VA','Y11_qd_2x2_Sm',
'Y12_qd_2x2_Sm','Y21_qd_2x2_Sm','Y22_qd_2x2_Sm','Ynets_qd_4x4_Sm',
'Unets_qd_4x1_V','Inets_qd_4x1_A','Inets1_qd_A','Inets2_qd_A',
'PQnets1_qd_VA','PQnets2_qd_VA','dPnets1_dUq1_Wt_V','dPnets1_dUd1_Wt_V',
'dPnets1_dUq2_Wt_V','dPnets1_dUd2_Wt_V','dQnets1_dUq1_var_V',
dQnets1_dUd1_var_V','dQnets1_dUq2_var_V','dQnets1_dUd2_var_V',
'dPQnets1_dUqd1_2x2_VA_V','dPQnets1_dUqd2_2x2_VA_V','dPnets2_dUq1_Wt_V',
'dPnets2_dUd1_Wt_V','dPnets2_dUq2_Wt_V','dPnets2_dUd2_Wt_V',
'dQnets2_dUq1_var_V','dQnets2_dUd1_var_V','dQnets2_dUq2_var_V',
'dQnets2_dUd2_var_V','dPQnets2_dUqd1_2x2_VA_V','dPQnets2_dUqd2_2x2_VA_V',
'dPQnets_dUqd_4x4_VA_V','Uq1Uq2_plus_Ud1Ud2_VV','Uq1Ud2_minus_Uq2Ud1_VV',
'dPnets1_dD1_Wt_radian','dPnets1_dD2_Wt_radian','dPnets1_dW1_Wt_radian_s',
'dPnets1_dW2_Wt_radian_s','dQnets1_dD1_var_radian',dQnets1_dD2_var_radian',
'dQnets1_dW1_var_radian_s','dQnets1_dW2_var_radian_s',
'dPQnets1_dD1D2_2x2_VA_radian','dPQnets1_dW1W2_2x2_VA_radian_s',

```

```

'dPnets2_dD1_Wt_radian','dPnets2_dD2_Wt_radian','dPnets2_dW1_Wt_radian_s',
'dPnets2_dW2_Wt_radian_s','dQnets2_dD1_var_radian','dQnets2_dD2_var_radian',
'dQnets2_dW1_var_radian_s','dQnets2_dW2_var_radian_s',
'dPQnets2_dD1D2_2x2_VA_radian','dPQnets2_dW1W2_2x2_VA_radian_s',
'dPQnets_dDW_4x4_VA_radian_radian_s', };
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets = struct(
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{01},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{02},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{03},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{04},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{05},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{06},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{07},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{08},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{09},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{10},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{11},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{12},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{13},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{14},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{15},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{16},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{17},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{18},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{19},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{20},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{21},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{22},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{23},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{24},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{25},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{26},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{27},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{28},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{29},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{30},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{31},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{32},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{33},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{34},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{35},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{36},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{37},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{38},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{39},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{40},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{41},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{42},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{43},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{44},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{45},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{46},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{47},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{48},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{49},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{50},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{51},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{52},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{53},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{54},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{55},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{56},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{57},NaN,

```

```

FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{58},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{59},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{60},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{61},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{62},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{63},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{64},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{65},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{66},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{67},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{68},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{69},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{70},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{71},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{72},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{73},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{74},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{75},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{76},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{77},NaN,
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{78},NaN, 'END',NaN );
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets1ReIm_Sm =
complex((Ynets_1_Re_uSm*1e-6),(Ynets_1_Im_uSm*1e-6));
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Znets12ReIm_Om =
complex(Znets_12_Re_Om,Znets_12_Im_Om);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Znets21ReIm_Om =
complex(Znets_21_Re_Om,Znets_21_Im_Om);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets2ReIm_Sm =
complex((Ynets_2_Re_uSm*1e-6),(Ynets_2_Im_uSm*1e-6));
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Znets1ReIm_Om =
1/Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets1ReIm_Sm;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets12ReIm_Sm =
1/Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Znets12ReIm_Om;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets21ReIm_Sm =
1/Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Znets21ReIm_Om;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Znets2ReIm_Om =
1/Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets2ReIm_Sm;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm =
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets1ReIm_Sm +
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets12ReIm_Sm;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm = -
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets12ReIm_Sm;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm = -
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets21ReIm_Sm;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm =
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets2ReIm_Sm +
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets21ReIm_Sm;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_2x2_Sm =
[real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm), -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm);
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm),
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm)];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_2x2_Sm =
[real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm), -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm);
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm),
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm)];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_2x2_Sm =
[real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm), -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm);
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm),
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm)];

```

```

Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_2x2_Sm =
[real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm), -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm);
 imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm),
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm)];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets_ReIm_4x4_Sm =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_2x2_Sm,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_2x2_Sm;
 Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_2x2_Sm,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_2x2_Sm];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Unets_ReIm_4x1_V =
[real(SM1_CalculationModeParameters.UmodeReIm_V);
 imag(SM1_CalculationModeParameters.UmodeReIm_V);
 real(SM2_CalculationModeParameters.UmodeReIm_V);
 imag(SM2_CalculationModeParameters.UmodeReIm_V)];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_ReIm_4x1_A =
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets_ReIm_4x4_Sm *
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Unets_ReIm_4x1_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets1_ReIm_A =
complex(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_ReIm_4x1_A(1,1),Re
sult_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_ReIm_4x1_A(2,1));
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets2_ReIm_A =
complex(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_ReIm_4x1_A(3,1),Re
sult_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_ReIm_4x1_A(4,1));
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.PQnets1_ReIm_VA =
SM1_CalculationModeParameters.UmodeReIm_V*conj(Result_Struct_CalculationModeP
arameters_Nets.Inets1_ReIm_A);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.PQnets2_ReIm_VA =
SM2_CalculationModeParameters.UmodeReIm_V*conj(Result_Struct_CalculationModeP
arameters_Nets.Inets2_ReIm_A);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_qd_2x2_Sm =
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_2x2_Sm;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_qd_2x2_Sm = [%
(Y12_re*cos(621)-Y12_im*sin(621)), -(Y12_re*sin(621)+Y12_im*cos(621));
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm)*cos(SM2_Calcu
lationModeParameters.Delta_radian-SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian)
- imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm)*
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian)), -
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm)*
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian) +
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm)*
cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian));
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm)*
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm)*
cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian)),
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm)*cos(SM2_Calcu
lationModeParameters.Delta_radian-SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian)
- imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm)*
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian))];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_qd_2x2_Sm = [%
(Y21_re*cos(612)-Y21_im*sin(612)), -(Y21_re*sin(612)+Y21_im*cos(612));
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm)*cos(SM1_Calcu
lationModeParameters.Delta_radian-SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian)
- imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm)*

```



```

sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian)), -
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian) +
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian));
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian) +
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian)),
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian))];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_qd_2x2_Sm =
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_2x2_Sm;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets_qd_4x4_Sm =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_qd_2x2_Sm,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_qd_2x2_Sm;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_qd_2x2_Sm,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_qd_2x2_Sm];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Unets_qd_4x1_V =
[real(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
imag(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
real(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
imag(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V)];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_qd_4x1_A =
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets_qd_4x4_Sm *
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Unets_qd_4x1_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets1_qd_A =
complex(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_qd_4x1_A(1,1),
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_qd_4x1_A(2,1));
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets2_qd_A =
complex(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_qd_4x1_A(3,1),Resu
lt_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_qd_4x1_A(4,1));
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.PQnets1_qd_VA =
SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V*
conj(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets1_qd_A);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.PQnets2_qd_VA =
SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V*
conj(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets2_qd_A);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUq1_Wt_V =
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets1_qd_A)
+real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm) *
real(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm) *
imag(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUd1_Wt_V =
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets1_qd_A)
+real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm) *
imag(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm) *
real(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUq2_Wt_V =
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *

```

```

cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian))
*real(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V)
+(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian))
*imag(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUd2_Wt_V = -
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian))
*real(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V)
+(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian))
*imag(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dUq1_var_V = -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets1_qd_A)
+real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm) *
imag(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm) *
real(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dUd1_var_V =
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets1_qd_A) -
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm) *
real(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm) *
imag(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dUq2_var_V =
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUd2_Wt_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dUd2_var_V = -
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUq2_Wt_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets1_dUqd1_2x2_VA_V =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUq1_Wt_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUd1_Wt_V];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dUq1_var_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dUd1_var_V];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets1_dUqd2_2x2_VA_V =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUq2_Wt_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUd2_Wt_V];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dUq2_var_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dUd2_var_V];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUq1_Wt_V =
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian))
*real(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V)
+(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *

```

```

sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian))
*imag(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUd1_Wt_V = -
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian))
*real(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V)
+(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian))
*imag(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUq2_Wt_V =
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets2_qd_A)
+real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm) *
real(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm) *
imag(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUd2_Wt_V =
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets2_qd_A)
+real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm) *
imag(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm) *
real(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dUq1_var_V =
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUd1_Wt_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dUd1_var_V = -
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUq1_Wt_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dUq2_var_V = -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets2_qd_A)
+real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm) *
imag(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm) *
real(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dUd2_var_V =
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets2_qd_A) -
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm) *
real(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm) *
imag(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets2_dUqd1_2x2_VA_V =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUq1_Wt_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUd1_Wt_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dUq1_var_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dUd1_var_V];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets2_dUqd2_2x2_VA_V
=[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUq2_Wt_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUd2_Wt_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dUq2_var_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dUd2_var_V];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets_dUqd_4x4_VA_V =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets1_dUqd1_2x2_VA_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets1_dUqd2_2x2_VA_V];

```

```

Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets2_dUqd1_2x2_VA_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets2_dUqd2_2x2_VA_V];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Uq2_plus_Ud1Ud2_VV =
real(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) *
real(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V)
+imag(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) *
imag(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Ud2_minus_Uq2Ud1_VV =
real(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) *
imag(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) -
real(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) *
imag(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dD1_Wt_radian =
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Uq2_plus_Ud1Ud2_VV
*(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian))
+Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Ud2_minus_Uq2Ud1_VV
*(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian));
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dD2_Wt_radian =
Nets.dPnets1_dD1_Wt_radian;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dW1_Wt_radian_s = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dW2_Wt_radian_s = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dD1_var_radian =
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Uq2_plus_Ud1Ud2_VV
*(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian)) -
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Ud2_minus_Uq2Ud1_VV
*(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian));
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dD2_var_radian = -
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dD1_var_radian;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dW1_var_radian_s = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dW2_var_radian_s = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets1_dD1D2_2x2_VA_radian =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dD1_Wt_radian,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dD2_Wt_radian;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dD1_var_radian,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dD2_var_radian];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets1_dW1W2_2x2_VA_radian_s =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dW1_Wt_radian_s,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dW2_Wt_radian_s;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dW1_var_radian_s,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dW2_var_radian_s];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dD1_Wt_radian = -
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Uq2_plus_Ud1Ud2_VV
*(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *

```

```

sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm)*
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian))
+Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Ud2_minus_Uq2Ud1_VV
*(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm)*
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm)*
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian));
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dD2_Wt_radian = -
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dD1_Wt_radian;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dW1_Wt_radian_s = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dW2_Wt_radian_s = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dD1_var_radian = -
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Uq2_plus_Ud1Ud2_VV
*(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm)*
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm)*
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian)) -
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Ud2_minus_Uq2Ud1_VV
*(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm)*
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm)*
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian));
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dD2_var_radian = -
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dD1_var_radian;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dW1_var_radian_s = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dW2_var_radian_s = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets2_dD1D2_2x2_VA_radian =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dD1_Wt_radian,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dD2_Wt_radian;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dD1_var_radian,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dD2_var_radian];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets2_dW1W2_2x2_VA_radian_s =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dW1_Wt_radian_s,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dW2_Wt_radian_s;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dW1_var_radian_s,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dW2_var_radian_s];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets2_dDW_4x4_VA_radian_radian
_s =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets1_dD1D2_2x2_VA_radian,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets1_dW1W2_2x2_VA_radian_s;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets2_dD1D2_2x2_VA_radian,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets2_dW1W2_2x2_VA_radian_s];
end;

function [eig_2m_solve, eig_2m_eig] = ...
E_q_const_eig_2m_balance_PQqd(SymbolicSolution,
NumberNode_1,Pnom_MWt_1,cosFnom_pu_1,Unom_kV_1,...
Rq_Om_1,Lq_pu_1,Rd_Om_1,Ld_pu_1,
Lsigma_q_pu_1,Lsigma_d_pu_1,L_d_pu_1,L_q_pu_1,L_d_pu_1,L_q_pu_1, ...
Td0_s_1,Tq0_s_1,T_d0_s_1,T_q0_s_1,T_d0_s_1,T_q0_s_1,T_da_s_1,T_qa_s_1,
T_d_s_1,T_q_s_1,T_d_s_1,T_q_s_1, Tj_s_1, NumberNode_2, Pnom_MWt_2,
cosFnom_pu_2, Unom_kV_2, Rq_Om_2, Lq_pu_2, Rd_Om_2,Ld_pu_2,Lsigma_q_pu_2,
Lsigma_d_pu_2,L_d_pu_2,L_q_pu_2,L_d_pu_2,L_q_pu_2,Td0_s_2,Tq0_s_2,T_d0_s_2,
T_q0_s_2,T_d0_s_2,T_q0_s_2,T_da_s_2,T_qa_s_2,T_d_s_2,T_q_s_2,T_d_s_2,

```

```

T_q_s_2, Tj_s_2, Pmode_MWt_1, Qmode_Mvar_1, Umode_kV_1, YUmode_degree_1,
Pmode_MWt_2, Qmode_Mvar_2, Umode_kV_2, YUmode_degree_2, Ynets_1_Re_uSm,
Ynets_1_Im_uSm, Znets_12_Re_Om, Znets_12_Im_Om, Znets_21_Re_Om,
Znets_21_Im_Om, Ynets_2_Re_uSm, Ynets_2_Im_uSm)
clc; eig_2m_solve = NaN; eig_2m_eig = NaN;
syms p dPdD switch SymbolicSolution case {true} syms w0
syms Tj1 Tdo1 dPg1_dUq1 dPg1_dUd1 dQg1_dUq1 dQg1_dUd1
syms Tj2 Tdo2 dPg2_dUq2 dPg2_dUd2 dQg2_dUq2 dQg2_dUd2
syms dPn1_dUq1 dPn1_dUd1 dPn1_dUq2 dPn1_dUd2 dQn1_dUq1 dQn1_dUd1 dQn1_dUq2
dQn1_dUd2 dPn2_dUq1 dPn2_dUd1 dPn2_dUq2 dPn2_dUd2 dQn2_dUq1 dQn2_dUd1
dQn2_dUq2 dQn2_dUd2 dPn1_dD1 dPn1_dD2 dQn1_dD1 dQn1_dD2 dPn2_dD1 dPn2_dD2
dQn2_dD1 dQn2_dD2
syms dPg_dDelta dPg_dU dPg_dYu dQg_dDelta dQg_dU dQg_dYu dPn_dDelta dPn_dU
dPn_dYu dQn_dDelta dQn_dU dQn_dYu
syms Rq_Om_1 Xq_Om_1 Rd_Om_1 Xd_Om_1 Rq_Om_2 Xq_Om_1 Rd_Om_2 Xd_Om_2
Ynets_1_Re_Sm Ynets_1_Im_Sm Znets_12_Re_Om Znets_12_Im_Om Znets_21_Re_Om
Znets_21_Im_Om Ynets_2_Re_Sm Ynets_2_Im_uSm
dPQg1_dUqd1_2x2 = [dPg1_dUq1, dPg1_dUd1;
dQg1_dUq1, dQg1_dUd1];
dPQg2_dUqd2_2x2 = [dPg2_dUq2, dPg2_dUd2;
dQg2_dUq2, dQg2_dUd2];
dPQn_Uqd_4x4 = [dPn1_dUq1, dPn1_dUd1, dPn1_dUq2, dPn1_dUd2;
dQn1_dUq1, dQn1_dUd1, dQn1_dUq2, dQn1_dUd2;
dPn2_dUq1, dPn2_dUd1, dPn2_dUq2, dPn2_dUd2;
dQn2_dUq1, dQn2_dUd1, dQn2_dUq2, dQn2_dUd2];
dPQn1_dD_2x2 = [dPn1_dD1, dPn1_dD2;
dQn1_dD1, dQn1_dD2];
dPQn1_dW_2x2 = zeros(2);
dPQn2_dD_2x2 = [dPn2_dD1, dPn2_dD2;
dQn2_dD1, dQn2_dD2];
dPQn2_dW_2x2 = zeros(2);
otherwise format long; f0 = 50;
w0 = 2*pi*f0;
[SM1_TBParameters, SM1_CalculationTBParameters,
SM1_CalculationModeParameters] =
eig_get_JacobiMatrix_generator_balancePQqd(NumberNode_1,
Pnom_MWt_1, cosFnom_pu_1, Unom_kV_1, Rq_Om_1, Lq_pu_1, Rd_Om_1, Ld_pu_1,
Lsigma_q_pu_1, Lsigma_d_pu_1, L_d_pu_1, L_q_pu_1, L_d_pu_1, L_q_pu_1,
Td0_s_1, Tq0_s_1, T_d0_s_1, T_q0_s_1, T_d0_s_1, T_q0_s_1,
T_da_s_1, T_qa_s_1, T_d_s_1, T_q_s_1, T_d_s_1, T_q_s_1, Tj_s_1, Pmode_MWt_1,
Qmode_Mvar_1, Umode_kV_1, YUmode_degree_1);
[SM2_TBParameters, SM2_CalculationTBParameters,
SM2_CalculationModeParameters] =
eig_get_JacobiMatrix_generator_balancePQqd(NumberNode_2,
Pnom_MWt_2, cosFnom_pu_2, Unom_kV_2, Rq_Om_2, Lq_pu_2, Rd_Om_2, Ld_pu_2,
Lsigma_q_pu_2, Lsigma_d_pu_2, L_d_pu_2, L_q_pu_2, L_d_pu_2, L_q_pu_2,
Td0_s_2, Tq0_s_2, T_d0_s_2, T_q0_s_2, T_d0_s_2, T_q0_s_2,
T_da_s_2, T_qa_s_2, T_d_s_2, T_q_s_2, T_d_s_2, T_q_s_2, Tj_s_2, Pmode_MWt_2,
Qmode_Mvar_2, Umode_kV_2, YUmode_degree_2);
[Nets_CalculationModeParameters] =
eig_2m_get_JacobiMatrix_nets_balancePQ(SM1_CalculationModeParameters,
SM2_CalculationModeParameters, Ynets_1_Re_uSm, Ynets_1_Im_uSm,
Znets_12_Re_Om, Znets_12_Im_Om, Znets_21_Re_Om, Znets_21_Im_Om,
Ynets_2_Re_uSm, Ynets_2_Im_uSm);
Tj1 = SM1_CalculationTBParameters.Tj_VAs;
Tj2 = SM2_CalculationTBParameters.Tj_VAs;
dPQg1_dUqd1_2x2 = SM1_CalculationModeParameters.dPQg_dUqd_withE_qd_2x2_VA_V;
dPQg2_dUqd2_2x2 = SM2_CalculationModeParameters.dPQg_dUqd_withE_qd_2x2_VA_V;
dPQn_Uqd_4x4 = Nets_CalculationModeParameters.dPQnets_dUqd_4x4_VA_V;
dPQn1_dD_2x2 = Nets_CalculationModeParameters.dPQnets1_dD1D2_2x2_VA_radian;
dPQn1_dW_2x2 = Nets_CalculationModeParameters.dPQnets1_dW1W2_2x2_VA_radian_s;
dPQn2_dD_2x2 = Nets_CalculationModeParameters.dPQnets2_dD1D2_2x2_VA_radian;
dPQn2_dW_2x2 = Nets_CalculationModeParameters.dPQnets2_dW1W2_2x2_VA_radian_s;

```

```

end;
pDWotn_2x2 = [p, -1;
0, p];
invTjotn_2x4 = [0, 0, 0, 0;
w0/Tj1, 0, -w0/Tj2, 0];
dPQg_Uqd_4x4 = [dPQg1_dUqd1_2x2, zeros(2);
zeros(2), dPQg2_dUqd2_2x2];
dPQn1_dD_2x1 = [dPQn1_dD_2x2(1,2); dPQn1_dD_2x2(2,2)];
dPQn2_dD_2x1 = [dPQn2_dD_2x2(1,2); dPQn2_dD_2x2(2,2)];
dPQn1_dW_2x1 = [dPQn1_dW_2x2(1,2); dPQn1_dW_2x2(2,2)];
dPQn2_dW_2x1 = [dPQn2_dW_2x2(1,2); dPQn2_dW_2x2(2,2)];
dPQn_dDWotn_4x2 = [ dPQn1_dD_2x1, dPQn1_dW_2x1;
dPQn2_dD_2x1, dPQn2_dW_2x1];
[dMotn_2, dMotn_2_iskl_1, dPQ_dDWotn_4x2, Add_pDWotn_2x2] =
get_dPQ_dDWotn_2(pDWotn_2x2,invTjotn_2x4,dPQg_Uqd_4x4,dPQn_dDWotn_4x2,
dPQn_Uqd_4x4); det_dMotn_2 = vpa(det(dMotn_2));
det_dMotn_2_iskl_1 = vpa(det(dMotn_2_iskl_1));
dMotn_2_iskl_2 = Add_pDWotn_2x2+dMotn_2_iskl_1(1:2,1:2);
dMotn_2_iskl_2_solve = vpa(dMotn_2_iskl_2);
det_dMotn_2_iskl_2_solve = det(dMotn_2_iskl_2_solve);
dMotn_2_iskl_2_eig = vpa(dMotn_2_iskl_2 - diag([p, p]));
eig_2m_solve = double(solve(det_dMotn_2_iskl_2_solve,p));
iCount = size(eig_2m_solve,1);
for iIndex = 1:iCount
switch (~isreal(eig_2m_solve(iIndex)))
case {true} eig_2m_solve(iIndex) =
complex(real(eig_2m_solve(iIndex)),imag(eig_2m_solve(iIndex))/(2*pi));
end; end; eig_2m_eig = (-1) * double(eig(dMotn_2_iskl_2_eig));
iCount = size(eig_2m_eig,1); for iIndex = 1:iCount
switch (~isreal(eig_2m_eig(iIndex)))
case {true} eig_2m_eig(iIndex) =
complex(real(eig_2m_eig(iIndex)),imag(eig_2m_eig(iIndex))/(2*pi));
end; end; end function [Result_dM_2, Result_dM_2_iskl_1, Result_dPQ_dDW_2,
Result_Add_pDWotn] =
get_dPQ_dDWotn_2(pDWotn_2x2,invTjotn_2x4,dPQg_Uqd_4x4,dPQn_dDWotn_4x2,dPQn_Uq
d_4x4)
A11 = [pDWotn_2x2, -invTjotn_2x4; zeros(4,2), eye(4)];
A12 = [zeros(2,4); -dPQg_Uqd_4x4];
A21 = [-dPQn_dDWotn_4x2, zeros(4,4)];
A22 = dPQg_Uqd_4x4 - dPQn_Uqd_4x4;
Result_dM_2 = [A11, A12;
A21, A22];
A21_ = A22 \ A21;
A11_ = -A12 * A21_;
Result_dM_2_iskl_1 = A11 + A11_;
dM_2_iskl_1_01_02_03_06 = Result_dM_2_iskl_1(1:2,3:6);
dM_2_iskl_1_03_06_01_02 = Result_dM_2_iskl_1(3:6,1:2);
dM_2_iskl_1_03_06_03_06 = Result_dM_2_iskl_1(3:6,3:6);
Result_dPQ_dDW_2 = dM_2_iskl_1_03_06_03_06 \ dM_2_iskl_1_03_06_01_02;
Result_Add_pDWotn = invTjotn_2x4 * Result_dPQ_dDW_2;
end

```

```

function [Result_Struct_TBParameters_SM,
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM,
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM] =
eig_get_JacobiMatrix_generator_balancePQqd(NumberNode,
Pnom_MWt,cosFnom_pu,Unom_kV, Rq_Om,Lq_pu,Rd_Om,Ld_pu,
Lsigma_q_pu,Lsigma_d_pu,L_d_pu,L_q_pu,L__d_pu,L__q_pu,
Td0_s,Tq0_s,T_d0_s,T_q0_s,T__d0_s,T__q0_s,
T__da_s,T__qa_s,T__d_s,T__q_s,T__d_s,T__q_s, Tj_s, Pmode_MWt, Qmode_Mvar,
Umode_kV, YUmode_degree)
clc; FieldsStruct_TBParameters_SM = { 'NumberNode', 'Pnom_Wt', 'Unom_V',
'fnom_Hz', 'cosFnom_pu', 'Ld_pu', 'Lq_pu', 'Lsigma_d_pu', 'Lsigma_q_pu',

```

```

'L_d_pu', 'L_q_pu', 'L__d_pu', 'L__q_pu', 'Td0_s', 'Tq0_s', 'T_d0_s',
'T_q0_s', 'T__d0_s', 'T__q0_s', 'T__da_s', 'T__qa_s', 'T_d_s', 'T_q_s',
'T__d_s', 'T__q_s', 'Tj_s', };
Result_Struct_TBParameters_SM = struct(
FieldsStruct_TBParameters_SM{01},NaN, FieldsStruct_TBParameters_SM{02},NaN,
FieldsStruct_TBParameters_SM{03},NaN, FieldsStruct_TBParameters_SM{04},NaN,
FieldsStruct_TBParameters_SM{05},NaN, FieldsStruct_TBParameters_SM{06},NaN,
FieldsStruct_TBParameters_SM{07},NaN, FieldsStruct_TBParameters_SM{08},NaN,
FieldsStruct_TBParameters_SM{09},NaN, FieldsStruct_TBParameters_SM{10},NaN,
FieldsStruct_TBParameters_SM{11},NaN, FieldsStruct_TBParameters_SM{12},NaN,
FieldsStruct_TBParameters_SM{13},NaN, FieldsStruct_TBParameters_SM{14},NaN,
FieldsStruct_TBParameters_SM{15},NaN, FieldsStruct_TBParameters_SM{16},NaN,
FieldsStruct_TBParameters_SM{17},NaN, FieldsStruct_TBParameters_SM{18},NaN,
FieldsStruct_TBParameters_SM{19},NaN, FieldsStruct_TBParameters_SM{20},NaN,
FieldsStruct_TBParameters_SM{21},NaN, FieldsStruct_TBParameters_SM{22},NaN,
FieldsStruct_TBParameters_SM{23},NaN, FieldsStruct_TBParameters_SM{24},NaN,
FieldsStruct_TBParameters_SM{25},NaN, FieldsStruct_TBParameters_SM{26},NaN,
'END',NaN ..);
Result_Struct_TBParameters_SM.NumberNode = NumberNode;
Result_Struct_TBParameters_SM.Pnom_Wt = Pnom_MWt*1e6;
Result_Struct_TBParameters_SM.Unom_V = Unom_kV*1e3;
Result_Struct_TBParameters_SM.fnom_Hz = 50;
Result_Struct_TBParameters_SM.cosFnom_pu = cosFnom_pu;
Result_Struct_TBParameters_SM.Ld_pu = Ld_pu;
Result_Struct_TBParameters_SM.Lq_pu = Lq_pu;
Result_Struct_TBParameters_SM.Lsigma_d_pu = Lsigma_d_pu;
Result_Struct_TBParameters_SM.Lsigma_q_pu = Lsigma_q_pu;
Result_Struct_TBParameters_SM.L_d_pu = L_d_pu;
Result_Struct_TBParameters_SM.L_q_pu = L_q_pu;
Result_Struct_TBParameters_SM.L__d_pu = L__d_pu;
Result_Struct_TBParameters_SM.L__q_pu = L__q_pu;
Result_Struct_TBParameters_SM.Td0_s = Td0_s;
Result_Struct_TBParameters_SM.Tq0_s = Tq0_s;
Result_Struct_TBParameters_SM.Tj_s = Tj_s;
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM = { 'NumberModel', 'Snom_VA',
'Qnom_var', 'Inom_A', 'Znom_Om', 'Wnom_rad_s', 'Rd_Om', 'Rq_Om', 'Ld_Hn',
'Lq_Hn', 'Xd_Om', 'Xq_Om', 'Lsigma_d_Hn', 'Lsigma_q_Hn', 'Xsigma_d_Om',
'Xsigma_q_Om', 'Lad_pu', 'Laq_pu', 'Lad_Hn', 'Laq_Hn', 'Xad_Om', 'Xaq_Om',
'L_ad_pu', 'L_aq_pu', 'L_d_Hn', 'L_q_Hn', 'X_d_Om', 'X_q_Om',
'L__ad_pu', 'L__aq_pu', 'L__d_Hn', 'L__q_Hn', 'X__d_Om', 'X__q_Om',
'Lsigma_fd_pu', 'Lsigma_fq_pu', 'Lsigma_fd_Hn', 'Lsigma_fq_Hn',
'Xsigma_fd_Om', 'Xsigma_fq_Om', 'Rfd_Om', 'Rfq_Om', 'Lfd_pu', 'Lfq_pu',
'Lfd_Hn', 'Lfq_Hn', 'Xfd_Om', 'Xfq_Om', 'Lsigma_rd_pu', 'Lsigma_rq_pu',
'Lsigma_rd_Hn', 'Lsigma_rq_Hn', 'Xsigma_rd_Om', 'Xsigma_rq_Om', 'Rrd_Om',
'Rrq_Om', 'Lrd_pu', 'Lrq_pu', 'Lrd_Hn', 'Lrq_Hn', 'Xrd_Om', 'Xrq_Om',
'Trd_s', 'Trq_s', 'mu_adf_pu', 'mu_aqf_pu', 'sigma_adf_pu', 'sigma_aqf_pu',
'mu_adrd_pu', 'mu_aqrq_pu', 'sigma_adrd_pu', 'sigma_aqrq_pu', 'mu_frd_pu',
'mu_frq_pu', 'sigma_frd_pu', 'sigma_frq_pu', 'Tj_Wts', 'Tj_VAs',
'Zqd_2x2_Om', 'Yqd_2x2_Sm', 'Yqd11_2x2_Sm', 'Yqd12_2x2_Sm', 'Yqd21_2x2_Sm',
'Yqd22_2x2_Sm', 'Z_qd_2x2_Om', 'Y_qd_2x2_Sm', 'Y_qd11_2x2_Sm',
'Y_qd12_2x2_Sm', 'Y_qd21_2x2_Sm', 'Y_qd22_2x2_Sm', 'Z__qd_2x2_Om',
'Y__qd_2x2_Sm', 'Y__qd11_2x2_Sm', 'Y__qd12_2x2_Sm', 'Y__qd21_2x2_Sm',
'Y__qd22_2x2_Sm', };
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM = struct(
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{01},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{02},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{03},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{04},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{05},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{06},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{07},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{08},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{09},NaN, %

```





```

FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{73},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{74},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{75},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{76},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{77},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{78},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{79},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{80},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{81},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{82},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{83},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{84},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{85},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{86},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{87},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{88},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{89},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{90},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{91},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{92},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{93},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{94},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{95},NaN, %
FieldsStruct_CalculationTBParameters_SM{96},NaN, %
'END',NaN );
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Snom_VA =
Result_Struct_TBParameters_SM.Pnom_Wt/
Result_Struct_TBParameters_SM.cosFnom_pu;
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Qnom_var =
sqrt(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Snom_VA^2 -
Result_Struct_TBParameters_SM.Pnom_Wt^2);
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Inom_A =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Snom_VA/
Result_Struct_TBParameters_SM.Unom_V;
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Znom_Om =
Result_Struct_TBParameters_SM.Unom_V/
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Inom_A;
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Wnom_rad_s =
2*pi*Result_Struct_TBParameters_SM.fnom_Hz;
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Rd_Om = Rd_Om;
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Rq_Om = Rq_Om;
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xd_Om =
Result_Struct_TBParameters_SM.Ld_pu*
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Znom_Om;
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xq_Om =
Result_Struct_TBParameters_SM.Lq_pu*
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Znom_Om;
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lad_pu =
Result_Struct_TBParameters_SM.Ld_pu -
Result_Struct_TBParameters_SM.Lsigma_d_pu;
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Laq_pu =
Result_Struct_TBParameters_SM.Lq_pu -
Result_Struct_TBParameters_SM.Lsigma_q_pu;
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lad_Hn =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lad_pu
*Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Znom_Om
/Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Wnom_rad_s;
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Laq_Hn =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Laq_pu
*Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Znom_Om
/Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Wnom_rad_s;
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xad_Om =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lad_pu*

```

```

Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Znom_Om;
  Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xaq_Om =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Laq_pu*Result_Struct_CalculationTBPA
rameters_SM.Znom_Om;
  switch (~isnan(Result_Struct_TBParameters_SM.L_d_pu))
  case {true} Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.L_ad_pu =
Result_Struct_TBParameters_SM.L_d_pu -
Result_Struct_TBParameters_SM.Lsigma_d_pu;
  otherwise Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.L_ad_pu = NaN;
  end; switch (~isnan(Result_Struct_TBParameters_SM.L_q_pu))
  case {true} Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.L_aq_pu =
Result_Struct_TBParameters_SM.L_q_pu -
Result_Struct_TBParameters_SM.Lsigma_q_pu;
  otherwise Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.L_aq_pu = NaN;
  end; switch (~isnan(Result_Struct_TBParameters_SM.L_d_pu))
  case {true} Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X_d_Om =
Result_Struct_TBParameters_SM.L_d_pu*
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Znom_Om; otherwise
  Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X_d_Om =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xd_Om;
  end; switch (~isnan(Result_Struct_TBParameters_SM.L_q_pu))
  case {true} Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X_q_Om =
Result_Struct_TBParameters_SM.L_q_pu*Result_Struct_CalculationTBParameters_SM
.Znom_Om; otherwise
  Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X_q_Om =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xq_Om;
  end; switch (~isnan(Result_Struct_TBParameters_SM.L__d_pu))
  case {true} Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X__d_Om =
Result_Struct_TBParameters_SM.L__d_pu*
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Znom_Om;
  Otherwise Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X__d_Om =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X_d_Om;
  end; switch (~isnan(Result_Struct_TBParameters_SM.L__q_pu))
  case {true} Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X__q_Om =
Result_Struct_TBParameters_SM.L__q_pu*
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Znom_Om;
  Otherwise Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X__q_Om =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X_q_Om;
  end; switch (~isnan(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.L_ad_pu))
  case {true} Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lsigma_fd_pu =
1/(1/Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.L_ad_pu
- 1/Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lad_pu);
  Otherwise Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lsigma_fd_pu = NaN;
  end; switch (~isnan(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.L_aq_pu))
  case {true} Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lsigma_fq_pu =
1/(1/Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.L_aq_pu -
1/Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Laq_pu);
  otherwise Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lsigma_fq_pu = NaN;
  end; switch (~isnan(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lsigma_fd_pu))
  case {true} Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lfd_pu =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lad_pu +
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lsigma_fd_pu;
  otherwise Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lfd_pu = inf;
  end; switch (~isnan(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lsigma_fq_pu))
  case {true} Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lfq_pu =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Laq_pu +
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lsigma_fq_pu;
  otherwise Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lfq_pu = inf;
  end; switch (~isinf(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lfd_pu))
  case {true} Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xfd_Om =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lfd_pu*
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Znom_Om;
  Otherwise Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xfd_Om = inf;

```

```

end; switch (~isinf(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lfq_pu))
case {true} Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xfq_Om =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Lfq_pu*
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Znom_Om;
Otherwise Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xfq_Om = inf;
end; Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Tj_Wts =
Result_Struct_TBParameters_SM.Pnom_Wt*Result_Struct_TBParameters_SM.Tj_s;
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Tj_VAs =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Snom_VA*
Result_Struct_TBParameters_SM.Tj_s;
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Zqd_2x2_Om =
[Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Rq_Om, -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xd_Om;
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xq_Om,
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Rd_Om];
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd_2x2_Sm =
inv(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Zqd_2x2_Om);
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd11_2x2_Sm =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd_2x2_Sm(1,1);
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd12_2x2_Sm =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd_2x2_Sm(1,2);
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd21_2x2_Sm =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd_2x2_Sm(2,1);
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd22_2x2_Sm =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd_2x2_Sm(2,2);
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Z_qd_2x2_Om =
[Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Rq_Om, -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X_d_Om;
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X_q_Om,
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Rd_Om];
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y_qd_2x2_Sm =
inv(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Z_qd_2x2_Om);
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y_qd11_2x2_Sm =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y_qd_2x2_Sm(1,1);
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y_qd12_2x2_Sm =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y_qd_2x2_Sm(1,2);
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y_qd21_2x2_Sm =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y_qd_2x2_Sm(2,1);
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y_qd22_2x2_Sm =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y_qd_2x2_Sm(2,2);
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Z__qd_2x2_Om =
[Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Rq_Om, -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X__d_Om;
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X__q_Om,
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Rd_Om];
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y__qd_2x2_Sm =
inv(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Z__qd_2x2_Om);
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y__qd11_2x2_Sm =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y__qd_2x2_Sm(1,1);
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y__qd12_2x2_Sm =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y__qd_2x2_Sm(1,2);
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y__qd21_2x2_Sm =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y__qd_2x2_Sm(2,1);
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y__qd22_2x2_Sm =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y__qd_2x2_Sm(2,2);
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM = { 'Pmode_Wt', 'Qmode_var',
'Umode_V', 'YUmode_degree', 'SmodeReIm_VA', 'UmodeReIm_V', 'Umode_pu',
'YUmode_radian', 'UmodeReIm_pu', 'ImodeReIm_A', 'ImodeReIm_pu',
'EQDmodeReIm_V', 'EQDmode_V', 'Delta_radian', 'EQDmodeReIm_pu', 'EQDmode_pu',
'Delta_degree', 'Uqdmode_V', 'Uqdmode_pu', 'Iqdmode_A', 'Iqdmode_pu',
'Eqdmode_V', 'Eqdmode_pu', 'E_qdmode_V', 'E_qdmode_pu', 'E__qdmode_V',
'E__qdmode_pu', 'EmodeReIm_V', 'EmodeReIm_pu', 'YReIm11_2x2_Sm',
'YReIm12_2x2_Sm', 'YReIm21_2x2_Sm', 'YReIm22_2x2_Sm', 'YReIm_2x2_Sm',

```

```

'ZReIm_2x2_Om', 'ZReIm11_2x2_Om', 'ZReIm12_2x2_Om', 'ZReIm21_2x2_Om',
'ZReIm22_2x2_Om', 'Eqdmode_minus_Uqdmode_2x1_V',
'EmodeReIm_minus_UmodeReIm_2x1_V', 'Iqdmode_2x1_A', 'ImodeReIm_2x1_A',
'PQmode_qd_VA', 'PQmode_ReIm_VA', 'dPg_dUq_withEqd_Wt_V',
'dPg_dUd_withEqd_Wt_V', 'dQg_dUq_withEqd_var_V', 'dQg_dUd_withEqd_var_V',
'dPQg_dUqd_withEqd_2x2_VA_V', 'dPg_dUq_withE_qd_Wt_V',
'dPg_dUd_withE_qd_Wt_V', 'dQg_dUq_withE_qd_var_V', 'dQg_dUd_withE_qd_var_V',
'dPQg_dUqd_withE_qd_2x2_VA_V', 'dPg_dUq_withE_qd_Wt_V',
'dPg_dUd_withE_qd_Wt_V', 'dQg_dUq_withE_qd_var_V',
'dQg_dUd_withE_qd_var_V', 'dPQg_dUqd_withE_qd_2x2_VA_V', 'dPg_dEq_Wt_V',
'dPg_dEd_Wt_V', 'dQg_dEq_var_V', 'dQg_dEd_var_V', 'dPQg_dEqd_2x2_VA_V',
'dPg_dE_q_Wt_V', 'dPg_dE_d_Wt_V', 'dQg_dE_q_var_V', 'dQg_dE_d_var_V',
'dPQg_dE_qd_2x2_VA_V', 'dPg_dE_q_Wt_V', 'dPg_dE_d_Wt_V', 'dQg_dE_q_var_V',
'dQg_dE_d_var_V', 'dPQg_dE_qd_2x2_VA_V', 'dEq_dE_q_pu', 'dEq_dE_d_pu',
'dEd_dE_q_pu', 'dEd_dE_d_pu', 'dEqd_dE_qd_2x2_pu', 'dEq_dUq_pu',
'dEq_dUd_pu', 'dEd_dUq_pu', 'dEd_dUd_pu', 'dEqd_dUqd_2x2_pu', };
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM = struct(
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{01},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{02},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{03},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{04},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{05},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{06},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{07},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{08},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{09},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{10},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{11},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{12},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{13},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{14},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{15},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{16},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{17},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{18},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{19},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{20},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{21},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{22},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{23},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{24},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{25},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{26},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{27},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{28},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{29},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{30},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{31},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{32},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{33},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{34},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{35},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{36},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{37},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{38},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{39},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{40},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{41},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{42},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{43},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{44},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{45},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{46},NaN, %

```

```

FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{47},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{48},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{49},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{50},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{51},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{52},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{53},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{54},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{55},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{56},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{57},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{58},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{59},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{60},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{61},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{62},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{63},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{64},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{65},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{66},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{67},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{68},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{69},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{70},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{71},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{72},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{73},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{74},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{75},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{76},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{77},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{78},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{79},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{80},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{81},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{82},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{83},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{84},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_SM{85},NaN, 'END',NaN % );
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Pmode_Wt = Pmode_MWt*1e6;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Qmode_var = Qmode_Mvar*1e6;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Umode_V = Umode_kV*1e3;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.YUmode_degree = YUmode_degree;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.SmodeReIm_VA =
complex(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Pmode_Wt,
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Qmode_var);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.YUmode_radian =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.YUmode_degree*pi/180;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.UmodeReIm_V =
complex(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Umode_V*
cos(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.YUmode_radian),
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Umode_V*
sin(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.YUmode_radian));
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Umode_pu =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Umode_V/
Result_Struct_TBParameters_SM.Unom_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.UmodeReIm_pu =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.UmodeReIm_V/
Result_Struct_TBParameters_SM.Unom_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.ImodeReIm_A =
conj(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.SmodeReIm_VA/Result_Struct_Ca
lculatationModeParameters_SM.UmodeReIm_V);

```

```

Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.ImodeReIm_pu =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.ImodeReIm_A/
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Inom_A;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.EQDmodeReIm_V =
complex((real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.UmodeReIm_V) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.ImodeReIm_A) *
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xq_Om),
(imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.UmodeReIm_V) + real(Result_Str
uct_CalculationModeParameters_SM.ImodeReIm_A) *
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xq_Om));
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.EQDmode_V =
abs(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.EQDmodeReIm_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Delta_radian =
angle(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.EQDmodeReIm_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.EQDmodeReIm_pu =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.EQDmodeReIm_V/
Result_Struct_TBParameters_SM.Unom_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.EQDmode_pu =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.EQDmode_V/
Result_Struct_TBParameters_SM.Unom_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Delta_degree =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Delta_radian/pi*180;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.UmodeReIm_V
*complex(cos(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Delta_radian), -
sin(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Delta_radian));
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_pu =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V/
Result_Struct_TBParameters_SM.Unom_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_A =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.ImodeReIm_A
*complex(cos(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Delta_radian),
-sin(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Delta_radian));
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_pu =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_A/
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Inom_A;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Eqdmode_V =
complex((real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V)
+real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_A) *
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Rq_Om -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_A) *
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xd_Om),
(imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_A) *
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Rd_Om
+real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_A) *
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xq_Om));
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Eqdmode_pu =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Eqdmode_V/
Result_Struct_TBParameters_SM.Unom_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.E_qdmode_V =
complex((real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V)
+real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_A) *
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Rq_Om -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_A) *
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X_d_Om),
(imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_A) *
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Rd_Om
+real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_A) *
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X_q_Om));
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.E_qdmode_pu =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.E_qdmode_V/

```

```

Result_Struct_TBParameters_SM.Unom_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.E__qdmode_V =
complex((real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V)
+real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_A) *
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Rq_Om -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_A) *
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X__d_Om),
(imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_A) *
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Rd_Om
+real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_A) *
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X__q_Om));
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.E__qdmode_pu =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.E__qdmode_V/
Result_Struct_TBParameters_SM.Unom_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.EmodeReIm_V =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Eqdmode_V
*complex(cos(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Delta_radian),
sin(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Delta_radian));
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.EmodeReIm_pu =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.EmodeReIm_V/
Result_Struct_TBParameters_SM.Unom_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.YReIm11_2x2_Sm =
(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd11_2x2_Sm +
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd22_2x2_Sm)/2 +
(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd11_2x2_Sm -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd22_2x2_Sm)/2 *
cos(2*Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Delta_radian)
-(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd12_2x2_Sm +
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd21_2x2_Sm)/2 *
sin(2*Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Delta_radian);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.YReIm12_2x2_Sm =
(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd11_2x2_Sm -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd22_2x2_Sm)/2 *
sin(2*Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Delta_radian)
+(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd12_2x2_Sm -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd21_2x2_Sm)/2
+(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd12_2x2_Sm +
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd21_2x2_Sm)/2 *
cos(2*Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Delta_radian);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.YReIm21_2x2_Sm = ...
(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd11_2x2_Sm -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd22_2x2_Sm)/2 *
sin(2*Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Delta_radian) ...
-(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd12_2x2_Sm -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd21_2x2_Sm)/2 ...
+(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd12_2x2_Sm +
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd21_2x2_Sm)/2 *
cos(2*Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Delta_radian);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.YReIm22_2x2_Sm = ...
(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd11_2x2_Sm +
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd22_2x2_Sm)/2 ...
-(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd11_2x2_Sm -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd22_2x2_Sm)/2 *
cos(2*Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Delta_radian) ...
+(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd12_2x2_Sm +
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd21_2x2_Sm)/2 *
sin(2*Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Delta_radian);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.YReIm_2x2_Sm =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.YReIm11_2x2_Sm,
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.YReIm12_2x2_Sm;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.YReIm21_2x2_Sm,
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.YReIm22_2x2_Sm];

```



```

Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.ZReIm_2x2_Om =
inv(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.YReIm_2x2_Sm);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.ZReIm11_2x2_Om =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.ZReIm_2x2_Om(1,1);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.ZReIm12_2x2_Om =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.ZReIm_2x2_Om(1,2);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.ZReIm21_2x2_Om =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.ZReIm_2x2_Om(2,1);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.ZReIm22_2x2_Om =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.ZReIm_2x2_Om(2,2);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Eqdmode_minus_Uqdmode_2x1_V =
[real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Eqdmode_V -
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V);
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Eqdmode_V -
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V)];
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.EmodeReIm_minus_UmodeReIm_2x1_V =
[real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.EmodeReIm_V -
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.UmodeReIm_V);
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.EmodeReIm_V -
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.UmodeReIm_V)];
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_2x1_A =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd_2x2_Sm
*Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Eqdmode_minus_Uqdmode_2x1_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.ImodeReIm_2x1_A =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.YReIm_2x2_Sm
*Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.EmodeReIm_minus_UmodeReIm_2x1_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.PQmode_qd_VA =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V
*conj(complex(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_2x1_A(1),
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_2x1_A(2)));
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.PQmode_ReIm_VA =
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.UmodeReIm_V
*conj(complex(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.ImodeReIm_2x1_A(1),
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.ImodeReIm_2x1_A(2)));
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dPg_dUq_withEqd_Wt_V =
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_A) -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd_2x2_Sm(1,1) *
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V) -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd_2x2_Sm(2,1) *
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dPg_dUd_withEqd_Wt_V =
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_A) -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd_2x2_Sm(1,2) *
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V) -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd_2x2_Sm(2,2) *
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dQg_dUq_withEqd_var_V =
-imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_A) -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd_2x2_Sm(1,1) *
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V) +
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd_2x2_Sm(2,1) *
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dQg_dUd_withEqd_var_V =
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Iqdmode_A) -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd_2x2_Sm(1,2) *
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V) +
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Yqd_2x2_Sm(2,2) *
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dPQg_dUqd_withEqd_2x2_VA_V =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dPg_dUq_withEqd_Wt_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dPg_dUd_withEqd_Wt_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dQg_dUq_withEqd_var_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dQg_dUd_withEqd_var_V];

```





```

Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y_qd_2x2_Sm(2,2) *
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.Uqmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dPQg_dE_qd_2x2_VA_V =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dPg_dE_q_Wt_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dPg_dE_d_Wt_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dQg_dE_q_var_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dQg_dE_d_var_V];
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dEq_dE_q_pu = 1 +
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y_qd_2x2_Sm(2,1)
*(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X_d_Om -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xd_Om);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dEq_dE_d_pu =
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y_qd_2x2_Sm(2,2)
*(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X_d_Om -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xd_Om);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dEd_dE_q_pu = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dEd_dE_d_pu = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dEqd_dE_qd_2x2_pu =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dEq_dE_q_pu,
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dEq_dE_d_pu;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dEd_dE_q_pu,
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dEd_dE_d_pu];
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dEq_dUq_pu = -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y_qd_2x2_Sm(2,1)
*(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X_d_Om -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xd_Om);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dEq_dUd_pu = -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Y_qd_2x2_Sm(2,2)
*(Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.X_d_Om -
Result_Struct_CalculationTBParameters_SM.Xd_Om);
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dEd_dUq_pu = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dEd_dUd_pu = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dEqd_dUqd_2x2_pu =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dEq_dUq_pu,
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dEq_dUd_pu;
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dEd_dUq_pu,
Result_Struct_CalculationModeParameters_SM.dEd_dUd_pu];
end

function [Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets] =
eig_2m_get_dPQnets_dUqdW_balancePQ(SM1_CalculationModeParameters,SM2_Calcula
tionModeParameters, Ynets_1_Re_uSm, Ynets_1_Im_uSm, Znets_12_Re_Om,
Znets_12_Im_Om, Znets_21_Re_Om, Znets_21_Im_Om, Ynets_2_Re_uSm,
Ynets_2_Im_uSm)
clc; FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets = { 'Ynets1ReIm_Sm',
'Znets12ReIm_Om', 'Znets21ReIm_Om', 'Ynets2ReIm_Sm', 'Znets1ReIm_Om',
'Ynets12ReIm_Sm', 'Ynets21ReIm_Sm', 'Znets2ReIm_Om', 'Y11_ReIm_Sm',
'Y12_ReIm_Sm', 'Y21_ReIm_Sm', 'Y22_ReIm_Sm', 'Y11_ReIm_2x2_Sm',
'Y12_ReIm_2x2_Sm', 'Y21_ReIm_2x2_Sm', 'Y22_ReIm_2x2_Sm', 'Ynets_ReIm_4x4_Sm',
'Unets_ReIm_4x1_V', 'Inets_ReIm_4x1_A', 'Inets1_ReIm_A', 'Inets2_ReIm_A',
'PQnets1_ReIm_VA', 'PQnets2_ReIm_VA', 'Y11_qd_2x2_Sm', 'Y12_qd_2x2_Sm',
'Y21_qd_2x2_Sm', 'Y22_qd_2x2_Sm', 'Ynets_qd_4x4_Sm', 'Unets_qd_4x1_V',
'Inets_qd_4x1_A', 'Inets1_qd_A', 'Inets2_qd_A', 'PQnets1_qd_VA',
'PQnets2_qd_VA', 'dPnets1_dUq1_Wt_V', 'dPnets1_dUd1_Wt_V',
'dPnets1_dUq2_Wt_V', 'dPnets1_dUd2_Wt_V', 'dQnets1_dUq1_var_V',
'dQnets1_dUd1_var_V', 'dQnets1_dUq2_var_V', 'dQnets1_dUd2_var_V',
'dPQnets1_dUqd1_2x2_VA_V', 'dPQnets1_dUqd2_2x2_VA_V', 'dPnets2_dUq1_Wt_V',
'dPnets2_dUd1_Wt_V', 'dPnets2_dUq2_Wt_V', 'dPnets2_dUd2_Wt_V',
'dQnets2_dUq1_var_V', 'dQnets2_dUd1_var_V', 'dQnets2_dUq2_var_V',
'dQnets2_dUd2_var_V', 'dPQnets2_dUqd1_2x2_VA_V', 'dPQnets2_dUqd2_2x2_VA_V',
'dPQnets_dUqd_4x4_VA_V', 'Uq1Uq2_plus_Ud1Ud2_VV', 'Uq1Ud2_minus_Uq2Ud1_VV',
'dPnets1_dD1_Wt_radian', 'dPnets1_dD2_Wt_radian', 'dPnets1_dW1_Wt_radian_s',
'dPnets1_dW2_Wt_radian_s', 'dQnets1_dD1_var_radian',

```

```

'dQnets1_dD2_var_radian', 'dQnets1_dW1_var_radian_s',
'dQnets1_dW2_var_radian_s', 'dPQnets1_dD1D2_2x2_VA_radian',
'dPQnets1_dW1W2_2x2_VA_radian_s', 'dPnets2_dD1_Wt_radian',
'dPnets2_dD2_Wt_radian', 'dPnets2_dW1_Wt_radian_s',
'dPnets2_dW2_Wt_radian_s', 'dQnets2_dD1_var_radian',
'dQnets2_dD2_var_radian', 'dQnets2_dW1_var_radian_s',
'dQnets2_dW2_var_radian_s', 'dPQnets2_dD1D2_2x2_VA_radian',
'dPQnets2_dW1W2_2x2_VA_radian_s', 'dPQnets_dDW_4x4_VA_radian_radian_s', };
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets = struct(
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{01},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{02},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{03},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{04},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{05},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{06},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{07},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{08},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{09},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{10},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{11},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{12},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{13},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{14},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{15},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{16},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{17},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{18},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{19},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{20},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{21},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{22},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{23},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{24},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{25},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{26},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{27},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{28},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{29},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{30},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{31},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{32},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{33},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{34},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{35},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{36},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{37},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{38},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{39},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{40},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{41},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{42},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{43},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{44},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{45},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{46},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{47},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{48},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{49},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{50},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{51},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{52},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{53},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{54},NaN, %

```

```

FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{55},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{56},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{57},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{58},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{59},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{60},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{61},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{62},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{63},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{64},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{65},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{66},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{67},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{68},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{69},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{70},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{71},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{72},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{73},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{74},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{75},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{76},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{77},NaN, %
FieldsStruct_CalculationModeParameters_Nets{78},NaN, % 'END',NaN % );
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets1ReIm_Sm =
complex((Ynets_1_Re_uSm*1e-6),(Ynets_1_Im_uSm*1e-6));
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Znets12ReIm_Om =
complex(Znets_12_Re_Om,Znets_12_Im_Om);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Znets21ReIm_Om =
complex(Znets_21_Re_Om,Znets_21_Im_Om);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets2ReIm_Sm =
complex((Ynets_2_Re_uSm*1e-6),(Ynets_2_Im_uSm*1e-6));
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Znets1ReIm_Om =
1/Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets1ReIm_Sm;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets12ReIm_Sm =
1/Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Znets12ReIm_Om;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets21ReIm_Sm =
1/Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Znets21ReIm_Om;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Znets2ReIm_Om =
1/Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets2ReIm_Sm;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm =
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets1ReIm_Sm +
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets12ReIm_Sm;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm = -
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets12ReIm_Sm;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm = -
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets21ReIm_Sm;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm =
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets2ReIm_Sm +
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets21ReIm_Sm;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_2x2_Sm =
[real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm), -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm);
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm),
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm)];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_2x2_Sm =
[real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm), -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm);
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm),
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm)];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_2x2_Sm =
[real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm), -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm)];

```

```

    imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm),
    real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm)];
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_2x2_Sm =
    [real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm), -
    imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm);
    imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm),
    real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm)];
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets_ReIm_4x4_Sm =
    [Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_2x2_Sm,
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_2x2_Sm;
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_2x2_Sm,
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_2x2_Sm];
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Unets_ReIm_4x1_V =
    [real(SM1_CalculationModeParameters.UmodeReIm_V);
    imag(SM1_CalculationModeParameters.UmodeReIm_V);
    real(SM2_CalculationModeParameters.UmodeReIm_V);
    imag(SM2_CalculationModeParameters.UmodeReIm_V)];
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_ReIm_4x1_A =
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets_ReIm_4x4_Sm *
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Unets_ReIm_4x1_V;
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets1_ReIm_A =
    complex(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_ReIm_4x1_A(1,1),
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_ReIm_4x1_A(2,1));
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets2_ReIm_A =
    complex(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_ReIm_4x1_A(3,1),
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_ReIm_4x1_A(4,1));
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.PQnets1_ReIm_VA =
    SM1_CalculationModeParameters.UmodeReIm_V*
    conj(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets1_ReIm_A);
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.PQnets2_ReIm_VA =
    SM2_CalculationModeParameters.UmodeReIm_V*
    conj(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets2_ReIm_A);
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_qd_2x2_Sm =
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_2x2_Sm;
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_qd_2x2_Sm =
    [(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
    cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian -
    SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
    imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
    sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian -
    SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian)),
    -(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
    sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian -
    SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian)
    + imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
    cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian -
    SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian));
    (real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
    sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian -
    SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian) +
    imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
    cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian -
    SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian)),
    (real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
    cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian -
    SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
    imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
    sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian -
    SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian))];
    Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_qd_2x2_Sm =
    [(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *

```

```

cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian)), -
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian) +
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian));
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian)
+ imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian)),
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian))];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_qd_2x2_Sm =
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_2x2_Sm;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets_qd_4x4_Sm =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_qd_2x2_Sm,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_qd_2x2_Sm;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_qd_2x2_Sm,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_qd_2x2_Sm];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Unets_qd_4x1_V =
[real(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
imag(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
real(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
imag(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V)];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_qd_4x1_A =
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Ynets_qd_4x4_Sm *
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Unets_qd_4x1_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets1_qd_A =
complex(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_qd_4x1_A(1,1),
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_qd_4x1_A(2,1));
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets2_qd_A =
complex(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_qd_4x1_A(3,1),
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets_qd_4x1_A(4,1));
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.PQnets1_qd_VA =
SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V*
conj(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets1_qd_A);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.PQnets2_qd_VA =
SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V*
conj(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets2_qd_A);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUq1_Wt_V =
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets1_qd_A)
+real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm) *
real(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm) *
imag(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUd1_Wt_V =
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets1_qd_A)
+real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm) *
imag(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm) *
real(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUq2_Wt_V =

```



```

(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian))
*real(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V)
+(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian))
*imag(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUd2_Wt_V =
-(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian))
*real(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V)
+(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian))
*imag(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dUq1_var_V =
-imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets1_qd_A)
+real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm) *
imag(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm) *
real(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dUd1_var_V =
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets1_qd_A) -
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm) *
real(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y11_ReIm_Sm) *
imag(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dUq2_var_V =
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUd2_Wt_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dUd2_var_V =
-Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUq2_Wt_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets1_dUqd1_2x2_VA_V =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUq1_Wt_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUd1_Wt_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dUq1_var_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dUd1_var_V];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets1_dUqd2_2x2_VA_V =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUq2_Wt_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dUd2_Wt_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dUq2_var_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dUd2_var_V];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUq1_Wt_V =
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian))
*real(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V)

```

```

+(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian
-SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian))
*imag(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUd1_Wt_V =
-(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian))
*real(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V)
+(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian))
*imag(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUq2_Wt_V =
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets2_qd_A)
+real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm) *
real(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm) *
imag(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUd2_Wt_V =
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets2_qd_A)
+real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm) *
imag(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm) *
real(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dUq1_var_V =
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUd1_Wt_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dUd1_var_V =
-Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUq1_Wt_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dUq2_var_V =
-imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets2_qd_A)
+real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm) *
imag(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm) *
real(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dUd2_var_V =
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Inets2_qd_A) -
real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm) *
real(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y22_ReIm_Sm) *
imag(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets2_dUqd1_2x2_VA_V =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUq1_Wt_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUd1_Wt_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dUq1_var_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dUd1_var_V];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets2_dUqd2_2x2_VA_V =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUq2_Wt_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dUd2_Wt_V;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dUq2_var_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dUd2_var_V];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets_dUqd_4x4_VA_V =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets1_dUqd1_2x2_VA_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets1_dUqd2_2x2_VA_V;

```

```

Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets2_dUqd1_2x2_VA_V,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets2_dUqd2_2x2_VA_V];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Uq2_plus_Ud1Ud2_VV =
real(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) *
real(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V)
+imag(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) *
imag(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Ud2_minus_Uq2Ud1_VV =
real(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) *
imag(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) -
real(SM2_CalculationModeParameters.Uqdmode_V) *
imag(SM1_CalculationModeParameters.Uqdmode_V);
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dD1_Wt_radian =
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Uq2_plus_Ud1Ud2_VV
*(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian))
+Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Ud2_minus_Uq2Ud1_VV *
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian));
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dD2_Wt_radian =
-Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dD1_Wt_radian;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dW1_Wt_radian_s = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dW2_Wt_radian_s = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dD1_var_radian =
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Uq2_plus_Ud1Ud2_VV *
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian))
-Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Ud2_minus_Uq2Ud1_VV *
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
sin(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y12_ReIm_Sm) *
cos(SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian));
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dD2_var_radian =
-Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dD1_var_radian;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dW1_var_radian_s = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dW2_var_radian_s = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets1_dD1D2_2x2_VA_radian =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dD1_Wt_radian,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dD2_Wt_radian;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dD1_var_radian,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dD2_var_radian];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets1_dW1W2_2x2_VA_radian_s =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dW1_Wt_radian_s,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets1_dW2_Wt_radian_s;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dW1_var_radian_s,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets1_dW2_var_radian_s];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dD1_Wt_radian =
-Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Uq2_plus_Ud1Ud2_VV *
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *

```

```

sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian))
+Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Ud2_minus_Uq2Ud1_VV *
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian));
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dD2_Wt_radian =
-Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dD1_Wt_radian;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dW1_Wt_radian_s = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dW2_Wt_radian_s = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dD1_var_radian =
-Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Uq2_plus_Ud1Ud2_VV *
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian) -
imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian))
-Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Uq1Ud2_minus_Uq2Ud1_VV *
(real(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
sin(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian)
+imag(Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.Y21_ReIm_Sm) *
cos(SM1_CalculationModeParameters.Delta_radian-
SM2_CalculationModeParameters.Delta_radian));
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dD2_var_radian =
-Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dD1_var_radian;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dW1_var_radian_s = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dW2_var_radian_s = 0;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets2_dD1D2_2x2_VA_radian =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dD1_Wt_radian,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dD2_Wt_radian;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dD1_var_radian,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dD2_var_radian];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets2_dW1W2_2x2_VA_radian_s
= [Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dW1_Wt_radian_s,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPnets2_dW2_Wt_radian_s;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dW1_var_radian_s,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dQnets2_dW2_var_radian_s];
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets2_dDW_4x4_VA_radian_radian
_s =
[Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets1_dD1D2_2x2_VA_radian,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets1_dW1W2_2x2_VA_radian_s;
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets2_dD1D2_2x2_VA_radian,
Result_Struct_CalculationModeParameters_Nets.dPQnets2_dW1W2_2x2_VA_radian_s];
end;

```

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азарьев, Д.И. Математическое моделирование электрических систем / Д.И. Азарьев. — М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1962. — 207 с.
2. Ботвинник, М.М. Асинхронизированная синхронная машина : основы теории / М.М. Ботвинник. — М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1960. — 72 с.
3. Ботвинник, М.М. Регулирование возбуждения и статическая устойчивость синхронной машины / М.М. Ботвинник. — М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1950. — 63 с.
4. Ботвинник, М.М. Управляемая машина переменного тока / М.М. Ботвинник, Ю.Г. Шакарян. — М. : Наука, 1969. — 141 с.
5. Буткевич, А.Ф. Выявление в режиме реального времени опасности колебательного нарушения устойчивости объединенных энергосистем / А.Ф. Буткевич, В.В. Чижевский // Вестник Винницкого политехнического института. — 2011. — № 6 (99). — с. 164 – 167.
6. Буткевич, А.Ф. Идентификация в реальном времени низкочастотных колебаний параметров режима энергосистемы / А.Ф. Буткевич, В.В. Чижевский // Техническая электродинамика. — 2014. — № 4. — с. 35 – 37.
7. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах : учеб. для электроэнерг. спец. вузов / В.А. Веников. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 1985. — 536 с.
8. Влияние неоднородности параметров электроэнергетических систем на возникновение каскадных аварийных процессов / И.З. Шахмаев [и др.] // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 6. — с. 160.
9. Герценберг, Г.Р. Регуляторы возбуждения сильного действия для мощных генераторов и синхронных компенсаторов : автореф. дисс. ... д-ра

техн. наук / Герценберг Григорий Рафаилович. — М., 1965. — 61 с.

10. Глебов, И.А. Системы возбуждения мощных синхронных машин / И.А. Глебов. — Л. : Наука, 1979. — 314 с.

11. Глебов, И.А. Электромагнитные процессы систем возбуждения синхронных машин / И.А. Глебов. — Л. : Наука, 1987. — 344 с.

12. Говорун, В.Ф. Методика исследований устойчивости сложных электрических систем / В.Ф. Говорун, О.В. Говорун // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2008. — № 6. — с. 57 – 59.

13. Горев, А.А. Избранные труды по вопросам устойчивости электрических систем / А.А. Горев. — М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1960. — 260 с.

14. Горев, А.А. Переходные процессы синхронной машины / А.А. Горев. — Л. ; М. : Госэнергоиздат, 1950. — 551 с.

15. Горюнов, Ю.П. Методика определения оптимальных параметров регулирования в сложных линеаризованных системах с несколькими регулируемыми объектами / Ю.П. Горюнов, М.Л. Левинштейн, О.В. Щербачев // Труды ЛПИ. Установившиеся режимы, устойчивость и перенапряжения в электрических системах. — 1968. — № 293. — с. 67 – 70.

16. Гуревич, Ю.Е. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах / Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова, А.А. Окин. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 390 с.

17. Дальние передачи переменного тока / И.С. Брук [и др.]. — М. : Изд-во АН СССР, 1958. — 259 с.

18. Дойников, А.Н. Управление запасом колебательной устойчивости энергосистемы с использованием нового практического системного критерия / А.Н. Дойников, О.К. Крумин. — Братск, 2003. — 70 с. — Деп. в ВИНТИ 23.04.03, № 780-В2003.

19. Дойников, А.Н. Эквивалентирование и идентификация электроэнергетических систем при решении задач статической устойчивости : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.01 / Дойников Александр

Николаевич. — Братск, 2001. — 294 с.

20. Евдокунин, Г.А. Математическое моделирование элементов электроэнергетических систем: учебное пособие / Г.А. Евдокунин, С.В. Смоловик, О.В. Щербачев. — Л. : ЛПИ им. М.И. Калинина, 1980. — 75 с.

21. Енин, В.Н. Моделирование переходных процессов и анализ динамической устойчивости синхронных генераторов при воздействии больших возмущений / В.Н. Енин, А.В. Степанов // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. — 2012. — № 10. — с. 34.

22. Есипович, А.Х. Анализ результатов мониторинга режимных параметров ЕЭС России с помощью СМНР в различных схемно-режимных условиях / А.Х. Есипович, А.Н. Смирнов // Известия НТЦ Единой энергетической системы. — 2014. — № 1 (70). — с. 70 – 83.

23. Ефимов, Д.Н. Методы и алгоритмы формирования расчетных условий при исследовании динамической устойчивости электроэнергетических систем : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / Ефимов Дмитрий Николаевич. — Иркутск, 1998. - 243 с.

24. Жданов, П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / П.С. Жданов; под ред. Л.А. Жукова. — М. : Энергия, 1979. — 456 с.

25. Жданов, П.С. Устойчивость параллельной работы электрических систем / П.С. Жданов, С.А. Лебедев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. ; Л. : Энергоиздат, 1934. — 387 с.

26. Жданов, П.С. Устойчивость электрических систем : учеб. пособие для вузов / П.С. Жданов. — М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1948. — 399 с.

27. 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.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

31. Конторович, А.М. Методика расчета режимов и статической устойчивости сложных электрических систем с учетом изменения частоты : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / Конторович Александр Михайлович. — СПб., 1979. — 216 с.

32. Крумин, О.К. Использование методики восстановления кривых Д-разбиения с применением частотных характеристик параметра стабилизации / О.К. Крумин // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. — 2010. — т. 1. — с. 32 - 37.

33. Крумин, О.К. Использование нового критерия качества при оперативном управлении динамическими свойствами многосвязных энергосистем / О.К. Крумин // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. — 2013. — т. 1. — с. 231 - 233.

34. Крумин, О.К. Методика восстановления кривых Д-разбиения с использованием частотных характеристик параметра стабилизации / О.К. Крумин // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. — 2009. — т. 1. — с. 17 - 21.

35. Крумин, О.К. Практический системный критерий качества для



оперативной оценки динамических свойств энергосистемы / О.К. Крумин // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. — 2012. — т. 1. — с. 22 - 27.

36. Крюков, Е.А. Математическое моделирование предельных режимов электроэнергетических систем для целей диспетчерского управления : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18 / Крюков Евгений Андреевич. — Братск, 2005. - 139 с.

37. Крюков, Е.А. Математическое моделирование электроэнергетических систем для целей противоаварийного управления : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18 / Крюков Егор Андреевич. — Братск, 2006. - 138 с.

38. Лебедев, С.А. Искусственная устойчивость синхронных машин / С.А. Лебедев. — М. : Госэнергоиздат, 1948. — 23 с.

39. Левинштейн, М.Л. Влияние переходных процессов в статорных цепях синхронных машин и распределенности параметров длинных линий на статическую устойчивость / М.Л. Левинштейн, О.В. Щербачев // Труды ЛПИ. Переходные и установившиеся режимы в электрических системах. — 1965. — № 242. — с. 85 – 93.

40. Левинштейн, М.Л. Метод непосредственного определения комплексных амплитуд малых возмущений и его применение к расчету предельных режимов по самораскачиванию в сложных системах / М.Л. Левинштейн, О.В. Щербачев // Труды ЛПИ. Переходные и установившиеся режимы в электрических системах. — 1965. — № 242. — с. 75 – 84.

41. Левинштейн, М.Л. Приближенный способ определения пропускной способности дальних электропередач / М.Л. Левинштейн, Г.М. Хуторецкий, О.В. Щербачев // Труды ЛПИ. Техника высоких напряжений. Устойчивость параллельной работы. — 1954. — № 1. — с. 77 – 89.

42. Левинштейн, М.Л. Применение статической модели электрических систем для расчетов статической устойчивости с учетом изменения

частоты / М.Л. Левинштейн, О.В. Щербачев // Труды ЛПИ. Техника высоких напряжений. Разд.2. Устойчивость дальних электропередач. — 1958. — № 195. — с. 65 – 73.

43. Левинштейн, М.Л. Статическая устойчивость электрических систем: учебное пособие / М.Л. Левинштейн. — СПб. : СПбГТУ, 1994. — 263 с.

44. Литкенс, И.В. Колебательные свойства электрических систем / И.В. Литкенс, В.И. Пуго. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 216 с.

45. Литкенс, И.В. Нелинейные колебания в регулируемых электрических системах : учеб. пособие для студентов / И.В. Литкенс; под ред. В.А. Веникова. — М. : Изд-во МЭИ, 1974. — 146 с.

46. Маркович, И.М. Режимы энергетических систем / И.М. Маркович. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергия, 1969. — 351 с.

47. Маркович, И.М. Токи короткого замыкания и устойчивость параллельной работы электрических систем / И.М. Маркович. — М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1947. — 188 с.

48. Мартиросян, А.А. Совместный выбор законов регулирования АРВ СД и регулируемого УПК в целях улучшения устойчивости электрической системы / А.А. Мартиросян // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2008. — № 4. — с. 61 - 65.

49. Масленников, В.А. Управление собственными динамическими свойствами крупных энергообъединений и дальних электропередач : дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.02 / Масленников Вячеслав Алексеевич. - СПб., 1998. — 284 с.

50. Мееров, М.В. Введение в динамику автоматического регулирования электрических машин / М.В. Мееров. — М. : Изд-во АН СССР, 1956. — 418 с.

51. Мееров, М.В. Основы автоматического регулирования электрических машин / М.В. Мееров. — М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1952. —

176 с.

52. Методические указания по определению устойчивости энергосистем. Министерство энергетики и электрификации СССР. — М. : СПО Союзтехэнерго, 1979.

53. Методические указания по устойчивости энергосистем. — 30.06.2003. — № 277.

54. Методы и программное обеспечение для расчетов колебательной устойчивости энергосистем / Под ред. И.А. Груздева. — СПб. : Типография ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1992. — 108 с.

55. Методы исследования устойчивости энергосистем и мероприятия по ее обеспечению: труды института "Энергосетьпроект" / сост.: Э.С. Лукашев, З.Г. Хвощинская, О.В. Щербачев. — М. : Энергосетьпроект, 1979. — 127 с.

56. Мисриханов, М.Ш. Матричная сигнум-функция в задачах анализа и синтеза линейных систем / М.Ш. Мисриханов, В.Н. Рябченко // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 2. — с. 26 – 52.

57. Михневич, Г.В. Синтез структуры системы автоматического регулирования возбуждения синхронных машин / Г.В. Михневич. — М. : Наука, 1964. — 232 с.

58. Михневич, Г.В. Устойчивость и качество переходных процессов системы регулирования возбуждения многоагрегатной электростанции / Г.В. Михневич. — М. : Изд-во АН СССР, 1960. — 99 с.

59. Москвин, И.А. Колебательная статическая устойчивость электроэнергетической системы с межсистемной связью, содержащей регулируемое устройство продольной компенсации / И.А. Москвин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2013. — № 5. — с. 46 - 50.

60. Оценка динамической устойчивости энергосистем на основе метода площадей / Н.Н. Лизалек [и др.] // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2013. — № 1. — с. 139 - 152.

61. Полудницын, П.Ю. Оценка влияния управляемого шунтирующего реактора на статическую устойчивость электроэнергетических систем / П.Ю. Полудницын // Вестник Московского энергетического института. — 2007. — № 3. — с. 79 – 88.

62. Попов, М.Г. 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.

63. Попов, М.Г. Исследование устойчивости объединенных энергосистем на основе структурного подхода / М.Г. Попов, Е.В. Захарова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2013. — № 3 (178). — с. 110 - 117.

64. Попов, М.Г. 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.

65. Попов, М.Г. 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.

66. Попов, М.Г. 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.

67. Попов, М.Г. 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.

68. Попов, М.Г. 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 - 43.

69. Попов, М.Г. Развитие методов и программного обеспечения исследований динамических свойств электроэнергетических систем : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / Попов Максим Георгиевич. — СПб., 2001. — 168 с.

70. Попов, М.Г. 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.

71. Попов, М.Г. 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.

72. Портной, М.Г. Управление энергосистемами для обеспечения устойчивости / М.Г. Портной, Р.С. Рабинович. — М. : Энергия, 1978. — 352 с.

73. Применение цифровых вычислительных машин в электроэнергетике: учеб. пособие для электроэнерг. спец. вузов / О.В. Щербачев [и др.]; под ред. О.В. Щербачева. — Л. : Энергия, 1980. — 236 с.

74. Рагозин, А.А. О влиянии моментов неконсервативных сил на статическую устойчивость электроэнергетических систем / А.А. Рагозин, М.Г. Попов // Электричество. — 2002. — № 10. — с. 18 – 24.

75. Рагозин, А.А. Обобщенный анализ динамических свойств энергообъединений на основе структурного подхода : дис. ... д-ра техн.

наук : 05.14.02 / Рагозин Александр Афанасьевич. — СПб., 1998. - 353 с.

76. Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах: учеб. пособие для энергет. вузов и факультетов / А.И. Долгинов, Д.А. Федоров, Н.Д. Анисимова, В.А. Веников. — М. : Высш. школа, 1964. — 198 с.

77. Сильное регулирование возбуждения / В.А. Веников, Г.Р. Герценберг, С.А. Совалов, Н.И. Соколов. — М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1963. — 152 с.

78. Смирнов, К.А. Расчет статической устойчивости электрических систем / К.А. Смирнов. — М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1948. — 63 с.

79. Совалов, С.А. Противоаварийное управление в энергосистемах / С.А. Совалов. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 415 с.

80. Совалов, С.А. Режимы Единой энергосистемы / С.А. Совалов. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 384 с.

81. Сорокин, Д.В. Оценка влияния планируемых вводов генераторного и электросетевого оборудования на качество демпфирования колебаний в перспективных схемах энергосистем на примере ОЭС Северо-Запада / Д.В. Сорокин // Известия НТЦ Единой энергетической системы. — 2012. — № 66. — с. 54 - 61.

82. Структура электромеханических колебаний и устойчивости энергосистем / Н.Н. Лизалек [и др.] // Электричество. — 2011. — № 6. — с. 11 – 20.

83. Структурный анализ переходных процессов в электроэнергетических системах при динамических возмущениях / Н.Н. Лизалек [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2011. — № 1. — с. 344 – 352.

84. Сыромятников, И.А. Режимы работы синхронных генераторов / И.А. Сыромятников. — М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1952. — 200 с.

85. Сыромятников, И.А. Специальные режимы синхронных генераторов, повышающие надежность работы энергосистем : автореф. дис.

... д-ра техн. наук / Сыромятников Иван Аркадьевич. — М., 1950. — 32 с.

86. Тузлукова, Е.В. Развитие методов анализа динамических свойств энергосистем на основе решения частичной проблемы собственных значений : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / Тузлукова Екатерина Валерьевна. — М., 2004. - 195 с.

87. Управление мощными энергообъединениями / Н.И. Воропай [и др.]; под ред. С.А. Савалова. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 255 с.

88. Урусов, И.Д. Линейная теория колебаний синхронной машины / И.Д. Урусов. — М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1960. — 165 с.

89. Филиппова, Н.Г. Исследование динамических свойств энергосистем с учетом регулирования частоты и активной мощности / Н.Г. Филиппова, А.В. Андрианов // Вестник Московского энергетического института. — 2006. — № 2. — с. 38 – 49.

90. Филиппова, Н.Г. Модальный анализ устойчивости энергосистем: новый метод определения собственных значений / Н.Г. Филиппова, Е.В. Тузлукова // Электричество. — 2006. — № 4. — с. 5 – 18.

91. Филиппова, Н.Г. Развитие и совершенствование методов анализа статической устойчивости и синтеза динамических свойств объединенных энергосистем / Н.Г. Филиппова // Электричество. — 2007. — № 9. — с. 26 - 33.

92. Цукерник, Л.В. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных машин и вопросы устойчивости сложных энергетических систем : автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / Цукерник Лев Вениаминович. — М., 1962. — 33 с.

93. Черномзав, И.З. Повышение устойчивости сложной энергосистемы средствами противоаварийного управления мощностью электростанций / И.З. Черномзав // Надежность и безопасность энергетики. — 2012. — № 16. — с. 53 - 57.

94. Шемпелев, В.А. Приближенные методы качественного анализа устойчивости электроэнергетических систем : дис. ... канд. техн. наук :

05.14.02 / Шемпелев Вячеслав Анатольевич. - Екатеринбург, 1993. - 159 с.

95. Шиловский, С.В. Разработка методов анализа устойчивости и управления на основе оценки динамических свойств энергообъединения : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / Шиловский Сергей Викторович. — Новосибирск, 2006. — 221 с.

96. Щербачев, О.В. Вопросы передачи энергии на дальние расстояния переменным током : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Щербачев Олег Владимирович. — Л., 1966. — 42 с.

97. Экспериментальные исследования режимов энергосистем / Л.М. Горбунова [и др.]; под ред. С.А. Совалова. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 447 с.

98. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики : учебник для студентов вузов / В.А. Веников [и др.]; под общ. ред. В.А. Веникова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 1981. — 288 с.

99. Электрические системы. Режимы работы электрических систем и сетей : учебное пособие для электроэнерг. вузов / В.А. Веников, Л.А. Жуков, Г.Е. Поспелов; под общ. ред. В.А. Веникова. — М. : Высшая школа, 1975. — 344 с.

100. Электрические системы. Электрические расчеты, программирование и оптимизация режимов : учебное пособие для электроэнерг. вузов / В.А. Веников [и др.]. — М. : Высшая школа, 1973. — 320 с.

101. Электрические системы: Управление переходными режимами электроэнергетических систем : учебник / В.А. Веников [и др.]; под общ. ред. В.А. Веникова. — М. : Высшая школа, 1982. — 247 с.

102. Яндульский, А.С. Анализ и идентификация низкочастотных колебаний мощности при возникновении возмущений в системообразующей сети ОЭС Украины / А.С. Яндульский, В.В. Мацейко // Оптико-электронные информационно-энергетические технологии. — 2013. — № 1 (25). —



c. 134 - 136.

103. Anderson, Paul M. An approach to direct stochastic analysis of power system stability / Paul M. Anderson // Proceedings of the eighth power systems computation conference. — 1984. — pp. 923 – 930.

104. Asit Mohanty Stability analysis and reactive power compensation issue in a microgrid with a DFIG based WECS / Asit Mohanty, Meera Viswavandya, Prakash K. Ray, Sandipan Patra // International journal of electrical power & energy systems. — 2014. — vol. 62. — pp. 753 - 762.

105. Brasca, C. Centralized versus decentralized damping of low-frequency oscillations in a large power system / C. Brasca, G. Guardabassi, A. Locatelli, N. Schiavoni // Automatic control in power generation, distribution and protection. — 1980. — pp. 341 – 344.

106. Eliasson, B.E. A new coherence approach of generators for investigation of slow and system wide oscillations in large power systems / B.E. Eliasson, S.O.R. Lindahl // Power systems and power plant control. — 1989, 1990. — pp. 183 – 187.

107. Ellithy, K. Design of power system stabilizers based on  $\mu$ -controller for power system stability enhancement / K. Ellithy, S. Said, O. Kahlout // International journal of electrical power & energy systems. — 2014. — vol. 63. — pp. 933 - 939.

108. Fabrício G. Nogueira Development and field tests of a damping controller to mitigate electromechanical oscillations on large diesel generating units / Fabrício G. Nogueira, José A.L. Barreiros, Walter Barra Jr., Carlos T. Costa Jr., André M.D. Ferreira // Electric power systems research. — 2011. — vol. 81 issue 2. — pp. 725 - 732.

109. Folly, KA Power system stabilizer design for multimachine power system using population-based incremental learning / KA Folly // Power plants and power systems control. — 2006, 2007. — pp. 41 – 46.

110. G. Saravana Ilango Control algorithms for control of real and reactive power flows and power oscillation damping using UPFC / G. Saravana Ilango,

C. Nagamani, A.V.S.S.R. Sai, D. Aravindan // Electric power systems research. — 2009. — vol. 79 issue 4. — pp. 595 - 605.

111. Han Zhenxiang Transient stabilization of multimachine power systems by variable structure system control / Han Zhenxiang, Tong Jianzhong // Power systems and power plant control. — 1989, 1990. — pp. 317 – 320.

112. Haque, M.H. Best location of SVC to improve first swing stability limit of a power system / M.H. Haque // Electric power systems research. — 2007. — vol. 77 issue 10. — pp. 1402 - 1409.

113. Hosemann, G Power systems monitoring and control by space phasors / G. Hosemann // Power systems: modelling and control applications. — 1989. — pp. 301 – 305.

114. Jiawei Yang Analysis and assessment of VSC excitation system for power system stability enhancement / Jiawei Yang, Zhu Chen, Chengxiong Mao, Dan Wang, Jiming Lu, Jianbo Sun, Miao Li, Dahu Li, Xiaoping Li // International journal of electrical power & energy systems. — 2014. — vol. 57. — pp. 350 - 357.

115. Jovica V. Milanović Effects of dynamic load model parameters on damping of oscillations in power systems / Jovica V. Milanović, Ian A. Hiskens // Electric power systems research. — 1995. — vol. 33 issue 1. — pp. 53 - 61.

116. Karami, A. Transient stability assessment of power systems described with detailed models using neural networks / A. Karami, S.Z. Esmaili // International journal of electrical power & energy systems. — 2013. — vol. 45 issue 1. — pp. 279 - 292.

117. Liu Hsu Structural approach applied to power systems analysis / Liu Hsu, E. Kaszkurewicz // Control science and technology for development. — 1986. — pp. 295 – 298.

118. Machowski, J. Dynamic equivalents for transient stability studies of electrical power / J. Machowski // International journal of electrical power & energy systems. — 1985. — vol. 7 issue 4. — pp. 215 - 224.

119. Mahmud, M.A. Transient stability enhancement of multimachine power

systems using nonlinear observer-based excitation controller / M.A. Mahmud, M.J. Hossain, H.R. Pota // *International journal of electrical power & energy systems*. — 2014. — vol. 58. — pp. 57 - 63.

120. Marconato, R. Linearized models of electric power systems for steady-state stability studies in presence of multi-terminal HVDC connections / R. Marconato, P. Scarpellini // *Proceedings of the eighth power systems computation conference*. — 1984. — pp. 983 – 989.

121. Mohamed M. Hamada Simple and efficient method for steady-state voltage stability assessment of radial distribution systems / Mohamed M. Hamada, Mohamed. A.A. Wahab, Nasser. G.A. Hemdan // *Electric power systems research*. — 2010. — vol. 80 issue 2. — pp. 152 – 160.

122. Nilesh Modi Application of extremum seeking control to design power oscillation damping controller / Nilesh Modi, Tapan K. Saha // *Electric power systems research*. — 2013. — vol. 101. — pp. 49 - 55.

123. R. Castellanos B. Use of power system stabilizers for damping inter-area oscillations in the south systems of the Mexican electrical grid / R. Castellanos B., J.G. Calderón G., D. Olguin S., H. Sarmiento U., A.R. Messina // *Electric power systems research*. — 2006. — vol. 76 issue 4. — pp. 169 - 179.

124. Robert A. Schlueter Static bifurcation in flux decay dynamics of a transient/midterm stability model / Robert A. Schlueter, Shu-zhen Liu, Khadija Ben Kilani, I-Pung Hu // *Electric power systems research*. — 1999. — vol. 51 issue 2. — pp. 79 - 93.

125. Sallam, A.A. Catastrophe theory applied to power system steady state stability – a comparison with the energy-balance approach / A.A. Sallam, J.L. Dineley // *Proceedings of the eighth power systems computation conference*. — 1984. — pp. 915 – 922.

126. Schlueter, R.A. A structural stability analysis of voltage collapse on power systems / R.A. Schlueter, M.W. Chang, I. Hu, R. Barry, C. Arndt, N. Podwoiski, R. Ray // *Power systems and power plant control*. — 1989, 1990. —

pp. 377 – 382.

127. Shun Lee An output feedback static var controller for the damping of generator oscillations / Shun Lee, Chun-Chang Liu // Electric power systems research. — 1994. — vol. 29 issue 1. — pp. 9 - 16.

128. V.A.F. de Campos Robust control of electrical power systems using PSSs and Bilinear Matrix / V.A.F. de Campos, J.J. da Cruz, L.C. Zanetta Jr. // International journal of electrical power & energy systems. — 2014. — vol. 62. — pp. 10 - 18.

129. Vournas, C.D. Coordination of the excitation systems in a multimachine power system / C.D. Vournas // Computer aided design of multivariable technological systems. — 1983. — pp. 487 – 493.

130. Xiaorong Xie Damping multimodal subsynchronous resonance using a generator terminal subsynchronous damping controller / Xiaorong Xie, Yuanqu Zhang, Zhipeng Li // Electric power systems research. — 2013. — vol. 99. — pp. 1 - 8.

131. Xiaorong Xie Optimization and coordination of wide-area damping controls for enhancing the transfer capability of interconnected power systems / Xiaorong Xie, Chao Lu // Electric power systems research. — 2008. — vol. 78 issue 6. — pp. 1099 - 1108.

132. Zeng Qingyu The field tests on power system stabilizers for damping low frequency oscillation / Zeng Qingyu, Yan Zhonghen // Power systems and power plant control. — 1987. — pp. 131 – 137.