

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

Дмитрий Николаевич Кормилицын

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: dnk@ispu.ru

Ольга Сергеевна Суханова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: suhanova-olya@mail.ru

Оценка статической устойчивости системы из двух генераторных станций с управляемой линией электропередачи по характеристическому уравнению

Авторское резюме

Состояние вопроса. Повышение пропускной способности линий электропередачи является важной задачей современной электроэнергетики. Одним из перспективных направлений в этой области является применение управляемого устройства продольной емкостной компенсации, которое оказывает существенное влияние на статическую устойчивость энергосистемы. Для оценки статической устойчивости электроэнергетических систем широко используется метод малых колебаний, который заключается в составлении дифференциальных уравнений движения системы при небольшом возмущении исходного состояния и изучении характера возникающих при этом свободных колебаний системы. В рамках этого метода ключевым этапом является составление характеристического уравнения, корни которого определяют устойчивость системы. Однако для сложных многомашинных систем, особенно с учетом автоматического регулирования возбуждения генераторов и управляемого устройства продольной емкостной компенсации, порядок характеристического уравнения весьма высокий, что затрудняет его непосредственный анализ. В связи с этим особую значимость приобретает исследование свободного члена характеристического уравнения, поскольку его знак является критически важными для определения статической аperiodической устойчивости.

Материалы и методы. Использованы методы математического моделирования электроэнергетической системы, теория дальних линий электропередачи и электромеханических переходных процессов, теория автоматического управления в электроэнергетических системах, а также методы анализа устойчивости электроэнергетических систем. В качестве инструмента моделирования применено оригинальное программное обеспечение на языке программирования C++.

Результаты. Составлена система дифференциальных уравнений, описывающая электромеханические переходные процессы в исследуемой электроэнергетической системе. На основе исходной нелинейной модели методом малых отклонений получена линеаризованная система уравнений первого приближения, учитывающая взаимное влияние генераторов, а также параметры автоматических регуляторов возбуждения и управляемого устройства продольной емкостной компенсации. Для анализа устойчивости системы сформирован характеристический определитель и получено соответствующее характеристическое уравнение восьмого порядка. Построена зависимость значений свободного члена от угла δ между векторами ЭДС двух генераторов.

Выводы. Аналитическим путем с применением численных методов доказано, что конечное выражение для свободного члена не содержит напрямую настроечные параметры автоматических регуляторов возбуждения. Полученный результат имеет важное практическое значение, так как, с одной стороны, сокращает объем требуемых символьных вычислений и упрощает математические модели, а с другой – полностью сохраняет точность и кор-

ректность оценки устойчивости системы. Совместное применение автоматических регуляторов возбуждения и устройств продольной компенсации требует согласованной настройки.

Ключевые слова: статическая устойчивость, линии электропередачи сверхвысокого напряжения, управляемое устройство продольной компенсации, автоматическое регулирование возбуждения, характеристическое уравнение, свободный член характеристического уравнения

Dmitriy Nikolayevich Kormilitsyn

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: dnk@es.ispu.ru

Olga Sergeevna Sukhanova

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: suhanova-olya@mail.ru

Assessment of static stability of a system of two generator stations with a controlled power transmission line by characteristic equation

Abstract

Background. Enhancing transmission line capacity is a critical challenge in modern power engineering. One of the promising approaches in this field involves the implementation of series compensation devices, which significantly impact power system static stability. The small-signal stability analysis method is widely employed for assessing power system stability. This technique formulates system motion differential equations under minor disturbances of the initial state and examining the resulting free oscillation patterns. A crucial step of this method is deriving the characteristic equation, which roots determine system stability. However, for complex multi-machine systems, particularly with automatic control of excitation of generators and series compensation devices, the characteristic equation becomes high-order, complicating direct analysis. Consequently, studying the characteristic equation's constant term gains particular importance, as its sign is critically significant to determine static aperiodic stability.

Materials and methods. Methods of mathematical modeling of the electric power system, the theory of long-distance power lines and electromechanical transients, automatic control theory for power systems, as well as methods of analyzing the stability of electric power systems have been used. The original software in C ++ programming language has been used as a modeling tool.

Results. A system of differential equations describing electromagnetic transients in the studied power system has been developed. Based on the initial nonlinear model, a first-approximation linearized system of equations has been obtained using the small-signal method, accounting for the mutual influence of generators as well as parameters of automatic excitation regulators and series compensation devices. To analyze the stability of the system, a characteristic determinant has been formulated and a corresponding characteristic equation of the eighth order has been obtained. The dependence of the constant term values on the angle δ between the EMFs of the two generators has been established.

Conclusions. It has been proven analytically using numerical methods that the final expression for a constant term does not directly contain the tuning parameters of the automatic excitation controllers. The obtained result has significant practical value. Since, on the one hand, it reduces the required symbolic computations and simplifies mathematical models and on the other hand, it completely maintains accuracy and validity in the system's stability assessment. The co-use of automatic excitation controllers and series compensation devices also requires coordinated tuning.

Key words: static stability, ultra-high voltage transmission lines, controlled series compensation device, automatic excitation control, characteristic equation, constant term of the characteristic equation

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.036-042

Введение. В условиях быстрого роста городов и увеличения числа потребителей электроэнергии особую актуальность приобретают технологии, позволяющие повышать пропускную способность существующих линий электропередачи (ЛЭП) без расширения инфраструктуры. Одним из перспективных направлений в электроэнергетике является применение управляемой продольной емкостной компенсации, которая обеспечивает эффективное управление параметрами сети и увеличивает передаваемую мощность без необходимости отвода дополнительных земель

под строительство новых ЛЭП [1–3]. Однако внедрение управляемой продольной компенсации требует комплексного анализа ее влияния на статическую устойчивость электроэнергетической системы (ЭЭС), особенно в условиях наличия других управляемых элементов, таких как автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) генераторов.

Основным методом оценки статической устойчивости ЭЭС является метод малых колебаний (метод малых отклонений), разработанный А.М. Ляпуновым. Ключевым этапом метода малых колебаний является анализ характери-

стического уравнения (ХУ) линеаризованной системы. Условие статической устойчивости выполняется, когда все корни ХУ имеют отрицательные вещественные части [4]. Однако в системах с применением управляемых устройств продольной компенсации (УУПК) и АРВ высокий порядок характеристического уравнения существенно усложняет процедуру определения корней. В связи с этим особое внимание уделяется анализу свободного члена ХУ, знак которого определяет статическую апериодическую устойчивость при условии положительности коэффициента при старшей степени ХУ [5]. Таким образом, целесообразно провести исследование свободного члена ХУ сложной ЭЭС с УУПК и АРВ генераторов в целях оценки влияния настроечных параметров регулируемых устройств на статическую устойчивость ЭЭС.

Материалы и методы. Модель рассматриваемой электроэнергетической системы. Исследование проведено для ЭЭС, состоящей из двух генераторных станций (рис. 1). Генераторные станции представлены в модели двумя эквивалентными синхронными генераторами с автоматическими регуляторами возбуждения, соединенными через двухцепную линию электропередачи 500 кВ с установленным в середине линии управляемым устройством продольной компенсации. Генераторы подключены к линии через повышающие трансформаторы с обеих сторон. В промежуточном узле сети расположена симметричная нагрузка. Двухцепная ЛЭП имеет равные по длине и параметрам участки до и после точки компенсации. На выводах УУПК установлены шунтирующие реакторы (ШР).

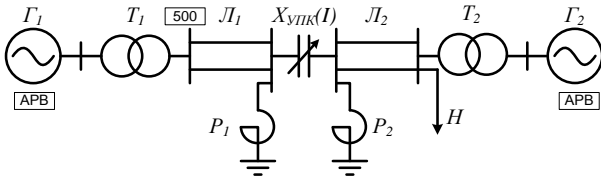


Рис. 1. Схема исследуемой электроэнергетической системы, содержащей управляемую ЛЭП СВН

Регулирование УУПК реализуется на динамическом изменении емкостного сопротивления, величина которого определяется значением тока в линии и соответствует следующему соотношению [6, 7]:

$$X_{\text{УУПК}}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_{1\text{УУПК}} - K_{2\text{УУПК}} I)}, \quad (1)$$

где $X_{\text{УУПК}}(I)$ – сопротивление УУПК, Ом; I – ток линии (в месте установки УУПК), кА; $K_{1\text{УУПК}}$, $K_{2\text{УУПК}}$ – коэффициенты УУПК, мкФ и мкФ/кА соответственно.

Уравнения электромеханического переходного процесса исследуемой системы из двух генераторных станций с регулируемым

УПК с учетом электромагнитных переходных процессов в обмотках возбуждения синхронных генераторов (СГ) и АРВ сильного действия (АРВ-СД) [8, 9] имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} T_{J1} p^2 \delta_1 + D_1 p \delta_{12} &= P_{T1} - P_{\Sigma 1}, \\ T_{J2} p^2 \delta_2 - D_2 p \delta_{12} &= P_{T2} - P_{\Sigma 2}, \\ T_{do1} p E'_{q1} + E_{q1} &= E_{qe1}, \\ T_{do2} p E'_{q2} + E_{q2} &= E_{qe2}, \\ I_{\text{УУПК}} &= f(\delta_{12}, E_{q1}, E_{q2}, X_{\text{УУПК}}), \\ X_{\text{УУПК}} &= f(I_{\text{УУПК}}), \\ E_{qe1} &= E_{qo1} + \sum_j W'_{\pi j1}(p) \Pi_{j1}, \\ E_{qe2} &= E_{qo2} + \sum_j W'_{\pi j2}(p) \Pi_{j2}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где T_{J1} , T_{J2} – постоянные инерции; p – оператор дифференцирования; δ_1 , δ_2 – собственные углы ЭДС СГ; δ_{12} – взаимный угол между ЭДС СГ; P_{T1} , P_{T2} – мощность турбин; $P_{\Sigma 1}$, $P_{\Sigma 2}$ – электромагнитные мощности СГ; D_1 , D_2 – коэффициенты демпфирования; E_{qo1} , E_{qo2} – начальные значения ЭДС возбуждения СГ; E_{qe1} , E_{qe2} – вынужденные составляющие ЭДС синхронных машин; T_{do1} , T_{do2} – постоянные времени обмотки возбуждения синхронных машин; E_{q1} , E_{q2} – синхронные ЭДС СГ; E'_{q1} , E'_{q2} – переходные ЭДС СГ; $W'_{\pi j1}$, $W'_{\pi j2}$ – передаточные функции систем возбуждения и АРВ синхронных генераторов на первой и второй электростанции соответственно, записанные в операторной форме; Π_{j1} , Π_{j2} – параметры режима, по которым проводится регулирование, в данном случае напряжения и токи первого и второго генераторов соответственно.

Передаточная функция имеет следующий вид:

$$W'_{\pi j}(p) = \frac{1}{(1 + pT_e)(1 + pT_p)} W_{\pi j}(p), \quad (3)$$

где T_e – постоянная времени возбудителя, с; T_p – постоянная времени регулятора, с; $W_{\pi j}(p)$ – передаточная функция регулятора.

Выражение передаточной функции регулятора зависит от закона регулирования и типа АРВ, для АРВ-СД:

$$W_{\pi j}(p) = K_{0U} + k_{1I} p + k_{2I} p^2, \quad (4)$$

где K_{0U} – коэффициент регулирования по отклонению напряжения генератора; k_{1I} , k_{2I} – коэффициенты регулирования АРВ-СД по первой и второй производным тока статора соответственно.

Фундаментальным свойством ЭЭС является ее нелинейность, обусловленная характеристиками синхронных машин, а также параметрами управляемых устройств. Однако при малых

отклонениях оказывается возможным линеаризовать исходную систему уравнений, приведя их к виду дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами:

$$\left. \begin{aligned}
 & p^2 \Delta \delta_{12} + p \left(\frac{D_1}{T_{J1}} + \frac{D_2}{T_{J2}} \right) \Delta \delta_{12} + \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \right) \Delta \delta_{12} + \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial E_{q1}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial E_{q1}} \right) \Delta E_{q1} + \\
 & + \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial E_{q2}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial E_{q2}} \right) \Delta E_{q2} + \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial X_{ууПК}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial X_{ууПК}} \right) \Delta X_{ууПК} = 0, \\
 & T_{d01} p \frac{\partial E'_{q1}}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + T_{d01} p \frac{\partial E'_{q1}}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} + T_{d01} p \frac{\partial E'_{q1}}{\partial E_{q2}} \Delta E_{q2} + T_{d01} p \frac{\partial E'_{q1}}{\partial X_{ууПК}} \Delta X_{ууПК} + \Delta E_{q1} - \Delta E_{qe1} = 0, \\
 & T_{d02} p \frac{\partial E'_{q2}}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + T_{d02} p \frac{\partial E'_{q2}}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} + T_{d02} p \frac{\partial E'_{q2}}{\partial E_{q2}} \Delta E_{q2} + T_{d02} p \frac{\partial E'_{q2}}{\partial X_{ууПК}} \Delta X_{ууПК} + \Delta E_{q2} - \Delta E_{qe2} = 0, \\
 & -\Delta I + \frac{\partial I}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + \frac{\partial I}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} + \frac{\partial I}{\partial E_{q2}} \Delta E_{q2} + \frac{\partial I}{\partial X_{ууПК}} \Delta X_{ууПК} = 0, \\
 & -\Delta X_{ууПК} + \frac{\partial X_{ууПК}}{\partial I} \Delta I = 0, \\
 & \frac{1}{a} \left(K_{0U1} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + c \frac{\partial I_{Г1}}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} \right) + \frac{1}{a} \left(K_{0U1} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} + c \frac{\partial I_{Г1}}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} \right) + \\
 & + \frac{1}{a} \left(K_{0U1} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial X_{ууПК}} \Delta X_{ууПК} + c \frac{\partial I_{Г1}}{\partial X_{ууПК}} \Delta X_{ууПК} \right) + \frac{1}{a} \left(K_{0U1} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial E_{q2}} \Delta E_{q2} + c \frac{\partial I_{Г1}}{\partial E_{q2}} \Delta E_{q2} \right) - \Delta E_{qe1} = 0, \\
 & \frac{1}{b} \left(K_{0U2} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + d \frac{\partial I_{Г2}}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} \right) + \frac{1}{b} \left(K_{0U2} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial E_{q2}} \Delta E_{q2} + d \frac{\partial I_{Г2}}{\partial E_{q2}} \Delta E_{q2} \right) + \\
 & + \frac{1}{b} \left(K_{0U2} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial X_{ууПК}} \Delta X_{ууПК} + d \frac{\partial I_{Г2}}{\partial X_{ууПК}} \Delta X_{ууПК} \right) + \frac{1}{b} \left(K_{0U2} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} + d \frac{\partial I_{Г2}}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} \right) - \Delta E_{qe2} = 0.
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Следует упомянуть, что, согласно исследованиям А.М. Ляпунова, учет нелинейности не влияет на оценку устойчивости [10]. Замена нелинейной системы линейной (линеаризованной) производится путем разложения уравнений в ряды Тейлора с сохранением линейных членов и отбра-

сывания членов высших порядков, которые для малых отклонений считаются пренебрежимо малыми [11, 12]. Коэффициенты при малых отклонениях переменных ($\Delta \delta_{12}$, ΔE_{q1} , ΔE_{q2} , $\Delta X_{ууПК}$, ΔE_{qe1} , ΔE_{qe2} , ΔI), полученные при линеаризации, формируют характеристический определитель:

$$D(p) = \begin{bmatrix}
 p^2 + p \left(\frac{D_1}{T_{J1}} + \frac{D_2}{T_{J2}} \right) + \left(\frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} \right) & \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial E_{q1}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial E_{q1}} & \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial E_{q2}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial E_{q2}} & \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial X_{ууПК}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial X_{ууПК}} & 0 & 0 & 0 \\
 p T_{d01} \frac{\partial E'_{q1}}{\partial \delta_{12}} & p T_{d01} \frac{\partial E'_{q1}}{\partial E_{q1}} + 1 & p T_{d01} \frac{\partial E'_{q1}}{\partial E_{q2}} & p T_{d01} \frac{\partial E'_{q1}}{\partial X_{ууПК}} & -1 & 0 & 0 \\
 p T_{d02} \frac{\partial E'_{q2}}{\partial \delta_{12}} & p T_{d02} \frac{\partial E'_{q2}}{\partial E_{q1}} & p T_{d02} \frac{\partial E'_{q2}}{\partial E_{q2}} + 1 & p T_{d02} \frac{\partial E'_{q2}}{\partial X_{ууПК}} & 0 & -1 & 0 \\
 \frac{\partial I_{ууПК}}{\partial \delta_{12}} & \frac{\partial I_{ууПК}}{\partial E_{q1}} & \frac{\partial I_{ууПК}}{\partial E_{q2}} & \frac{\partial I_{ууПК}}{\partial X_{ууПК}} & 0 & 0 & \frac{\partial X_{ууПК}}{\partial I_{ууПК}} \\
 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\
 \frac{K_{0U1}}{a} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial \delta_{12}} + c \frac{\partial I_{Г1}}{\partial \delta_{12}} & \frac{K_{0U1}}{a} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial E_{q1}} + c \frac{\partial I_{Г1}}{\partial E_{q1}} & \frac{K_{0U1}}{a} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial E_{q2}} + c \frac{\partial I_{Г1}}{\partial E_{q2}} & \frac{K_{0U1}}{a} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial X_{ууПК}} + c \frac{\partial I_{Г1}}{\partial X_{ууПК}} & -1 & 0 & 0 \\
 \frac{K_{0U2}}{b} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial \delta_{12}} + d \frac{\partial I_{Г2}}{\partial \delta_{12}} & \frac{K_{0U2}}{b} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial E_{q1}} + d \frac{\partial I_{Г2}}{\partial E_{q1}} & \frac{K_{0U2}}{b} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial E_{q2}} + d \frac{\partial I_{Г2}}{\partial E_{q2}} & \frac{K_{0U2}}{b} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial X_{ууПК}} + d \frac{\partial I_{Г2}}{\partial X_{ууПК}} & 0 & -1 & 0
 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $U_{Г1}$, $I_{Г1}$, $U_{Г2}$, $I_{Г2}$ – напряжения и токи первого и второго генераторов соответственно; k_{11} , k_{21} – коэффициенты регулирования АРВ-СД для первого генератора; k_{12} , k_{22} – коэффициенты регулирования АРВ-СД для второго генератора;

$$a = (p T_{e1} + 1)(p T_{p1} + 1), \quad b = (p T_{e2} + 1)(p T_{p2} + 1), \\
 c = p(k_{11} + p k_{21}), \quad d = p(k_{12} + p k_{22}).$$

Частные производные в (5) и (6) зависят от режима и отражают нелинейные свойства электрической системы в линеаризованных

уравнениях. Для рассматриваемой системы частные производные определены численным расчетом как отношения соответствующих приращений по полной математической модели, реализованной в программном комплексе на языке программирования C++.

Характеристическое уравнение, полученное из определителя (6), имеет вид

$$a_0 p^8 + a_1 p^7 + a_2 p^6 + a_3 p^5 + a_4 p^4 + a_5 p^3 + a_6 p^2 + a_7 p + a_8 = 0, \quad (7)$$

где p – переменная уравнения; a_0 – a_7 – коэффициенты ХУ; a_8 – свободный член ХУ.

Критерием апериодической статической устойчивости является положительность свободного члена ХУ ($a_8 > 0$). Предельный по апериодической статической устойчивости режим характеризуется обращением свободного члена ХУ в нуль ($a_8 = 0$) [13, 14].

Результаты исследования. Свободный член ХУ рассматриваемой системы в аналитическом представлении содержит свыше пятидесяти слагаемых, большинство из которых содержат настроечные параметры АРВ первого и второго генераторов (K_{0U1} , K_{0U2}). Если предположить, что данные коэффициенты равны нулю ($K_{0U1} = K_{0U2} = 0$), то выражение свободного члена ХУ существенно упрощается и сводится к известному виду:

$$a_8 = \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \right) - \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \right) \frac{\partial I}{\partial X_{\text{УУПК}}} \frac{\partial X_{\text{УУПК}}}{\partial I} + \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial X_{\text{УУПК}}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial X_{\text{УУПК}}} \right) \frac{\partial I}{\partial \delta_{12}} \frac{\partial X_{\text{УУПК}}}{\partial I}. \quad (8)$$

Однако в ходе вычислительного эксперимента установлено, что при ненулевых значениях коэффициентов регулирования АРВ генераторов значения свободного члена ХУ полностью совпадают с результатами, полученными по упрощенной формуле (8). Данное явление объясняется взаимным уничтожением слагаемых в полном аналитическом выражении, обусловленным его знакопеременной структурой. В качестве иллюстрации рассмотрена пара слагаемых из полного аналитического выражения свободного члена ХУ, в которых выделены составляющие, имеющие различия:

$$-K_{0U1} K_{0U2} T_{J1} \frac{\partial I}{\partial E_{q1}} \frac{\partial P_2}{\partial E_{q2}} \frac{\partial U_{G1}}{\partial X_{\text{УУПК}}} \frac{\partial X_{\text{УУПК}}}{\partial I} \frac{\partial U_{G2}}{\partial \delta_{12}} + K_{0U1} K_{0U2} T_{J1} \frac{\partial I}{\partial E_{q1}} \frac{\partial P_2}{\partial E_{q2}} \frac{\partial U_{G2}}{\partial X_{\text{УУПК}}} \frac{\partial X_{\text{УУПК}}}{\partial I} \frac{\partial U_{G1}}{\partial \delta_{12}}. \quad (9)$$

Однако при детальном рассмотрении данных различий видно, что они оказываются тождественными:

$$\frac{\partial U_{G1}}{\partial X_{\text{УУПК}}} \frac{\partial U_{G2}}{\partial \delta_{12}} = \frac{U_{G1} - U_{G10}}{X_{\text{УУПК}} - X_{\text{УУПК0}}} \frac{U_{G2} - U_{G20}}{\delta_{12} - \delta_{120}}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial U_{G2}}{\partial X_{\text{УУПК}}} \frac{\partial U_{G1}}{\partial \delta_{12}} = \frac{U_{G2} - U_{G20}}{X_{\text{УУПК}} - X_{\text{УУПК0}}} \frac{U_{G1} - U_{G10}}{\delta_{12} - \delta_{120}}. \quad (11)$$

В результате наблюдается полная взаимная компенсация рассматриваемой пары слагаемых.

Таким образом, свободный член характеристического уравнения не зависит от параметров регуляторов возбуждения. Это позволяет применять упрощенную формулу расчета (8), обеспечивающую идентичные с полным выражением результаты, но требующую значительно меньших вычислительных затрат. Данное упрощение особенно полезно при анализе устойчивости сложных энергосистем, так как сохраняет точность расчетов при существенном снижении их трудоемкости.

На рис. 2, 3 представлены кривые изменения значений свободного члена ХУ для исследуемой системы при различных настроечных параметрах УУПК и АРВ соответственно. Совместное регулирование АРВ и УУПК отражается на изменении значения свободного члена ХУ, по смене знака которого можно судить об апериодической статической устойчивости. Наличие только одного регулируемого устройства (АРВ или УУПК) дает самый низкий предел по статической апериодической устойчивости (рис. 2, 3). В то же время при наличии АРВ генераторов увеличение коэффициента регулирования УУПК ($K_{2\text{УУПК}}$) приводит к тому, что смена знака свободного члена ХУ происходит при меньших значениях взаимного угла δ_{12} (рис. 2). С другой стороны, увеличение коэффициентов регулирования АРВ при наличии УУПК также приводит к уменьшению взаимного угла, при котором происходит нарушение статической апериодической устойчивости.

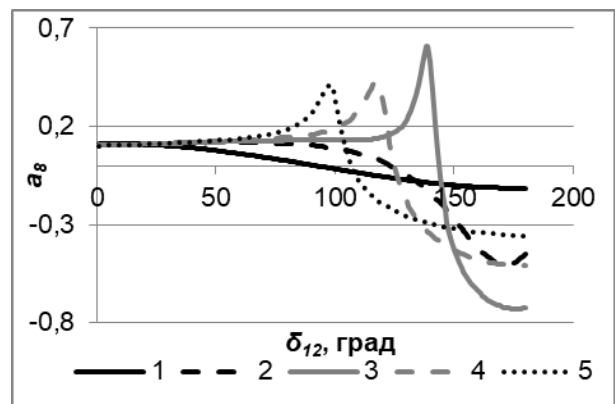


Рис. 2. Кривые изменения значений свободного члена a_8 ХУ рассматриваемой системы для различных законов регулирования УУПК: 1 – $K_{2\text{УУПК}} = 5$ без АРВ; 2 – $K_{2\text{УУПК}} = 3$ с АРВ; 3 – $K_{2\text{УУПК}} = 5$ с АРВ; 4 – $K_{2\text{УУПК}} = 7$ с АРВ; 5 – $K_{2\text{УУПК}} = 10$ с АРВ

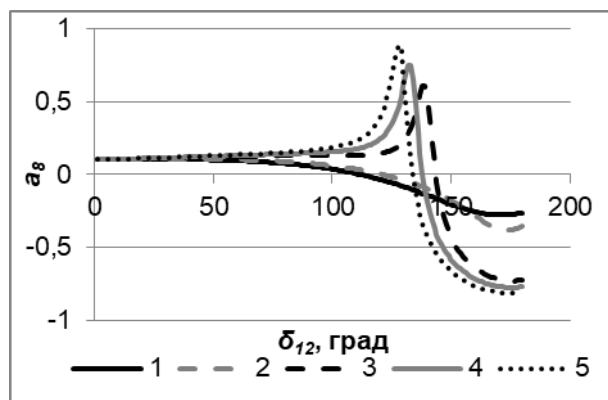


Рис. 3. Кривые изменения значений свободного члена a_b ХУ рассматриваемой системы для различных законов регулирования АРВ: 1 – $K_{0U1} = K_{0U2} = 2$ без УУПК; 2 – $K_{0U1} = K_{0U2} = 2$ с УУПК; 3 – $K_{0U1} = K_{0U2} = 5$ с УУПК; 4 – $K_{0U1} = K_{0U2} = 7$ с УУПК; 5 – $K_{0U1} = K_{0U2} = 10$ с УУПК

Выводы. В ходе вычислительных экспериментов установлено, что свободный член характеристического уравнения не зависит от настроечных параметров АРВ генераторов. Это дает возможность применения упрощенной расчетной формулы, которая полностью эквивалентна исходному выражению с точки зрения точности результатов. Для сложных многомашинных ЭЭС повышение вычислительной эффективности, связанное с применением выражения, аналогичного (8), может оказаться очень существенным.

Увеличение коэффициентов регулирования как УУПК ($K_{2УУПК}$), так и АРВ генераторов (K_{0U1} , K_{0U2}) приводит к уменьшению значения взаимного угла δ_{12} , при котором происходит нарушение статической аperiodической устойчивости. Однако эти значения углов остаются существенно выше характерных для нормальных режимов работы энергосистемы. Кроме того, наименьший предел по статической аperiodической устойчивости наблюдается при использовании только одного регулирующего устройства (АРВ или УУПК), что указывает на целесообразность их совместного применения. Однако полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейших исследований совместного регулирования АРВ и УУПК для определения оптимальных соотношений между коэффициентами регулирования АРВ и УУПК, а также взаимодействия регулирующих устройств в переходных режимах, так как представленные результаты относятся к статической устойчивости.

Список литературы

1. Антонов А.В., Фокин В.К., Тузлукова Е.В. О применении устройств продольной емкостной компенсации в высоковольтных электрических сетях России // Энергия единой сети. – 2016. – Вып. 6(29). – С. 26–43.

2. Кочкин В.И. Новые технологии повышения пропускной способности ЛЭП // Новое в российской электроэнергетике. – 2010. – № 8. – С. 5–16.

3. Луковенко А.С. Анализ отечественного и мирового опыта применения управляемых электропередач переменного тока в интеллектуальных электрических сетях // Энергия единой сети. – 2018. – № 5(41). – С. 30–38.

4. Братолубов А.А. Физические основы переходных процессов в электроэнергетических системах: учеб. пособие / ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2018. – 184 с.

5. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

6. Голов В.П. Применение регулируемой компенсации линии электропередач // Изв. вузов. Энергетика. – 1978. – № 6. – С. 3–8.

7. Использование управляемых линий электропередачи с регулируемой последовательной компенсацией для реализации адаптивных сетей / В.П. Голов, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин, Д.Н. Кормилицин // Российская Электротехника. – Февраль 2017. – Т. 88, вып. 2. – С. 60–66.

8. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие. – М.: Омега-Л, 2013. – 384 с.

9. Москвин И.А. Колебательная статическая устойчивость электроэнергетической системы с межсистемной связью, содержащей регулируемое устройство продольной компенсации // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 5. – С. 46–50.

10. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 455 с.

11. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. лит., 1972. – 768 с.

12. Тарарыкин С.В., Тютиков В.В. Методы исследования устойчивости нелинейных систем. – 4-е изд., доп. – Иваново, 2025. – 104 с.

13. Веников В.А., Жуков Л.А., Поспелов Г.Е. Режимы работы электрических систем и сетей: учеб. пособие / под ред. С.М. Оводова. – М.: Высш. шк., 1975. – 343 с.

14. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 488 с.

References

1. Antonov, A.V., Fokin, V.K., Tuzlukova, E.V. O primeneniі ustroystv prodol'noy emkostnoy kompensatsii v vysokovol'tnykh elektricheskikh setyakh Rossii [On application of longitudinal capacitive compensation devices in high-voltage electrical networks of Russia]. *Energiya edinoi seti*, 2016, issue 6(29), pp. 26–43.

2. Kochkin, V.I. Novye tekhnologii povysheniya propusknoy sposobnosti LEP [New technologies for increasing the transmission capacity of power lines]. *Novoe v rossiyskoy elektroenergetike*, 2010, no. 8, pp. 5–16.

3. Lukovenko, A.S. Analiz otechestvennogo i mirovogo opyta primeneniya upravlyaemykh elektroperedach peremennogo toka v intellektual'nykh elektricheskikh setyakh [Analysis of domestic and inter-

national experience of application of controlled AC power transmission in smart grids]. *Energiya edinoi seti*, 2018, no. 5(41), pp. 30–38.

4. Bratolyubov, A.A. *Fizicheskie osnovy perekhodnykh protsessov v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Physical basis of transient processes in electric power systems]. Ivanovo, 2018. 184 p.

5. Venikov, V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromechanical transients in electric systems]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985. 536 p.

6. Golov, V.P. *Primenenie reguliruemoy kompensatsii linii elektroperedach* [Application of Power Line Adjustable Compensation]. *Izvestiya vuzov. Energetika*, 1978, no. 6, pp. 3–8.

7. Golov, V.P., Martirosyan, A.A., Moskvina, I.A., Kormilitsyn, D.N. *Ispol'zovanie upravlyaemykh liniy elektroperedachi s reguliruemoy posledovatel'noy kompensatsiei dlya realizatsii adaptivnykh setey* [Using controlled electric-power lines with controlled series compensation in smart-grid networks]. *Rossiyskaya Elektrotehnika*, February 2017, vol. 88, issue 2, pp. 60–66.

8. Kulikov, Yu.A. *Perekhodnye protsessy v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Transient processes in electric power systems]. Moscow: Omega-L, 2013. 384 p.

9. Moskvina, I.A. *Kolebatel'naya staticheskaya ustoychivost' elektroenergeticheskoy sistemy s mezhsistemnoy svyaz'yu, soderzhashchey reguliruemoe ustroystvo prodol'noy kompensatsii* [Oscillatory static stability of an electric power system with intersystem coupling containing an adjustable series compensation device]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 5, pp. 46–50.

10. Zhdanov, P.S. *Voprosy ustoychivosti elektricheskikh sistem* [The issues of electrical system stability]. Moscow: Energiya, 1979. 455 p.

11. Besekerskiy, V.A., Popov, E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Theory of automatic control systems]. Moscow: Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1972. 768 p.

12. Tararykin, S.V., Tyutikov, V.V. *Metody issledovaniya ustoychivosti nelineynykh sistem* [Methods for studying the stability of nonlinear systems]. Ivanovo, 2025. 104 p.

13. Venikov, V.A., Zhukov, L.A., Pospelov, G.E. *Rezhimy raboty elektricheskikh sistem i setey* [Operating modes of electrical systems and networks]. Moscow: Vysshaya shkola, 1975. 343 p.

14. Ryzhov, Yu.P. *Dal'nie elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya* [Long-range transmission of ultra-high voltage]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2007. 488 p.