

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

Валерий Павлович Голов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: golov@ispu.ru

Андрей Вадимович Калуцков

ПАО «ФСК ЕЭС» Московское предприятие Магистральных электрических сетей, инженер, Россия, Москва, e-mail: andy405@yandex.ru

Дмитрий Николаевич Кормилицын

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

Ольга Сергеевна Суханова

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

Критерий апериодической статической устойчивости электроэнергетической системы с управляемым устройством продольной компенсации на линии 220 кВ¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время существует необходимость синхронизации работы удаленных участков электроэнергетической системы страны и повышения пропускной способности существующих линий. Сооружение новых линий электропередач предполагает большие экономические затраты. В известных работах рассматривается применение управляемых устройств продольной емкостной компенсации только на дальних линиях электропередачи напряжением 500 кВ и выше для увеличения пропускной способности и улучшения устойчивости. Целью исследования является повышение устойчивости и предела передаваемой мощности при установке управляемых устройств продольной компенсации на линиях 220 кВ. Необходимо сформировать критерий апериодической статической устойчивости электроэнергетической системы, содержащей управляемую линию электропередачи 220 кВ.

¹ Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (соглашение 075-15-2020-038 от 17.03.2020).

The project is carried out with financial assistance of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the Grant of President of the Russian Federation to Support Young Researchers – Candidate of Science of Russia (agreement 075-15-2020-038 dated 17.03.2020).

Материалы и методы. Использованы методы математического моделирования электроэнергетической системы, теория дальних линий электропередачи и электромеханических переходных процессов, методы анализа устойчивости электроэнергетических систем. Для составления упрощенной математической модели использован метод первого приближения А.М. Ляпунова. В качестве инструмента моделирования применено оригинальное программное обеспечение.

Результаты. Произведен анализ влияния коэффициентов регулирования устройства продольной компенсации на апериодическую статическую устойчивость электроэнергетической системы и пропускную способность линии электропередач 220 кВ. Выявлено изменение модуля падения напряжения на электропередаче и угловых характеристик под влиянием коэффициентов регулирования устройства продольной компенсации. Сформирован критерий апериодической статической устойчивости для подобного рода систем с управляемой продольной компенсацией, отличающийся от традиционных учетом изменения падения напряжения в электропередаче и позволяющий более точно оценивать приближение к границе устойчивости. Получена оценка апериодической статической устойчивости для электроэнергетической системы с управляемым устройством продольной компенсации на линии 220 кВ по сформированному критерию. Определены значения коэффициентов регулирования устройства продольной компенсации, при которых не происходит нарушения статической устойчивости.

Выводы. Полученные результаты могут использоваться для решения вопросов повышения пропускной способности ЛЭП при улучшении устойчивости системы.

Ключевые слова: апериодическая статическая устойчивость, линии электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения, управляемые устройства продольной компенсации, коэффициенты регулирования устройства продольной компенсации, критерий устойчивости электроэнергетической системы

Valery Pavlovich Golov

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

Andrew Vadimovich Kalutskov

PJSC «FGC UES» Moscow Enterprise of the Main Power Networks, Engineer, Russia, Moscow, e-mail: andy405@yandex.ru

Dmitry Nikolaevich Kormilitsyn

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

Olga Sergeevna Sukhanova

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

Aperiodic steady-state stability criterion of electric power system with controlled series compensation on 200 kV line

Abstract

Background. Currently there is a need to synchronize operation of the electric power system in the remote areas and increase of existing lines transmission capacity. The construction of new power transmission lines involves high economic expenditures. Well-known papers consider the issues of application of controlled series compensation devices only for long-distance power transmission lines with voltage of 500 kV and higher to increase the transmission capacity and the level of stability. The aim of the study is to increase the stability and the limit of the transmitted power when controlled series compensation devices are installed on 220 kV lines. It is necessary to develop a criterion of aperiodic steady-state stability of an electric power system with a 220 kV-controlled power transmission line.

Materials and methods. Methods of mathematical modeling of electric power system, the theory of long-distance power transmission lines and electromechanical transients, and methods of analyzing electric power system stability were used. A.M. Lyapunov's first approximation method was used to develop a simplified mathematical model. We applied the developed software as a simulation tool.

Results. An analysis was carried out to study the influence of series compensation devices regulation coefficients on the aperiodic steady-state stability of the electric power system and the transmission capacity of 220 kV power transmission lines. A change in the modulus of voltage drop at the power transmission and the

angle characteristics under the influence of the regulation coefficients of the series compensation device was revealed. A criterion of aperiodic steady-state stability has been developed for systems of this kind with controlled series compensation. It differs from traditional ones by considering the changes in the voltage drop in the power transmission and it allows more accurate estimation of the proximity to the stability threshold. An assessment of aperiodic steady-state stability according to the formulated criterion for an electric power system with a controlled series compensation device on a 220 kV line was obtained. The values of the control coefficients of the series compensation device have been determined. No violation of the steady-state stability occurs under the given values.

Conclusions. The results can be used to solve the issues of increasing the transmission capacity of transmission lines to improve the stability of the system.

Key words: aperiodic steady-state stability, power transmission lines of high and ultra-high voltage, controlled series compensation devices, regulation coefficients of the series compensation devices, stability criterion of electric power system

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.014-024

Введение. Управляемые устройства продольной компенсации (УУПК) значительно увеличивают предел передаваемой мощности и улучшают устойчивость системы с линиями электропередачи сверхвысокого напряжения (ЛЭП СВН) [1–4]. Однако использование УУПК только в системах СВН ограничивает область их применения [5]. В настоящее время существует необходимость в расширении производства электроэнергии в местах сосредоточения дешевых энергоресурсов. Генерирующие мощности находятся за сотни километров от больших центров потребления. Таким образом, встает проблема надежной передачи электроэнергии на дальние расстояния по линиям высокого напряжения (ВН).

Одной из главных задач является анализ применения в системах с напряжением 220 кВ УУПК, которые использовались в передачах СВН.

Принимая во внимание наличие аварийных ситуаций в энергосистеме России, которые приводили к достижению предельных значений передаваемых мощностей по линиям ВН в резервных схемах, необходимо провести анализ установки регулируемого УПК в системах ВН [6].

Материалы и методы. Модель рассматриваемой электроэнергетической системы. Исследование производилось для простейшей электроэнергетической системы, содержащей управляемую ЛЭП ВН (рис. 1). Генераторы электрической станции с суммарной номинальной мощностью 600 МВт соединены с системой двухцепной линией электропередачи 220 кВ длиной 126 км с установленным посередине устройством УУПК. На выводах УУПК установлены шунтирующие реакторы (ШР).

На рис. 2 представлена схема замещения исследуемой системы.

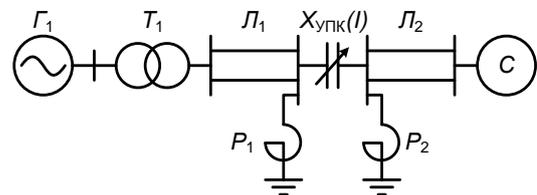


Рис. 1. Исследуемая электроэнергетическая система, содержащая управляемую ЛЭП СВН

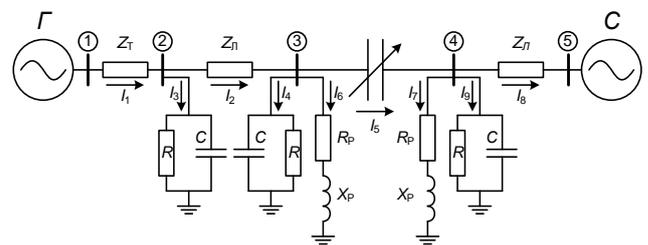


Рис. 2. Схема замещения исследуемой электроэнергетической системы

Регулирование УУПК осуществляется путем изменения емкостного сопротивления в зависимости от тока линии (передаваемой по линии мощности) [7]:

$$X_{\text{упк}}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - K_2 I)}, \quad (1)$$

где $X_{\text{упк}}(I)$ – сопротивление регулируемого УПК, Ом; I – ток линии (в месте установки УПК), кА; K_1 , K_2 – коэффициенты регулирования УПК, мкФ и мкФ/кА соответственно.

Оценка предела аperiodической статической устойчивости производится по математической модели [8]:

$$p[\Psi_{\text{ст}}] = \omega_0 \left(-[u_{\text{ст}}] - r_a [i_{\text{ст}}] - \frac{\omega}{\omega_0} [\gamma] [\Psi_{\text{ст}}] \right), \quad (2)$$

где $[\Psi_{ст}] = \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix}$; $[U_{ст}] = \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix}$; $[i_{ст}] = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$;

$[\gamma] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$; ω_0 – синхронная угловая частота вращения;

r_a – активное сопротивление обмоток статора; ω – угловая частота вращения генератора; Ψ_d, Ψ_q – потокосцепления контуров статора по продольной и поперечной оси соответственно; U_d, U_q – напряжения контуров статора по продольной и поперечной оси соответственно; i_d, i_q – токи контуров статора по продольной и поперечной оси соответственно.

Сформированная модель позволяет рассчитывать как установившиеся, так и переходные режимы системы.

Результаты. Особенности угловых характеристик активной мощности и зависимостей падения напряжения на электропередаче. Расчет установившихся режимов системы выполнен по математической модели с помощью оригинального программного обеспечения на языке программирования C++ [9]. Построение угловых характеристик системы осуществлялось утяжелением режима по углу и по току для выявления изменений всех параметров и особенностей влияния УУПК.

В простейшем виде, без учета поперечных сопротивлений в схемах замещения элементов, схема замещения рассматриваемой сети после преобразований показана на рис. 3.

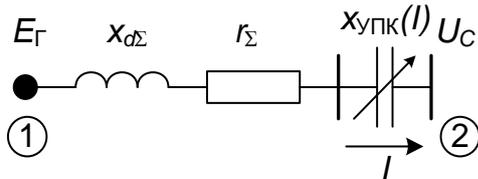


Рис. 3. Схема замещения после преобразования

Явление резонанса напряжений в последовательном колебательном контуре возникает на частоте ω , при которой индуктивное сопротивление катушки $X_L = \omega L$ совпадает с емкостным сопротивлением конденсатора $X_C = \frac{1}{\omega C}$. В этом случае по закону Ома ток в цепи будет максимальным $I = \frac{U}{R}$. В результате напряжения на катушке $U_L = I X_L$ и конденсаторе $U_C = I X_C$

окажутся равными и будут иметь максимально большое значение, которое может значительно превышать напряжение на источнике ЭДС.

На практике частота ω изменяется незначительно и возникновение резонанса напряжений возможно только при большом отклонении частоты. В данном случае явления, эквивалентные резонансным, могут происходить в результате изменяющегося в функции тока емкостного сопротивления УУПК [7].

Введем понятие падения напряжения N в электропередаче между узлами 1 и 2 (см. рис. 3). Для упрощения понимания рассмотрим ту же систему, но без учета активных сопротивлений (рис. 4).

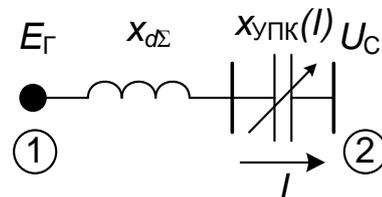


Рис. 4. Схема замещения рассматриваемой сети без учета активных сопротивлений

Значение модуля падения напряжения можно получить исходя из векторной диаграммы для данной сети (рис. 5).

Зная взаимный угол векторов напряжения системы и эквивалентного генератора, а также значения модулей этих векторов, можно определить модуль падения напряжения по теореме косинусов:

$$|N| = \sqrt{E_G^2 - 2E_G U_C \cdot \cos \delta + U_C^2}. \quad (3)$$

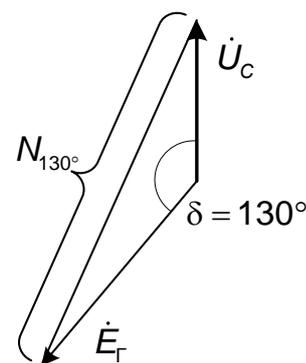


Рис. 5. Векторная диаграмма падения напряжения в связи

Кроме того, исходя из возможных значений взаимных углов в диапазоне от 0 до 180° можно определить минимальное N_{min} и максимальное N_{max} значения падения напряжения (рис. 6).

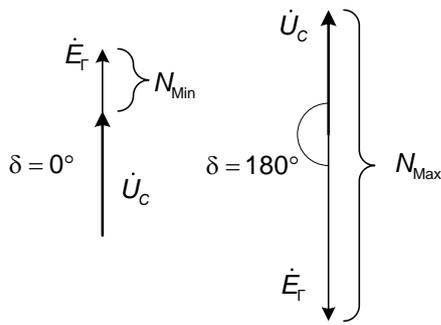


Рис. 6. Векторная диаграмма минимального и максимального падения напряжения

С другой стороны, данное падение напряжения можно рассчитать следующим образом:

$$N(I) = I(x_{d\Sigma} - X_{\text{УПК}}(I)); \quad (4)$$

$$N(I) = I \left(x_{d\Sigma} - \frac{10^6}{\omega(K_1 - K_2 I \cdot I_6) Z_6} \right). \quad (5)$$

Раскрыв скобки в выражении (5), получим

$$N(I) = (I x_{d\Sigma}) - \left(I \frac{10^6}{\omega(K_1 - K_2 I \cdot I_6) Z_6} \right). \quad (6)$$

На рис. 7 показана зависимость модуля падения напряжения в связи для различных законов регулирования УУПК.

Для выявления предела апериодической статической устойчивости воспользуемся критерием П.С. Жданова для рассматриваемой системы – положительно-стью свободного члена характеристического уравнения [10].

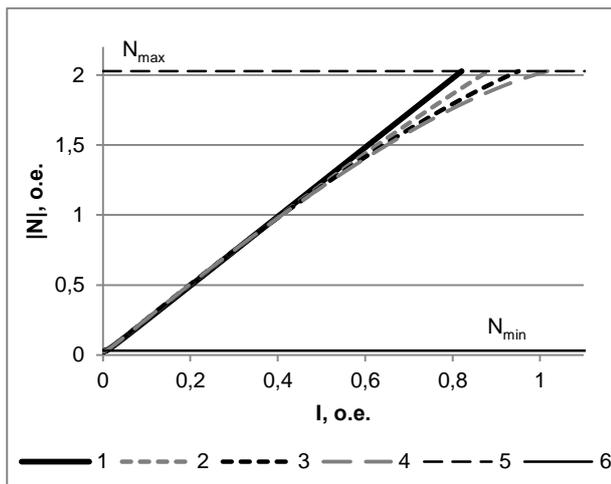


Рис. 7. Зависимость модуля падения напряжения на электропередаче от тока через УПК для различных законов регулирования УПК: 1 – $K_2 = 0$; 2 – $K_2 = 10$; 3 – $K_2 = 15$; 4 – $K_2 = 17$; 5 – максимальное падение напряжения на электропередаче N_{max} ; 6 – минимальное падение напряжения на электропередаче N_{min}

Свободный член характеристического уравнения для рассматриваемой системы показан в следующем выражении:

$$a_2 = \frac{\partial I}{\partial \delta} \frac{\partial P}{\partial X_{\text{УПК}}} \frac{\partial X_{\text{УПК}}}{\partial I} - \frac{\partial P}{\partial \delta} \left(\frac{\partial I}{\partial X_{\text{УПК}}} \frac{\partial X_{\text{УПК}}}{\partial I} - 1 \right). \quad (7)$$

В случае отсутствия регулирования УУПК частная производная $\frac{\partial X_{\text{УПК}}}{\partial I}$ обращается в ноль, при этом уравнение для свободного члена характеристического уравнения упрощается до традиционного для систем без регулируемых устройств [11]:

$$a_2 = \frac{\partial P}{\partial \delta}. \quad (8)$$

В данном случае с увеличением коэффициентов регулирования УУПК наблюдается смещение точки перехода через ноль свободного члена характеристического уравнения в сторону увеличения угла (рис. 8). Однако необходимо отметить, что данный эффект наблюдается в большей степени ввиду смещения положения пика угловой характеристики в сторону увеличения угла под воздействием УУПК (рис. 8).

Частные производные, кроме $\frac{\partial P}{\partial \delta}$, входящие в выражение (7), оказывают слабое влияние на величину свободного члена характеристического уравнения. Поэтому величина свободного члена характеристического уравнения в большей степени определяется именно частной производной $\frac{\partial P}{\partial \delta}$,

где $P = P(X_{\text{УПК}})$.

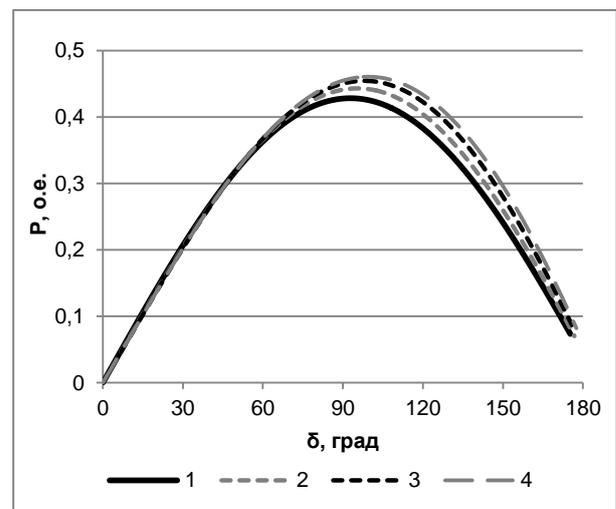


Рис. 8. Угловые характеристики мощности для различных законов регулирования УПК: 1 – $K_2 = 0$; 2 – $K_2 = 10$; 3 – $K_2 = 15$; 4 – $K_2 = 17$

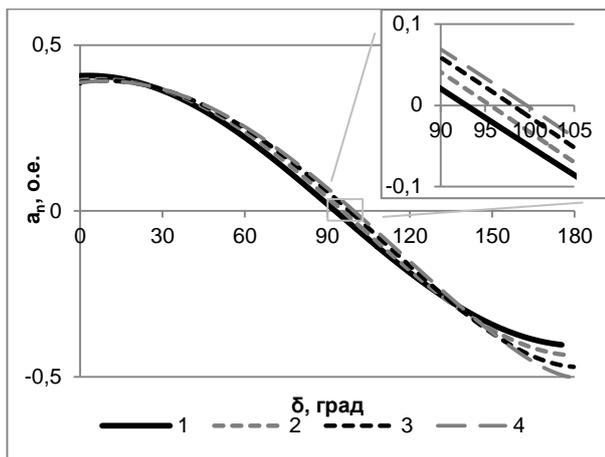


Рис. 9. Зависимость величины свободного члена характеристического уравнения от взаимного угла δ для различных законов регулирования УПК: 1 – $K_2 = 0$; 2 – $K_2 = 10$; 3 – $K_2 = 15$; 4 – $K_2 = 17$

Изменение коэффициентов регулирования устройств продольной компенсации влияет на функцию сопротивления УУПК от тока. Увеличение коэффициентов приводит к возрастанию вычитаемого в выражении (6) и, как следствие, к отклонению от линейного закона и увеличению крутизны зависимости $|N(I)|$ (см. рис. 7). При дальнейшем увеличении коэффициента регулирования K_2 зависимость модуля падения напряжения от тока, не доходя до N_{max} , начинает уменьшаться из-за стремительно роста вычитаемого в (6).

Исходя из векторной диаграммы, при увеличении $|M|$ угол сдвига δ также увеличивается. При этом в случае, если в какой-то точке зависимости $\frac{\partial N(I)}{\partial I} = 0$, т.е. имеет место точка (рис. 10, точка а), после которой $|M|$ начинает уменьшаться, то на падающей части зависимости $|N(I)|$ при увеличении тока в электропередаче активная мощность будет увеличиваться (рис. 11, участок а–в), а взаимный угол уменьшаться, что приведет, в теории, к образованию петлеобразных угловых характеристик.

Необходимо также отметить, что использование традиционного утяжеления режима по углу в случае наличия петлеобразных угловых характеристик ограничено, поскольку одному значению угла соответствует не единственное значение мощности. При задании некорректных начальных приближений расчет может сойтись не в нужной точке характеристики, например в точке д на рис. 10, 11, а не в точке з. Кроме

того, построение петлеобразных угловых характеристик будет затруднено, поскольку при утяжелении режима системы по углу после точки а (рис. 11) произойдет резкий переход на нижнюю часть петли в точку б, сопровождающийся значительными изменениями режимных параметров.

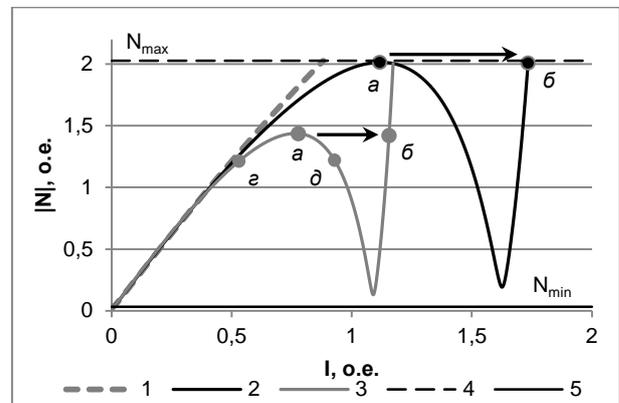


Рис. 10. Зависимость модуля падения напряжения на электропередаче от тока через УПК для различных законов регулирования УПК: 1 – $K_2 = 10$; 2 – $K_2 = 18$; 3 – $K_2 = 31$; 4 – максимальное падение напряжения на электропередаче N_{max} ; 5 – минимальное падение напряжения на электропередаче N_{min}

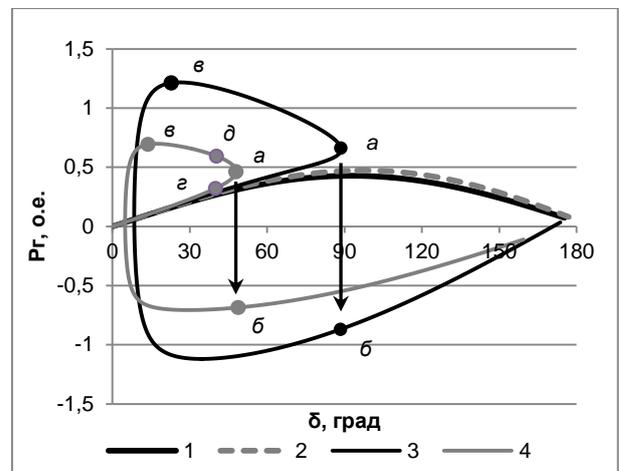


Рис. 11. Угловые характеристики мощности для различных законов регулирования УПК: 1 – $K_2 = 0$; 2 – $K_2 = 10$, 3 – $K_2 = 27$, 4 – $K_2 = 31$

Поэтому для таких случаев предложено утяжеление режима системы по току через УУПК, поскольку при этом каждому значению тока однозначно соответствует уникальный набор режимных параметров, в том числе и активной мощности [8].

Из-за наличия петлеобразных угловых характеристик традиционное представление зависимости свободного члена от угла затруднено, поскольку график зависимости

будет ненаглядным и сложным для восприятия. На рис. 13 представлены зависимости модуля падения напряжения на электропередаче и свободного члена характеристического уравнения от тока через УПК для тех же случаев, что и на рис. 12.

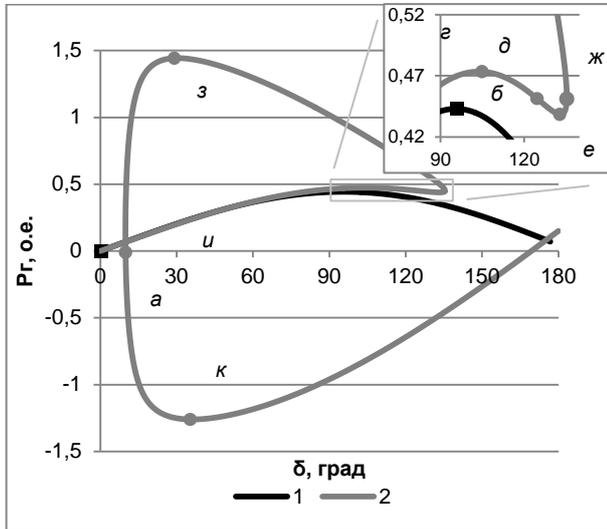


Рис. 12. Угловые характеристики мощности для различных законов регулирования УПК: 1 – $K_2 = 10$; 2 – $K_2 = 20$

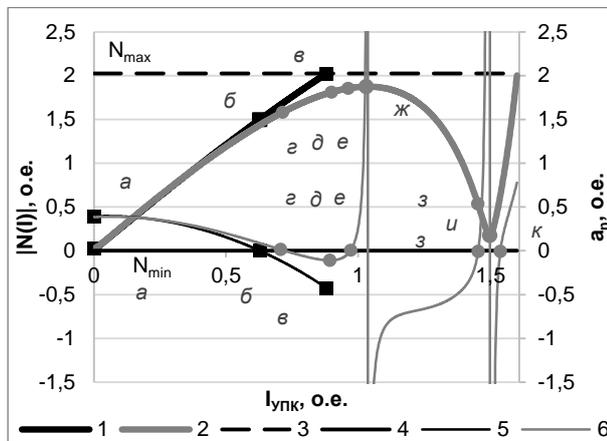


Рис. 13. Зависимости модуля падения напряжения на электропередаче (1–4) и свободного члена характеристического уравнения (5–6) от тока через УПК: 1 – $K_2 = 10$; 2 – $K_2 = 20$; 3 – максимальное падение напряжения на электропередаче N_{max} ; 4 – минимальное падение напряжения на электропередаче N_{min} ; 5 – $K_2 = 10$; 6 – $K_2 = 20$

Поскольку величина свободного члена характеристического уравнения в большей степени определяется частной производной $\frac{\partial P}{\partial \delta}$, где $P = P(X_{УПК})$, то его величину можно оценить исходя из угла касательной к рассматриваемой точке графика.

В случае отсутствия петлеобразных угловых характеристик активной мощности зависимость свободного члена характеристического уравнения, как и для традиционной системы без регулируемых устройств, имеет ниспадающий характер (см. рис. 13, кривая 5).

Поскольку петлеобразные угловые характеристики активной мощности в данном случае отсутствуют, то в любой точке характеристики $|N(I)|$ величина $\frac{\partial N(I)}{\partial I} > 0$ (см. рис. 13, кривая 1). Зависимости на рис. 12 и 13 имеют одноименные характерные точки, которые соответствуют друг другу на разных зависимостях. Величина свободного члена характеристического уравнения, как и в традиционной сети, переходит через ноль вблизи предела передаваемой мощности (см. рис. 12 и 13, точка б).

Анализ зависимостей при наличии петлеобразных угловых характеристик показывает, что, если существует точка, в которой $\frac{\partial N(I)}{\partial I} = 0$, зависимость свободного

члена характеристического уравнения перестает иметь ниспадающий характер и наблюдается ярко выраженный локальный минимум (см. рис. 13, кривая 6, точка д), после которого его величина начинает резкий рост. Кроме того, анализ поведения свободного члена характеристического уравнения позволяет предвидеть появление петлеобразной угловой характеристики в случае, если на каком-либо шаге утяжеления режима сети значение свободного члена характеристического уравнения начинает расти.

В точке образования петлеобразной угловой характеристики (см. рис. 12, точка ж) величина угла наклона касательной становится равной 90° и, следовательно, частная производная $\frac{\partial P}{\partial \delta}$ и свободный

член характеристического уравнения стремятся к бесконечности. При дальнейшем увеличении тока угол касательной будет становиться больше 90° вплоть до точки u , где станет равным 180° . При этом свободный член характеристического уравнения будет увеличиваться от минус бесконечности до нуля.

Увеличение тока после точки $з$ приведет к образованию новой зоны устойчивости, где $a_n > 0$ вплоть до точки u , где ка-

сательная снова становится равной 90° , а частная производная $\frac{\partial P}{\partial \delta}$ и свободный член характеристического уравнения стремятся к бесконечности. Поведение свободного члена характеристического уравнения после точки *и* эквивалентно процессам, происходящим при увеличении тока после точки *ж*.

В зависимости от коэффициента регулирования УУПК, положение минимума свободного члена характеристического уравнения также изменяется. Возможны такие случаи, при которых величина свободного члена, не переходя через ноль, начинает движение вверх (рис. 14, точка *л*), что свидетельствует о том, что система будет сохранять аperiodическую устойчивость вплоть до точки образования петлеобразной угловой характеристики.

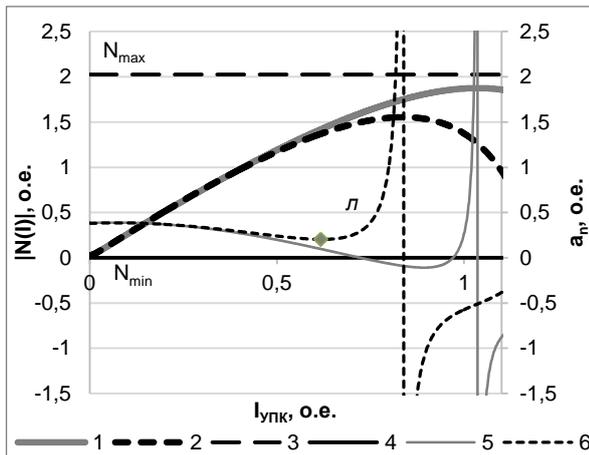


Рис. 14. Зависимости модуля падения напряжения на электропередаче (1–4) и свободного члена характеристического уравнения (5–6) от тока через УПК: 1 – $K_2 = 20$; 2 – $K_2 = 27$; 3 – максимальное падение напряжения на электропередаче N_{max} ; 4 – минимальное падение напряжения на электропередаче N_{min} ; 5 – $K_2 = 20$; 6 – $K_2 = 27$

Угловые характеристики, на которых выделены устойчивые (более толстыми линиями) и неустойчивые (тонкими линиями) зоны с точки зрения знака свободного члена характеристического уравнения, соответствуют рассмотренным выше зависимостям. Одноименные точки на рис. 13–15 соответствуют друг другу на разных зависимостях.

Необходимо отметить, что физически наличие нескольких зон устойчивой работы не имеет смысла, поскольку перейти от од-

ной зоны в другую, минуя неустойчивую, невозможно (рис. 15) [12]. Предельное значение мощности, при котором сохраняется устойчивость, определяется исходя из первого перехода значения свободного члена через ноль при утяжелении режима ЭЭС.

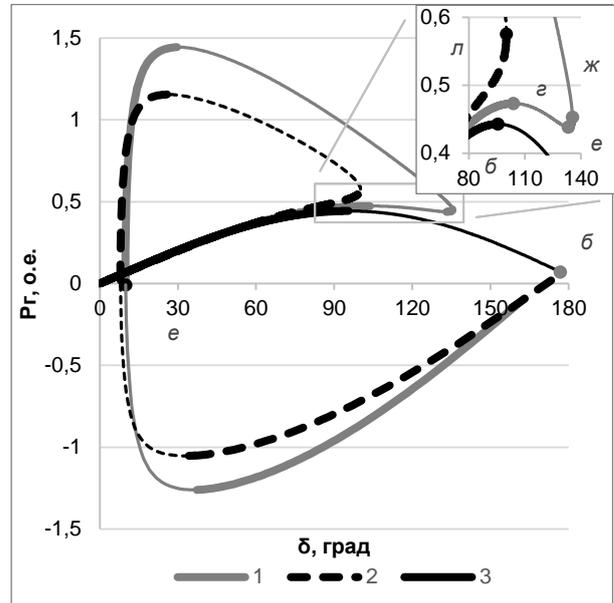


Рис. 15. Угловые характеристики мощности для различных законов регулирования УПК: 1 – $K_2 = 20$; 2 – $K_2 = 27$; 3 – $K_2 = 10$

В случае, когда на всем диапазоне углов величина $\frac{\partial N(I)}{\partial I} > 0$ (а значит, отсутствуют петлеобразные угловые характеристики), предел аperiodической устойчивости будет наблюдаться, как и в традиционной сети, при $\frac{\partial P}{\partial \delta} = 0$ (см. рис. 13 и 15, точка *а*)

[13]. В случае наличия точки, при которой $\frac{\partial N(I)}{\partial I} = 0$ (см. рис. 13 и 15, точка *д*), предел устойчивости может наблюдаться ранее этой точки, поскольку в точке *в* наблюдается переход свободного члена через ноль. В случае, если на всем диапазоне от 0° до точки, в которой $\frac{\partial N(I)}{\partial I} = 0$, выполняется

условие $\frac{\partial P}{\partial \delta} > 0$, то границей устойчивости будет являться именно эта точка (см. рис. 13 и 15, точка *ж*).

Таким образом, зависимость модуля падения напряжения в связи $|N(I)|$ позволяет идентифицировать рабочие части угловых характеристик активной мощности генерато-

ров, которые соответствуют условиям $\frac{\partial N(I)}{\partial I} > 0$ и $\frac{\partial P}{\partial \delta} > 0$. Применение только кри-

терия $\frac{\partial P}{\partial \delta} > 0$ в данной сети некорректно, по-

скольку в традиционной сети при приближении к границе устойчивости величина этой частной производной приближалась к 0. В данном же случае в предельной точке (см. рис. 11, а), в которой угловая характеристика обращается в петлю, величина $\frac{\partial P}{\partial \delta} \rightarrow \infty$, что неудобно для отслеживания.

Критерий $\frac{\partial N(I)}{\partial I} > 0$ отлично подходит к подобному рода сетям, поскольку граница устойчивости наблюдается в точке $\frac{\partial N(I)}{\partial I} = 0$,

принимая во внимание критерий $\frac{\partial P}{\partial \delta} > 0$.

Одним из вариантов оптимальной настройки УУПК является выбор такого максимального коэффициента регулирования K_2 , при котором величина $|N(I)|$ достигает N_{\max} при величине угла, близкой к 180° . Тогда даже при динамических пере-

ходах критерий $\frac{\partial N(I)}{\partial I} > 0$ будет выполняться. Однако в данном случае эффект от управляемой компенсации не используется полностью, поскольку при наличии петлеобразных характеристик предел передаваемой мощности при сохранении устойчивости оказывается значительно выше.

Для получения максимального эффекта от управляемой продольной компенсации необходимо при значении $\frac{\partial N(I)}{\partial I} = 0$ пере-

ходить к значению $X_{\text{УПК}} = \text{const}$, соответствующему устойчивому режиму (рис. 16, поведение зависимостей после круглых маркеров), что позволит сохранить все положительные эффекты от управляемой компенсации и не допустить появления петлеобразных угловых характеристик.

При этом поведение зависимости $|N(I)|$ после ограничения $X_{\text{УПК}}$ будет подчиняться линейному закону по формуле (4) (рис. 17, поведение зависимостей после круглых маркеров) и образование петлеобразных угловых характеристик будет невозможно, поскольку при утяжелении величина $|N(I)|$ дойдет до N_{\max} .

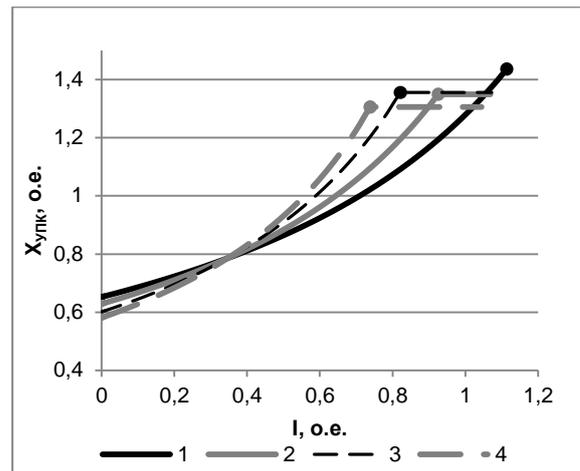


Рис. 16. Зависимость сопротивлений УПК от тока для различных законов регулирования УПК: 1 – $K_2 = 18$; 2 – $K_2 = 22$; 3 – $K_2 = 27$; 4 – $K_2 = 31$

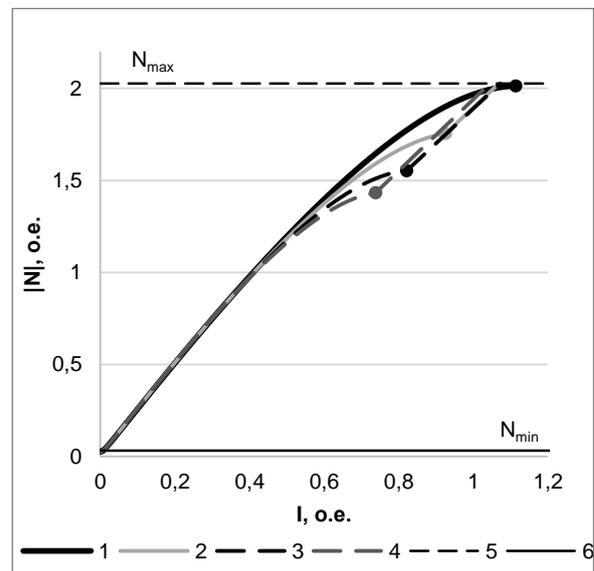


Рис. 17. Зависимость модуля падения напряжения на электропередаче от тока через УПК при ограниченно-зависимой характеристике $X_{\text{УПК}}$ для различных законов регулирования: 1 – $K_2 = 18$; 2 – $K_2 = 22$; 3 – $K_2 = 27$; 4 – $K_2 = 31$; 5 – максимальное падение напряжения на электропередаче N_{\max} ; 6 – минимальное падение напряжения на электропередаче N_{\min}

При использовании ограничения величины сопротивления УУПК угловая характеристика $P(\delta)$ после ограничения становится традиционной, как для системы с неуправляемым УПК, и показывает увеличение предельной по статической устойчивости активной мощности в зависимости от закона регулирования сопротивления $X_{\text{УПК}}(I)$ (рис. 18).

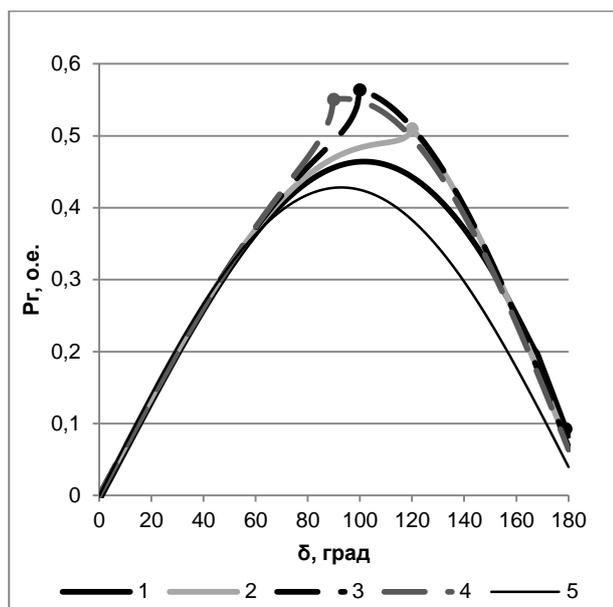


Рис. 18. Угловые характеристики при ограниченно-зависимой характеристике $X_{УПК}$ для различных законов регулирования УПК: 1 – $K_2 = 18$; 2 – $K_2 = 22$; 3 – $K_2 = 27$; 4 – $K_2 = 31$; 5 – $K_2 = 0$

При этом имеется некоторый экстремум, при котором наблюдается максимальный эффект от применения ограничения величины сопротивления УУПК. Для его выявления проведено исследование с планомерным изменением коэффициента K_2 с последующим выявлением предела мощности.

Выявленная зависимость (рис. 19) показывает наличие оптимума настройки коэффициента регулирования K_2 , который приводит к максимально возможной величине предела передаваемой мощности.

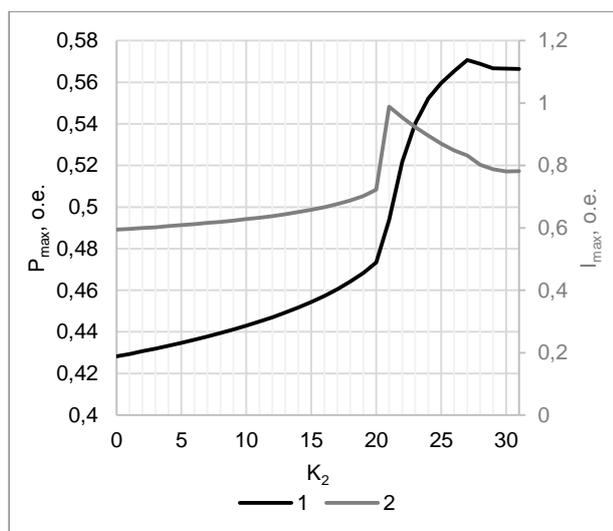


Рис. 19. Зависимости величин от коэффициента регулирования K_2 УУПК: 1 – предел передаваемой мощности; 2 – ток через УУПК при пределе передаваемой мощности

Кроме того, в эксперименте произведена оценка тока через УПК при пределе мощности на каждом значении K_2 . Выявлено, что с ростом предела передаваемой мощности ток увеличивается, однако, после того как значение предела мощности начинает наблюдаться в точке ограничения сопротивления УПК, ток резко увеличивается, а затем снижается, что говорит о снижении токовой загрузки элементов сети при применении больших коэффициентов управляемой компенсации с увеличением предела мощности (рис. 19).

Выводы. Проведенное изучение влияния закона управления регулируемого устройства продольной емкостной компенсации на характеристики установившихся режимов рассматриваемой электрической системы показало его эффективность в плане повышения пределов передаваемой мощности.

Условие $\frac{\partial N(I)}{\partial I} > 0$ является критери-

ем аperiodической статической устойчивости в подобного рода системах с УУПК, так как возможно наличие участка угловых характеристик, на котором мощность возрастает до предельного значения, когда $\frac{\partial N(I)}{\partial I} < 0$ и устойчивая работа невозможна.

Анализ полученных характеристик позволяет сделать вывод, что использование УУПК в системах 220 кВ приводит к увеличению пропускной способности с различными законами регулирования, а также к снижению токовой загрузки элементов сети при увеличении коэффициентов управляемой компенсации.

Список литературы

1. Антонов А.В., Фокин В.К., Тузлукова Е.В. О применении устройств продольной компенсации в высоковольтных электрических сетях России // Энергия единой сети. – 2016. – № 6 (29). – С. 26–41.
2. Vaibhav Desai, Vivek Pandya, Anil Kumar Markana. Enhancement of Transient Stability of Power System with Variable Series Compensation // International Journal of Engineering Research and Development (IJERD) ISSN: 2278-067X Recent trends in Electrical and Electronics & Communication Engineering (RTEECE 17th – 18th April 2015). – 2015. – P. 62–68.
3. Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Лихачев А.П. Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с сетевыми

устройствами гибких электропередач // Электричество. – 2013. – № 12. – С. 2–13.

4. **Eminoglu U., Hocaoglu M.H., Yalcinoz T.** Transmission Line Shunt and Series Compensation with Voltage Sensitive Loads // *International Journal of Electrical Engineering Education*. – October 2009. – Vol. 46, Issue 4. – P. 354–369.

5. **Электрические** сети сверх- и ультравысокого напряжения ЭЭС России. Теоретические и практические основы: в 3 т. / под общ. ред. А.Ф. Дьякова. – М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорации «ЕЭЭК», 2012.

6. **Фокин В.К.** Повышение выдачи мощности Саяно-Шушенской ГЭС с помощью емкостной компенсации на линии СШ ГЭС – «Новокузнецкая», «Кузбасская» // *Энергия единой сети*. – 2013. – № 2(7). – С. 66–73.

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

8. **Устойчивость** электроэнергетической системы из двух электрических станций с регулируемой продольной компенсацией / В.П. Голов, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин, А.А. Виноградова // *Вестник ИГЭУ*. – 2012. – Вып. 5. – С. 26–31.

9. **Кормилицын Д.Н.** Программа для ЭВМ: «Controlled electric power system stability» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018660842; зарег. в реестре программ для ЭВМ 28.08.18.

10. **Веников В.А.** Переходные электро-механические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

11. **Костюк О.М.** Элементы теории устойчивости энергосистем. – Киев: Наукова думка, 1983. – 296 с.

12. **Электрические** системы. Т. 1. Математические задачи электроэнергетики / под ред. В.А. Веникова. – М.: Высш. шк., 1970. – 336 с.

13. **Куликов Ю.А.** Переходные процессы в электроэнергетических системах. – М.: Омега-Л, 2013. – 384 с.

References

1. Antonov, A.V., Fokin, V.K., Tuzlukova, E.V. O primenenii ustroystv prodol'noy kompensatsii v vysokovol'tnykh elektricheskikh setyakh Rossii [On applying series compensation devices in Russian high-voltage electric networks]. *Energiya edinoy seti*, 2016, no. 6(29), pp. 26–41.

2. Vaibhav, Desai, Vivek, Pandya, Anilkumar, Markana. Enhancement of Transient Stability of Power System with Variable Series Compensation. *International Journal of Engineering Research and Development (IJERD)*, 2015, pp. 62–68.

3. Shakaryan, Yu.G., Fokin, V.K., Likhachev, A.P. Ustanovivshiesya rezhimy raboty elektroenergeticheskikh sistem s setevymi

ustroystvami gibkikh elektroperedach [Steady states modes of electric power systems with flexible power transmissions]. *Elektrichestvo*, 2013, no. 12, pp. 2–13.

4. Eminoglu, U., Hocaoglu, M.H., Yalcinoz, T. Transmission Line Shunt and Series Compensation with Voltage Sensitive Loads. *International Journal of Electrical Engineering Education*, October 2009, vol. 46, issue 4, pp. 354–369.

5. D'yakov, A.F. *Elektricheskie seti sverkh- i ul'travysokogo napryazheniya EES Rossii. Teoreticheskie i prakticheskie osnovy: v 3 t.* [Unified power system electric networks of super and ultra-high voltage of Russia. Theoretical and practical bases: in 3 vol.]. Moscow: NTF «Energoprogress» Korporatsii «EЭЭК», 2012.

6. Fokin, V.K. Povyschenie vydachi moshchnosti Sayano-Shushenskoy GES s pomoshch'yu emkostnoy kompensatsii na linii SSh GES – «Novokuznetskaya», «Kuzbasskaya» [Power output ascension of Sayano-Shyshenskaya Hydroelectric Generating Plant by means of capacitive compensation along the SS Hydroelectric Generating Plant – “Novokuznetskaya”, “Kuzbasskaya” line]. *Energiya edinoy seti*, 2013, no. 2(7), pp. 66–73.

7. Golov, V.P. Primenenie reguliruemoy kompensatsii liniy elektroperedach [Application of controlled compensation on power lines]. *Izvestiya vuzov. Energetika*, 1978, no. 6, pp. 3–8.

8. Golov, V.P., Martirosyan, A.A., Moskvina, I.A., Vinogradova, A.A. Ustoychivost' elektroenergeticheskoy sistemy iz dvukh elektricheskikh stantsiy s reguliruemoy prodol'noy kompensatsiey [Stability of electrical power engineering system consisting of two electrical power stations with controlled series compensation]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 5, pp. 26–31.

9. Kormilitsyn, D.N. *Controlled electric power system stability. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM* [Certificate of Software Registration], no. 2018660842, 2018.

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

11. Kostyuk, O.M. *Elementy teorii ustoychivosti energosistem* [Power system stability theory elements]. Kiev: Naukova dumka, 1983. 296 p.

12. Venikov, V.A. *Elektricheskie sistemy. T. 1. Matematicheskie zadachi elektroenergetiki* [Electrical systems. Vol. 1. Mathematical problems of electrical power industry]. Moscow: Vysshaya shkola, 1970. 336 p.

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