

УДК 621.311

Расчет характеристик установившихся режимов электроэнергетической системы с регулируемым устройством продольной компенсации

В.П. Голов, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, Российская Федерация
E-mail: golov@ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Существующая методика расчета установившихся режимов электроэнергетической системы с регулируемым устройством продольной компенсации требует постоянной привязки к конкретному установившемуся режиму, что является весьма неудобным при исследованиях и применении регулируемого устройства продольной компенсации с определенными характеристиками. В связи с этим актуальным является расчет характеристик установившихся режимов электроэнергетической системы с регулируемым устройством продольной компенсации без привязки к конкретному режиму.

Материалы и методы: Расчет установившихся режимов работы ЭЭС с регулируемым устройством продольной компенсации выполнен на основе сформированной системы алгебраических уравнений с использованием метода Ньютона. Проверка полученных результатов осуществлена в программном комплексе «Энергия».

Результаты: Сформирована математическая модель и произведены расчеты характеристик установившихся режимов ЭЭС с регулируемым устройством продольной компенсации без привязки к конкретному режиму. Разработаны программные средства, позволяющие определять изменения параметров режима при заданной характеристике регулирующего устройства.

Выводы: Сформированный алгоритм и его программная реализация позволяют производить расчеты установившихся режимов ЭЭС при заданных характеристиках устройства продольной компенсации, а также получать характеристики устройства продольной компенсации при заданных параметрах исходного режима в целях решения задачи улучшения устойчивости ЭЭС.

Ключевые слова: регулируемые устройства продольной компенсации, установившийся режим, математическая модель.

Characteristics Calculation of Steady-state Modes of Electrical Power Engineering System with the controlled device of series compensation

V.P. Golov, A.A. Martirosyan, I.A. Moskvina
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: golov@ispu.ru

Abstract

Background: The existing method of calculating the steady-state modes of the electrical power engineering system with the controlled device of series compensation should be constantly bound to the specific steady-state mode that is very inconvenient for researches and applying the controlled series compensation device with specific characteristics. It is important to carry out the characteristics calculation of the steady-state modes of the electrical power engineering system with the controlled device of series compensation without any links with the specific mode.

Materials and methods: The calculation of the steady-state modes of the electrical power engineering system with the controlled device of series compensation is carried out on the basis of the formed algebraic equations with using the Newton method. The verification of given results is controlled in «Energy» software package.

Results: The mathematical model is created and calculations of steady-state modes characteristics of the electrical power engineering system with the controlled device of series compensation are made without without any links with the specific mode, the initial data include characteristics of the controlled device of series compensation.

Conclusions: The developed software means allow to define changes of mode parameters at the set regulating device characteristic, to obtain controlled device characteristics for the solution to the problem of stability improvement, and to make steady-state modes calculations of electrical power engineering system with the controlled device of series compensation, altering the way of mode weighting at various calculation stages.

Key words: controlled device of series compensation, steady-state mode, mathematical model.

Увеличение потребления электрической энергии как в промышленной, так и в коммунальной сферах требует увеличения пропускной способности и управляемости линий электропередачи [1]. Одним из направлений развития управляемых межсистемных связей является применение регулируемых устройств про-

дольной емкостной компенсации (УПК). Для практического применения этих устройств должны быть решены задачи по исследованию их влияния на режимы электроэнергетической системы (ЭЭС), а также по выбору оптимальных параметров управления. Проведенное исследование влияния законов управления регули-

руемых устройств продольной емкостной компенсации на характеристики установившихся и переходных режимов простейшей ЭЭС, состоящей из электростанции, линии электропередачи и мощной приемной системы, показало их эффективность как в плане повышения пределов передаваемой мощности (около 40 %), по сравнению с УПК обычного типа, так и в плане улучшения устойчивости [2].

Ранее в [3] был предложен закон регулирования УПК, представляющий собой функциональную зависимость емкостного сопротивления от тока, Ом:

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

где I – ток через УПК, кА; K_1, K_2 – коэффициенты, характеризующие зависимость $X_{УПК}(I)$.

Также была предложена методика расчета установившихся режимов ЭЭС с регулируемым УПК, которая сводилась к следующему:

1. При выборе коэффициентов K_1, K_2 принималось, что начальное значение сопротивления связи, степень компенсации и установившийся режим электрической системы заданы.

2. Коэффициент K_2 , определяющий крутизну зависимости $X_{УПК}(I)$, выбирался произвольно, после чего, зная параметры исходного режима, находились значения коэффициента K_1 .

Другими словами, была необходима постоянная привязка к конкретному установившемуся режиму ЭЭС. Это являлось вынужденной мерой при проведении исследований. Нашей задачей является расчет установившихся режимов ЭЭС, состоящей из двух электрических станций, представленных эквивалентными генераторами, с регулируемым УПК (рис. 1), без привязки к конкретному режиму, то есть в исходных данных присутствуют характеристики регулируемого УПК.

Следует также отметить, что расчет установившихся режимов ЭЭС с регулируемым УПК носит комплексный характер, ввиду того что, с одной стороны, необходимо решить задачу анализа, т.е. определить изменения параметров режима при заданной характеристике регулирующего устройства, а с другой стороны – решить задачу синтеза, которая сводится к отысканию характеристики этого устройства в целях улучшения устойчивости ЭЭС. Для этого сформирован алгоритм и произведены расчеты установившихся режимов для ЭЭС, состоящей из двух генераторных станций с регулируемым УПК (рис. 1). На рис. 2 представлена схема замещения исследуемой ЭЭС.

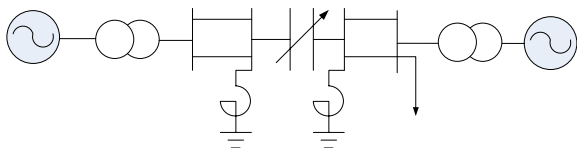


Рис. 1. Исследуемая электроэнергетическая система

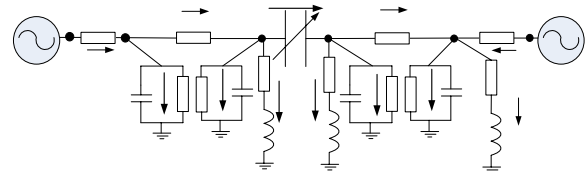


Рис. 2. Схема замещения исследуемой электроэнергетической системы

Расчеты установившихся режимов электроэнергетической системы с регулируемым УПК производились по сформированной полной математической модели [5] после преобразования для решения поставленной задачи:

• для генератора 1:

$$\begin{aligned} -u_{d1} - i_{d1}r - \Psi_{q1} &= 0; \\ -u_{q1} - i_{q1}r + \Psi_{d1} &= 0; \\ U_{f1} - i_{f1}r_f &= 0; \\ -i_{D1} \cdot r_D &= 0; \\ -i_{Q1} \cdot r_Q &= 0; \\ \Psi_{d1} &= X_d \cdot i_{d1} + X_{ad} \cdot i_{f1} + X_{Dd} \cdot i_{D1}; \\ \Psi_{q1} &= X_q \cdot i_{q1} + X_{Qq} \cdot i_{Q1}; \\ \Psi_{f1} &= X_f \cdot i_{f1} + X_{ad} \cdot i_{d1} + X_{Df} \cdot i_{D1}; \\ \Psi_{D1} &= X_D \cdot i_{D1} + X_{Dd} \cdot i_{d1} + X_{Df} \cdot i_{f1}; \\ \Psi_{Q1} &= X_{Qq} \cdot i_{q1} + X_Q \cdot i_{Q1}; \\ M_{T1} - M_{EM1} &= 0; \\ M_{EM1} &= i_{q1}\Psi_{d1} - i_{d1}\Psi_{q1}; \end{aligned}$$

• для генератора 2:

$$\begin{aligned} -u_{d2} - i_{d2}r - \Psi_{q2} &= 0; \\ -u_{q2} - i_{q2}r + \Psi_{d2} &= 0; \\ U_{f2} - i_{f2}r_f &= 0; \\ -i_{D2} \cdot r_D &= 0; \\ -i_{Q2} \cdot r_Q &= 0; \\ \Psi_{d2} &= X_d \cdot i_{d2} + X_{ad} \cdot i_{f2} + X_{Dd} \cdot i_{D2}; \\ \Psi_{q2} &= X_q \cdot i_{q2} + X_{Qq} \cdot i_{Q2}; \\ \Psi_{f2} &= X_f \cdot i_{f2} + X_{ad} \cdot i_{d2} + X_{Df} \cdot i_{D2}; \\ \Psi_{D2} &= X_D \cdot i_{D2} + X_{Dd} \cdot i_{d2} + X_{Df} \cdot i_{f2}; \\ \Psi_{Q2} &= X_{Qq} \cdot i_{q2} + X_Q \cdot i_{Q2}; \\ M_{T2} - M_{EM2} &= 0; \\ M_{EM2} &= i_{q2}\Psi_{d2} - i_{d2}\Psi_{q2}; \end{aligned}$$

• для трансформатора 1:

$$\begin{aligned} \frac{U_{d1(2)}}{x_T} - \frac{U_{d6}}{x_T} - \frac{r_T}{x_T} i_{d1(2)} - i_{q1(2)} &= 0; \\ \frac{U_{q1(2)}}{x_T} - \frac{U_{q6}}{x_T} - \frac{r_T}{x_T} i_{q1(2)} + i_{d1(2)} &= 0; \end{aligned}$$

• для трансформатора 2:

$$\begin{aligned} \frac{U_{d2}}{x_T} - \frac{U_{d3}}{x_T} - \frac{r_T}{x_T} i_{d2} - i_{q2} &= 0; \\ \frac{U_{q2}}{x_T} - \frac{U_{q3}}{x_T} - \frac{r_T}{x_T} i_{q2} + i_{d2} &= 0; \end{aligned}$$

- для линии электропередачи 1:

$$\frac{U_{d3}}{x_L} - \frac{U_{d4}}{x_L} - \frac{r_L}{x_L} i_{d4} - i_{q4} = 0;$$

$$\frac{U_{q3}}{x_L} - \frac{U_{q4}}{x_L} - \frac{r_L}{x_L} i_{q4} + i_{d4} = 0;$$

$$x_C i_{d3} - U_{q3} - \frac{x_C}{r_g} \cdot U_{d3} = 0;$$

$$x_C i_{q3} + U_{d3} - \frac{x_C}{r_g} \cdot U_{q3} = 0;$$

$$x_C i_{d5} - U_{q4} - \frac{x_C}{r_g} \cdot U_{d4} = 0;$$

$$x_C i_{q5} + U_{d4} - \frac{x_C}{r_g} \cdot U_{q4} = 0;$$

- для реактора 1:

$$\frac{U_{d4}}{x_r} - \frac{r_r}{x_r} i_{d6} - i_{q6} = 0;$$

$$\frac{U_{q4}}{x_r} - \frac{r_r}{x_r} i_{q6} + i_{d6} = 0;$$

- для УПК:

$$x_{УПК}(I_7) \cdot i_{d7} - (u_{q4} - u_{q5}) = 0;$$

$$x_{УПК}(I_7) \cdot i_{q7} + (u_{d4} - u_{d5}) = 0;$$

$$X_{УПК}(I_7) = \frac{10^6}{\omega_0 \cdot (K_1 - K_2 \cdot I_7)};$$

$$\omega_0 = 314 \text{ с}^{-1};$$

$$I_7 = \sqrt{i_{d7}^2 + i_{q7}^2};$$

- для реактора 2:

$$\frac{U_{d5}}{x_r} - \frac{r_r}{x_r} i_{d8} - i_{q8} = 0;$$

$$\frac{U_{q5}}{x_r} - \frac{r_r}{x_r} i_{q8} + i_{d8} = 0;$$

- для линии электропередачи 2:

$$\frac{U_{d5}}{x_L} - \frac{U_{d6}}{x_L} - \frac{r_L}{x_L} i_{d10} - i_{q10} = 0;$$

$$\frac{U_{q5}}{x_L} - \frac{U_{q6}}{x_L} - \frac{r_L}{x_L} i_{q10} + i_{d10} = 0;$$

$$x_C i_{d9} - U_{q5} - \frac{x_C}{r_g} \cdot U_{d5} = 0;$$

$$x_C i_{q9} + U_{d5} - \frac{x_C}{r_g} \cdot U_{q5} = 0;$$

$$x_C i_{d11} - U_{q6} - \frac{x_C}{r_g} \cdot U_{d6} = 0;$$

$$x_C i_{q11} + U_{d6} - \frac{x_C}{r_g} \cdot U_{q6} = 0;$$

- для нагрузки:

$$\frac{U_{d6}}{x_n} - \frac{r_n}{x_n} i_{d12} - i_{q12} = 0;$$

$$\frac{U_{q6}}{x_n} - \frac{r_n}{x_n} i_{q12} + i_{d12} = 0;$$

- уравнения баланса токов в узлах:

$$0 = i_{d2} - i_{d3} - i_{d4};$$

$$0 = i_{q2} - i_{q3} - i_{q4};$$

$$0 = i_{d4} - i_{d5} - i_{d6} - i_{d7};$$

$$0 = i_{q4} - i_{q5} - i_{q6} - i_{q7};$$

$$0 = i_{d7} - i_{d8} - i_{d9} - i_{d10};$$

$$0 = i_{q7} - i_{q8} - i_{q9} - i_{q10};$$

$$0 = i_{d10} + i_{d1(2)} - i_{d11} - i_{d12};$$

$$0 = i_{q10} + i_{q1(2)} - i_{q11} - i_{q12};$$

- уравнения преобразования координат:

$$i_{d1(2)} = i_{d1} \cos \delta_{21} - i_{q1} \sin \delta_{21};$$

$$i_{q1(2)} = i_{d1} \sin \delta_{21} + i_{q1} \cos \delta_{21};$$

$$U_{d1(2)} = u_{d1} \cos \delta_{21} - u_{q1} \sin \delta_{21};$$

$$U_{q1(2)} = u_{d1} \sin \delta_{21} + u_{q1} \cos \delta_{21}.$$

Полученную систему алгебраических уравнений можно представить в матричном виде:

$$W(X) = 0. \quad (2)$$

Задача решается методом Ньютона [4]. Решение нелинейных алгебраических уравнений методом Ньютона эффективно, так как при сравнительно несложной схеме вычисления он обладает быстрой сходимостью. Каждый шаг итерационного процесса состоит из решения линейной системы:

$$\frac{dW}{dX}(X^{(i)})(\Delta X^{(i+1)}) = -W(X^{(i)}). \quad (3)$$

Определяются поправки методом Гаусса и находятся приближения переменных:

$$X^{(i+1)} = X^{(i)} + \Delta X^{(i+1)}. \quad (4)$$

Контроль сходимости осуществляется по вектору невязок:

$$|\omega_k(X^{(i)})| \leq \varepsilon. \quad (5)$$

Сформированная программа расчета позволяет получить все режимные параметры (а также сопротивление $X_{УПК}(I)$) при заданных начальных приближениях и коэффициентах закона регулирования емкостного сопротивления в УПК, т.е. решить задачу анализа:

начальные приближения, $K_1, K_2 \rightarrow X_{УПК}(I)$,

режимные параметры.

При расчетах характеристик установившихся режимов электрических систем существенным моментом является выбор режимного параметра, по которому будет осуществляться утяжеление режима. Как правило, таким параметром является активная мощность или угол положения ротора генератора [7]. В случае системы из двух генераторных станций – это мощность одного из генераторов или взаимный угол между векторами ЭДС генераторов. С применением регулируемой в функции тока емкости в УПК появляются некоторые вычислительные особенности расчета характеристик установившихся режимов. При небольших значениях коэффициента K_2 (1) утяжеление режи-

ма производится по взаимному углу между векторами ЭДС генераторов (рис. 3, кривые 1, 2). В случае появления резонансных переходов при больших значениях K_2 [3, 5], которые приводят к появлению петлеобразных характеристик активной мощности (рис. 3, кривая 3), утяжеление по углу не позволяет получить полную характеристику, так как до начала петли для одного значения угла может быть несколько значений мощности.

Таким образом, для проведения серии расчетов установившихся режимов ЭЭС с регулируемым УПК при резонансных переходах возникает необходимость в утяжелении режима сначала по углу, а затем – по току через УПК, имея в виду зависимость модуля падения напряжения в связи $|N(I)|$ [5]. При появлении резонансного перехода смена параметра утяжеления производится автоматически по увеличению производной $\frac{dP_2}{d\delta_{21}}$.

Для проверки достоверности полученных результатов в программном комплексе «Энергия» [6] была реализована расчетная схема, представленная на рис. 4.

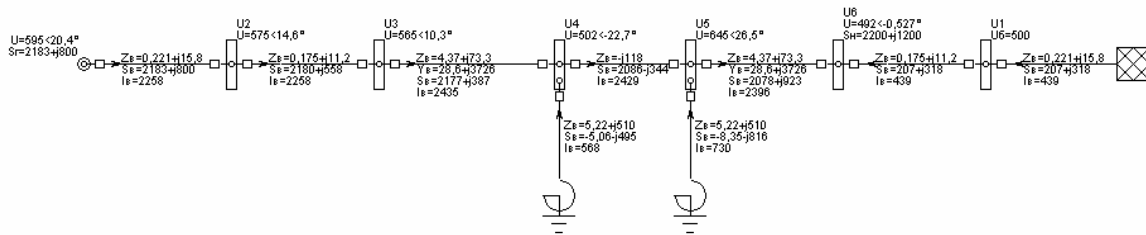


Рис. 4. Результаты расчета установившегося режима

Полученное небольшое расхождение в результатах (см. таблицу) связано с определением параметров в именованных единицах с использованием шкалы средних значений номинальных напряжений [8].

В целях решения задачи синтеза была реализована программа расчета, в которой по заданным значениям емкостного сопротивления и коэффициента K_2 характеристики УПК можно получить параметры режима и соответствующий коэффициент K_1 (1):

начальные приближения, $X_{УПК}(I), K_2 \rightarrow K_1$,

режимные параметры.

С использованием вышеуказанных программ были произведены расчеты установившихся режимов и построены угловые характеристики, представленные на рис. 3. Полученные зависимости несколько отличаются от представленных в [5], в связи с более точным определением коэффициентов регулирования УПК.

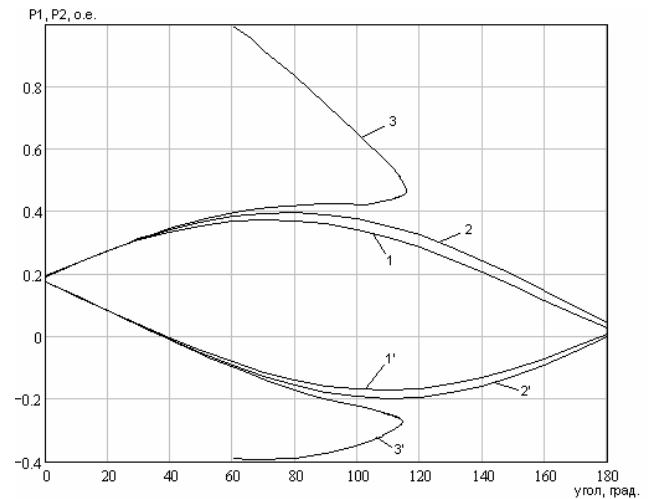


Рис. 3. Угловые характеристики для различных законов регулирования $X_{УПК}(I)$: 1, 1' – P2, P1 соответственно при $X_{УПК}(I) = \text{const}$;

2, 2' – при $X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_0(33,48 - 5,5I)}$ Ом; 3, 3' – при

$$X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_0(36,4 - 8I)}$$

Сравнение результатов расчета установившегося режима

Режимные параметры	Результаты расчета «Энергия»	Результаты расчета разработанной программы
Напряжения узлов, кВ		
U1	500	500
U2	575	585
U3	565	573
U4	502	496
U5	645	660
U6	492	495
Токи ветвей, А		
I1	439	315
I2	2258	2246
I4	2435	2452
I6	568	561
I7 (ток в УПК)	2429	2445
I8	730	747
I10	2396	2411
Активная мощность генераторов, Вт		
Pr1	207	192
Pr2	2183	2183

Заключение

Применение рассмотренных программных средств позволяет производить расчеты характеристик установившихся режимов ЭЭС, состоящей из двух электрических станций, представленных эквивалентными генераторами, с регулируемым УПК, при общепринятых исходных данных с возможностью изменения способа утяжеления режима в процессе расчета в зависимости от характеристики УПК.

Анализ влияния характеристики конкретного регулируемого устройства на режимные параметры показал увеличение пределов передаваемой мощности при условии обеспечения устойчивости и улучшения параметров установившихся режимов при малых перетоках мощности.

Список литературы

1. **Электрические** сети сверх- и ультравысокого напряжения ЭЭС России. Теоретические и практические основы: в 3 т. / под общ. ред. чл.-корр. РАН А.Ф. Дьякова. – М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорации «ЕЭЭК», 2012.
2. **Мартиросян А.А.** Повышение устойчивости электроэнергетических систем с применением регулируемой продольной компенсации: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02: защ. 28.06.09: утв. 10.09.09. – Иваново, 2009. – 146 с.
3. **Голов В.П.** Применение регулируемой компенсации линии электропередачи // Изв. вузов. Энергетика. – 1978. – № 6. – С. 3–8.
4. **Электрические** системы и сети: учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
5. **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.
6. **Свидетельство** об официальной регистрации программы для ЭВМ №2004611423. Расчет и анализ уста-

Голов Валерий Павлович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем,
e-mail: golov@ispu.ru

Мартиросян Акол Арамаисович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем,
e-mail: akopmartirosian@gmail.com

Москвин Илья Александрович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры электрических систем,
e-mail: moskvin_ilya@mail.ru

новившихся режимов электроэнергетических систем («Энергия УР») / Кулешов А.И., Ильичев Н.Б., Серов В.А.

7. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985.

8. **Справочник** по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.

References

1. D'yakova, A.F. *Ilektricheskie seti sverkh- i ul'travysokogo napryazheniya EES Rossii. Teoreticheskie i prakticheskie osnovy* [Electrical networks of super and ultra-high voltage of Russia. Theoretical and practical Bases]. Moscow, NTF «Energoprogress» Korporatsii «EEEK», 2012.
2. Martirosyan, A.A. *Povyshenie ustoychivosti elektroenergeticheskikh sistem s primeneniem reguliruemoy prodol'noy kompensatsii*. Diss. kand. tehn. nauk [Stability Growth of Power Engineering Systems with Controlled Device of Series Compensation. Thesis of Candidate of Engineering]. Ivanovo, 2009. 146 p.
3. Golov, V.P. *Izvestiya vuzov. Energetika*, 1978, no. 6, pp. 3–8.
4. *Ilektricheskie sistemy i seti: Uchebnik dlya vuzov* [Electric systems and networks: Guide book for universities]. Moscow, Energoatomizdat, 1989. 592 p.
5. Golov, V.P., Martirosyan, A.A., Moskvin, I.A., Vиноградова, A.A. *Vestnik IGEU*, 2012, no. 5, pp. 26–31.
6. Kuleshov, A.I., Il'ichev, N.B., Serov, V.A. *Svidetel'stvo ob ofitsial'noy registratsii programmy dlya EVM №2004611423. Raschet i analiz ustanovivshikhsya rezhimov elektroenergeticheskikh sistem («Energiya UR»)* [Certificate of Software Registration # 2004611423. Calculation and Analysis of Steady-state Modes of Electrical Engineering Systems].
7. Venikov, V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v ilektricheskikh sistemakh* [Transitional Electromechanical Processes in Electric Systems]. Moscow, Vysshaya shkola, 1985.
8. Fajbisovicha, D.L. *Spravochnik po proektirovaniyu ilektricheskikh setey* [Reference Book for Designing Electric Networks]. Moscow, ENAS, 2012. 376 p.