

УДК 621.311

Колебательная статическая устойчивость электроэнергетической системы с межсистемной связью, содержащей регулируемое устройство продольной компенсации

И.А. Москвин

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: moskvin_ilya@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Существующий закон регулирования емкостного сопротивления в устройстве продольной компенсации может приводить к колебательному нарушению устойчивости, которое проявляется в виде самовозбуждения, самораскачивания, а также их совместного проявления. Исходя из этого целесообразно исследовать колебательную статическую устойчивость электроэнергетической системы с межсистемной связью, содержащей регулируемое устройство продольной компенсации.

Материалы и методы: Анализ колебательной статической устойчивости проведен с использованием полной математической модели исследуемой системы посредством вычислительного эксперимента.

Результаты: Проведены исследования колебательной статической устойчивости электроэнергетической системы с межсистемной связью, содержащей регулируемое устройство продольной компенсации. Определены границы устойчивости в зависимости от степени компенсации и параметров закона регулирования устройства продольной компенсации.

Выводы: Полученные результаты могут быть использованы при решении задач проектирования дальних линий электропередачи с управляемыми элементами, при расчетах статической устойчивости электроэнергетических систем с гибкими линиями электропередачи, создании систем регулирования управляемых устройств продольной емкостной компенсации и устранения колебательного нарушения устойчивости электрических систем, содержащих такие элементы.

Ключевые слова: регулируемые устройства продольной компенсации, колебательная статическая устойчивость, автоматический регулятор возбуждения.

Oscillatory steady state stability of an electrical power system with an interconnection containing controlled series capacitors

I.A. Moskvina

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: moskvin_ilya@mail.ru

Abstract

Background: The existing capacitive resistance regulation rule of controlled series capacitors can lead to oscillatory instability in the form of self-excitation or cumulative hunting, or both simultaneously. Hence, it is reasonable to study the oscillatory steady state stability of an electrical power system with an interconnection containing controlled series capacitors.

Materials and methods: The oscillatory steady state stability was studied based on a complete mathematical model of the system by means of computing experiment.

Results: The oscillatory steady state stability of an electrical power system with an interconnection containing controlled series capacitors was investigated. Based on the study results, the stability boundaries were determined according to the compensation factor and the regulation rule parameters of controlled series capacitors.

Conclusions: The results obtained can be used to solve the problems of designing long-distance power lines with controlled elements, to calculate the steady-state stability of electrical power systems with flexible power lines, to develop regulatory systems for controlled series capacitors and to eliminate the oscillatory instability of electrical power systems containing such elements.

Key words: controlled series capacitors, oscillatory steady state stability, automatic field regulator.

Современный этап развития электроэнергетики требует повышения пропускной способности и управляемости линий электропередачи. Одним из способов реализации данных требований является применение так называемых активно-адаптивных сетей или гибких линий, которые в зарубежной практике носят название FACTS. Построение таких сетей может осуществляться с применением

различных управляемых элементов, в том числе и устройств продольной емкостной компенсации (УПК) [1]. Ранее [2] было показано преимущество управляемых УПК, которое заключается в возможности увеличения пропускной способности (до 40 %), по сравнению с нерегулируемыми, при положительном влиянии на статическую апериодическую и динамическую устойчивость при изменении перетоков

мощности в широком диапазоне. Регулирование осуществляется путем изменения емкостного сопротивления в зависимости от тока линии (передаваемой по линии мощности) и выражается следующим соотношением [3]:

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

где $X_{\text{УПК}}$ – сопротивление регулируемого УПК; I – ток линии; K_1, K_2 – коэффициенты регулирования УПК.

Анализ устойчивости электроэнергетической системы (ЭЭС), состоящей из двух электрических станций, соединенных линией электропередачи с регулируемым УПК, также показал значительное увеличение предела передаваемой мощности электропередачи, улучшение динамической и апериодической статической устойчивости системы при выбранных соответствующим образом характеристиках регулируемого УПК.

Однако подобный закон регулирования может приводить к колебательному нарушению устойчивости, которое проявляется в виде самовозбуждения, самораскачивания, а также совместного их появления. Исходя из этого, целесообразно проанализировать колебательную статическую устойчивость ЭЭС, состоящей из двух электрических станций, с регулируемым в функции тока УПК (рис. 1).

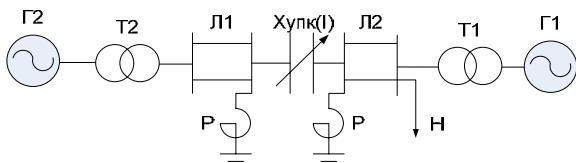


Рис. 1. Исследуемая электроэнергетическая система

Очевидно, что автоматический регулятор возбуждения генератора сильного действия (АРВ) способен в некоторой степени устранить отрицательное влияние продольной компенсации на колебательную статическую устойчивость. Таким образом, полная математическая модель ЭЭС была дополнена уравнениями, моделирующими АРВ сильного действия, для каждого из генераторов. Регулирование осуществляется по отклонению напряжения на шинах генератора, первой и второй производным угла ротора генератора для каждой из машин. Эффективность рассматриваемой регулируемой УПК иллюстрируется угловыми характеристиками системы при различных законах регулирования УПК [5]. На рис. 2 представлены угловые характеристики этой же системы с учетом АРВ генераторов. Очевидно, что АРВ значительно увеличивает запас статической устойчивости системы. В то же время совместное регулирование УПК и АРВ приводит к уменьшению этого запаса, что можно наблюдать по снижению максимума угловой характеристики и соответствующего угла с ростом степени компенсации (рис. 3). Это явление

можно объяснить, обратившись к зависимостям ЭДС и напряжений на шинах генераторов в переходных режимах (рис. 4, 5). Анализ зависимостей показывает, что для поддержания напряжения на выводах генераторов при использовании регулируемого УПК требуется меньшее значение ЭДС, чем при использовании АРВ генераторов без регулируемого УПК на линии электропередачи. Это связано с тем, что регулируемое УПК является в то же время регулируемым источником реактивной мощности. Соответственно, генераторы разгружаются по реактивной мощности, что ведет к уменьшению ЭДС, требуемой для передачи этой мощности. Уменьшение ЭДС в свою очередь ведет к снижению максимумов угловых характеристик. Таким образом, регулируемое УПК в некоторой степени уменьшает эффект от применения АРВ, сохраняя при этом все рассмотренные выше положительные эффекты.

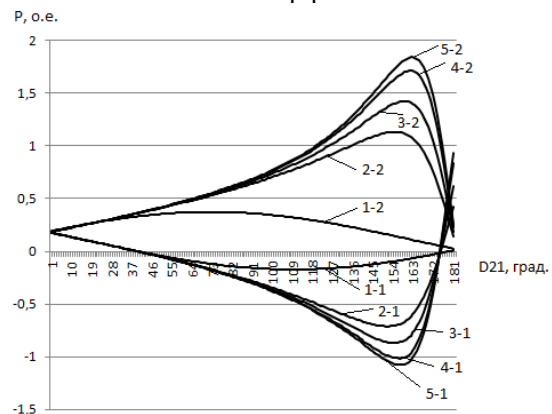


Рис. 2. Угловые характеристики двухмашинной системы с учетом АРВ: 1-1 – $k_{\text{авр}} = 0$; 2-1 – $k_{\text{авр}} = 10$; 3-1 – $k_{\text{авр}} = 20$; 4-1 – $k_{\text{авр}} = 50$; 5-1 – $k_{\text{авр}} = 100$ (2 – для второго генератора)

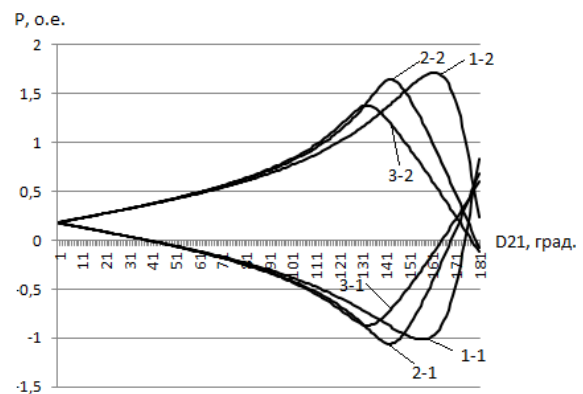


Рис. 3. Угловые характеристики двухмашинной системы с учетом АРВ и регулируемого УПК: 1-1 – $K_2 = 0$; 2-1 – $K_2 = 1,5$; 3-1 – $K_2 = 2$ (2 – для второго генератора)

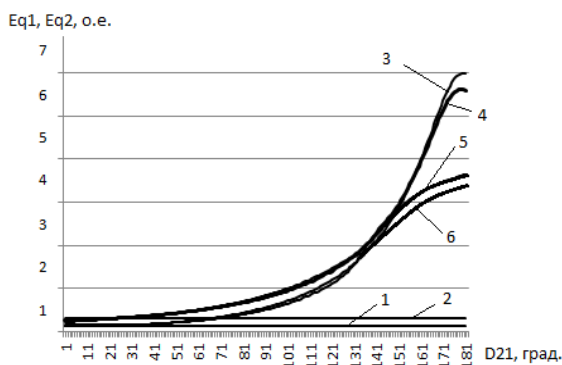


Рис. 4. Кривые изменения ЭДС: 1, 2 – ЭДС 1 и 2 генератора соответственно без АРВ; 3, 4 – то же с АРВ; 5, 6 – то же при совместном регулировании АРВ и УПК

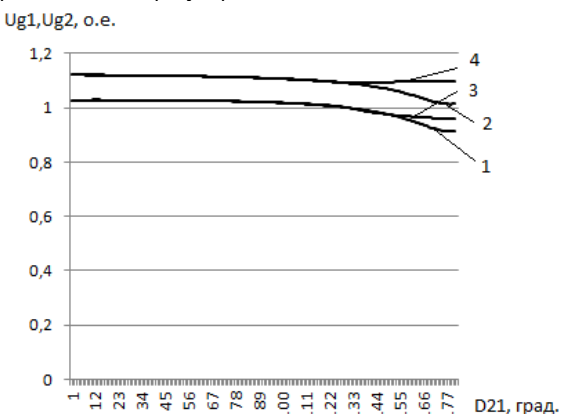


Рис. 5. Напряжения на выводах генераторов 1 и 2: 1, 2 – с АРВ; 3, 4 – при совместном регулировании АРВ и УПК

Аналогичным образом совместное регулирование УПК и АРВ сказывается на изменении значения свободного члена характеристического уравнения, по смене знака которого можно судить об апериодической статической устойчивости любой сложной ЭЭС:

$$a_0 \cdot p^n + a_1 \cdot p^{n-1} + \dots + a_n = 0.$$

Критерием апериодической статической устойчивости рассматриваемой системы является положительность свободного члена ($a_n > 0$), предельный по апериодической статической устойчивости режим соответствует условию $a_n = 0$. С увеличением коэффициента K_2 характеристики $X_{УПК}(l)$ смена знака свободного члена характеристического уравнения происходит при больших значениях взаимного угла δ_{21} (рис. 6), что говорит о положительном влиянии регулируемого УПК на апериодическую статическую устойчивость системы (рис. 6, кривые 1, 2). В то же время при наличии АРВ генераторов увеличение K_2 ведет к уменьшению взаимного угла, при котором происходит смена знака a_n (рис. 6, кривые 3, 4), однако данное явление имеет место при взаимных углах δ_{21} , значительно превышающих углы нормальных режимов ЭЭС. Частные производные режимных параметров ЭЭС определялись численным расчетом с помощью отношений соответствующих приращений по полной математической модели [6].

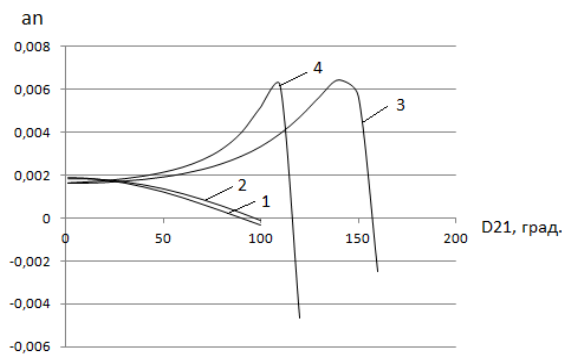


Рис. 6. Кривые изменения значений свободного члена a_n характеристического уравнения рассматриваемой системы для различных законов регулирования $X_{УПК}(l)$: 1, 2 – $K_2 = 0$ и $K_2 = 4$ соответственно; 3, 4 – то же с учетом АРВ

Кроме того, установлено положительное влияние регулируемого УПК на переходные режимы ЭЭС при больших возмущающих воздействиях, которые выражались в «сбросе-набросе» выдаваемой мощности генераторов. Вследствие применения регулируемого УПК, колебания взаимного угла затухали раньше, имели меньшую амплитуду, переход к новому установившемуся режиму наблюдался при меньшем значении угла, происходил быстрее [5]. На рис. 7 показано изменение взаимного угла между векторами ЭДС двухмашинной системы при введении в систему АРВ генераторов. Из расчетов следует, что применение АРВ сильного действия (рис. 7, кривая 2) позволяет практически без колебаний перейти к новому установившемуся режиму при поддержании неизменными напряжений на шинах генераторов ЭЭС. В то же самое время совместное регулирование АРВ и УПК еще более усиливает положительное влияние рассматриваемого регулирования на качество переходного процесса (рис. 7, кривая 3).

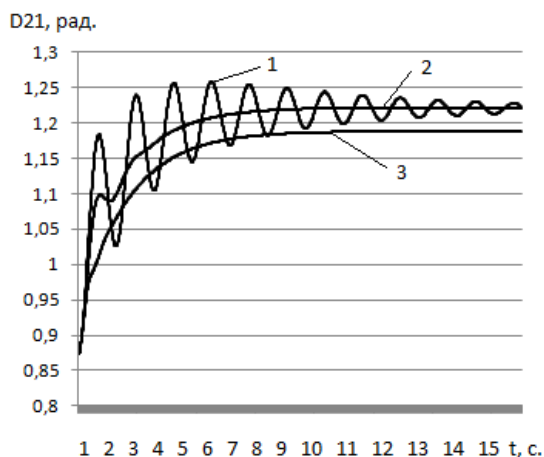


Рис. 7. Взаимный угол между векторами ЭДС генераторов в двухмашинной ЭЭС при большом возмущении: 1 – с АРВ пропорционального действия; 2 – с АРВ сильного действия; 3 – при совместном регулировании АРВ сильного действия и УПК

Как известно, обеспечение статической устойчивости осуществляется путем выбора

настроечных параметров соответствующих систем автоматического регулирования и управления элементов ЭЭС. Применение устройства продольной емкостной компенсации с регулируемой степенью компенсации в функции тока линии значительно расширяет круг задач, связанных с определением оптимальных настроек систем регулирования и обеспечения устойчивости ЭЭС.

Рассмотрим анализ колебательной статической устойчивости исследуемой электроэнергетической системы при различной степени компенсации и различных параметрах закона регулирования УПК в целях обеспечения максимальной эффективности применения данного устройства с точки зрения улучшения устойчивости ЭЭС. Анализ колебательной статической устойчивости проведен с использованием полной математической модели исследуемой системы [5] посредством вычислительного эксперимента. В ходе исследования увеличивалась степень компенсации и изме-

нялся закон регулирования емкости в УПК посредством изменения коэффициента K_2 уравнения (1). При приближении к границе нарушения колебательной устойчивости в системе наблюдались процессы, изображенные на рис. 8. Эта разновидность неустойчивости режима проявляется в виде самовозбуждения и самораскачивания, которые могут происходить совместно при увеличении степени продольной емкостной компенсации [4]. АРВ сильно действует генераторов позволяет устранить колебания режимных параметров и значительно увеличить степень компенсации индуктивного сопротивления линии электропередачи без нарушения колебательной устойчивости. На рис. 9 приведены те же кривые, что и на рис. 8, с той же степенью компенсации и с тем же законом регулирования УПК, но с применением АРВ СД. На основании результатов исследования были определены границы устойчивости в зависимости от степени компенсации и параметров закона регулирования УПК (рис. 10).

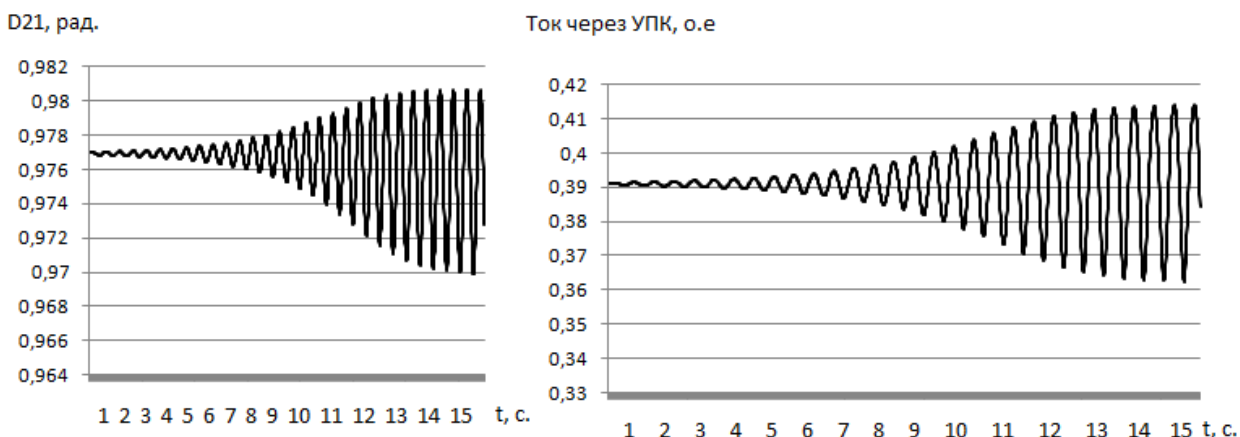


Рис. 8. Кривые изменения взаимного угла между векторами ЭДС генераторов и тока через УПК по времени (степень компенсации 95 %, $K_2 = 4$)

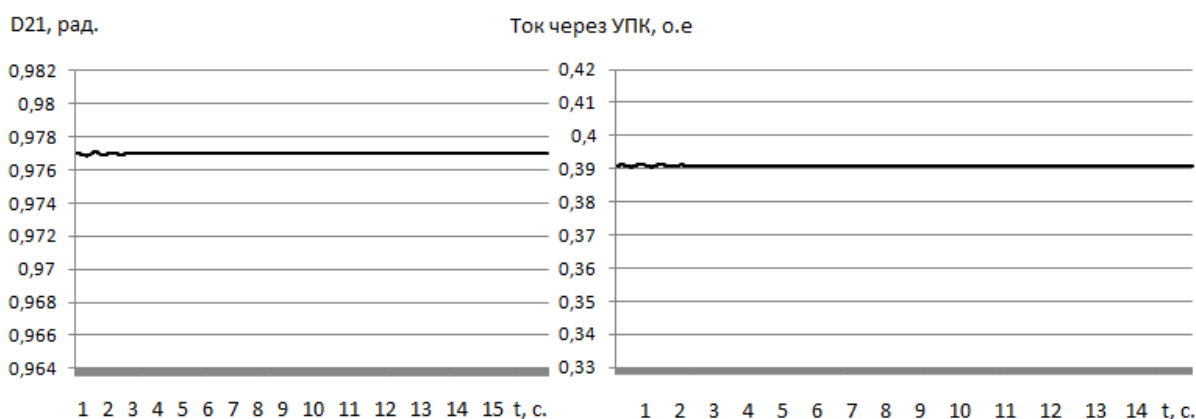


Рис. 9. Кривые изменения взаимного угла между векторами ЭДС генераторов и тока через УПК по времени с учетом АРВ СД (степень компенсации 95 %, $K_2 = 4$)

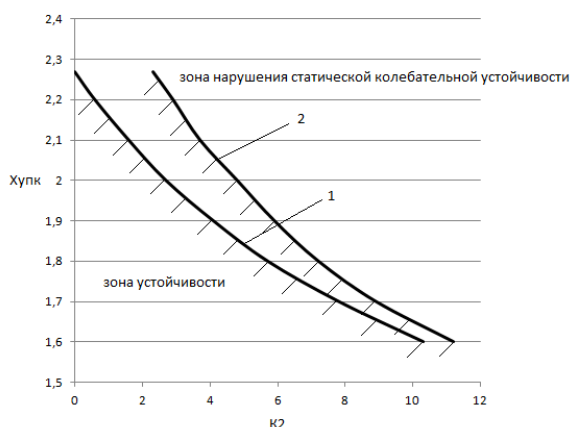


Рис. 10. Зависимость сопротивления $X_{УПК}$ от коэффициента K_2 : 1 – без АРВ СД; 2 – с АРВ СД

Согласно полученным результатам, при степени компенсации индуктивного сопротивления линии до 80 % ($X_{УПК} = 1,6$) с регулируемым УПК не наблюдается нарушения колебательной статической устойчивости во всем диапазоне возможных рабочих режимов, т.е. регулируемое УПК не приводит к появлению колебательной неустойчивости. Однако при значительных перетоках мощности емкостное сопротивление может принимать значение, близкое к границе зоны нарушения колебательной устойчивости. Имеет место противоречие в выборе параметров регулирования УПК с точки зрения улучшения апериодической статической и динамической устойчивости, с одной стороны, и устранения явлений самовозбуждения и самораскачивания, с другой. Анализ предельных режимов показал, что такое отрицательное влияние регулируемого УПК на колебательную статическую устойчивость наблюдается при высоких значениях степени компенсации. Такая степень компенсации не применяется в практике эксплуатации электрических систем. Как показали исследования, даже при таких высоких степенях компенсации при совместном выборе законов регулирования управляемого УПК и АРВ можно устранить отрицательное влияние регулируемого УПК на колебательную статическую устойчивость (рис. 10, кривая 2).

Заключение

Регулируемое УПК позволяет значительно увеличить пропускную способность линии электропередачи, оснащенной подобным устройством, способно поддерживать режимные параметры в допустимых пределах при малых перетоках мощности при положительном влиянии на статическую апериодическую и динамическую устойчивость системы.

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

При использовании регулируемого УПК не наблюдается колебательного нарушения устойчивости во всех возможных режимах и диапазонах регулирования со степенью компенсации, применяемой при эксплуатации ЭЭС.

При увеличении степени компенсации вплоть до границы колебательного нарушения устойчивости отрицательное влияние закона регулирования УПК может быть устранено с помощью АРВ СД генераторов.

Список литературы

1. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС 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. Веников В.А., Анисимова Н.Д., Долгинов А.И. Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1964.
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. – № 5. – С. 26–31.
6. Голов В.П., Мартиросян А.А., Москвин И.А. Расчет характеристик установившихся режимов электроэнергетической системы с регулируемым устройством продольной компенсации // Вестник ИГЭУ. – 2012. – № 6. – С. 18–22.

References

1. D'yakov, A.F. *Elektricheskie seti sverkh- i ultravysokogogo napryazheniya EES Rossii. Teoreticheskie i prakticheskie osnovy* [Unified power system electric networks of super and ultrahigh voltage of Russia. Theoretical and practical bases]. Moscow, NTF «EnergoProgress» Korporatsii «EЭEK», 2012.
2. Martirosyan, A.A. *Povyshenie ustoychivosti elektroenergeticheskikh sistem s primeneniem reguliruemoy prodol'noy kompensatsii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increasing power system stability by applying controlled series compensation. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2009. 146 p.
3. Golov, V.P. *Primenenie reguliruemoy kompensatsii linii elektroperedachi* [Application of power line controlled compensation]. *Izvestiya vuzov. Energetika*, 1978, no. 6, pp. 3–8.
4. Venikov, V.A., Anisimova, N.D., Dolginov, A.I. *Samovozbuzhdenie i samoraskachivanie v elektricheskikh sistemakh* [Self-excitation and cumulative hunting in electric systems]. Moscow, Vysshaya shkola, 1964.
5. Golov, V.P., Martirosyan, A.A., Moskvina, I.A., Vinogradova, A.A. *Ustoychivost' elektroenergeticheskoy sistemy iz dvukh elektricheskikh stantsiy s reguliruemoy prodol'noy kompensatsiy* [Stability of electrical power engineering system consisting of two electrical power stations with controlled series compensation]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 5, pp. 26–31.
6. Golov, V.P., Martirosyan, A.A., Moskvina, I.A. *Raschet kharakteristik ustanovivshixsya rezhimov elektroenergeticheskoy sistemy s reguliruemym ustroystvom prodol'noy kompensatsii* [Characteristics calculation of steady-state modes of electrical power engineering system with a controlled device of series compensation]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 6, pp. 18–22.