

УДК 621.311

## Области колебательной устойчивости изолированной системы из двух станций при вариации характеристики и мощности нагрузки

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

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Технология гибких электропередач переменного тока была разработана в связи с проблемами, возникающими при продольной компенсации индуктивного сопротивления линий электропередачи свыше 50 %. Борьбе с возникающим при этом нарушением статической устойчивости посвящено большое количество работ таких ученых, как В.А. Веников, В.А. Строев, Ю.Г. Шакарян, В.К. Фокин, Г.К. Зарудский и др. Большинство исследований проводятся на примере простейшей электроэнергетической системы, содержащей шины бесконечной мощности. В связи с этим целесообразно проанализировать колебательную статическую устойчивость электроэнергетической системы из двух станций соизмеримой мощности с межсистемной связью, содержащей регулируемое устройство продольной компенсации, при изменении характеристики и мощности нагрузки.

**Материалы и методы:** Использованы метод первого приближения А.М. Ляпунова и метод D-разбиения по одному параметру.

**Результаты:** Дан анализ влияния характеристики и мощности нагрузки на тип и форму областей колебательной устойчивости. Найдены диапазоны допустимого изменения параметра регулирования устройства продольной компенсации по условию сохранения колебательной устойчивости при различных характеристиках и мощностях нагрузки. Показано, что тип области устойчивости не влияет на диапазон допустимого изменения параметра регулирования устройства продольной компенсации.

**Выводы:** Установлено, что выбор коэффициента регулирования устройства продольной компенсации необходимо производить при максимальной передаваемой мощности по ЛЭП.

**Ключевые слова:** дальние электропередачи, колебательная статическая устойчивость, регулируемые устройства продольной компенсации, области устойчивости, электроэнергетическая система, закон регулирования.

## Oscillatory stability regions in an isolated two-station system under load capacity and power factor variations

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

### Abstract

**Background:** The flexible alternating current transmission system (FACTS) technology was developed in response to the problems arising when the series compensation factor is above 50%. Many investigations such as those by V.A. Venikov, V.A. Stroevev, Ju.G. Shakaryan, V.K. Fokin, G.K. Zarudsky were devoted to the problem of steady-state stability loss caused by these conditions. Most of the investigations deal with a simple electrical power system with an infinite bus. Hence, it is reasonable to study the oscillatory steady-state stability of an electrical power system containing two stations of comparable power capacity with an interconnection consisting of controlled series capacitors under load capacity and power factor variations.

**Materials and methods:** A.M. Lyapunov's first approximation method and one parameter D-decomposition method were used.

**Results:** The influence of load capacity and power factor on the type and shape of oscillatory stability regions has been analysed. The study has determined the range of permissible variation of controlled series capacitor regulation factor enabling oscillatory stability retention at various load capacity and power factor values. It is shown that the type of stability region has no effect on regulation factor permissible variation range.

**Conclusions:** The choice of series compensation control factor must be carried out at the maximum transmission power of transmission lines.

**Key words:** long-distance power transmission, oscillatory steady-state stability, controlled series capacitors, stability regions, electrical power system, law of control.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.6.029-034

В мировой практике имеет место тенденция к расширению производства электроэнергии в местах сосредоточения дешевых энергоресурсов.

В большинстве случаев данные генерирующие мощности находятся за сотни и тысячи километров от больших центров потребления. Та-

ким образом, встает проблема надежной передачи электроэнергии на сверхдальние расстояния. Данная проблема особо актуальна для энергосистемы России, поскольку она является наиболее крупной в мире. Надежная работа дальних линий сверхвысокого напряжения невозможна без исследования их работы как в установившихся режимах, так и в переходных. Одной из главных задач является исследование статической устойчивости электроэнергетических систем, содержащих управляемые устройства продольной компенсации, принимая во внимание последние аварийные ситуации в энергосистеме России, которые были связаны с нарушением статической устойчивости [1, 2, 3].

Исследование устойчивости производилось для изолированной системы из двух электрических станций, работающих на общую нагрузку (рис. 1). Генерирующие станции номинальной мощностью 2400 МВт каждая соединены между собой двухцепной линией электропередачи 500 кВ длиной 1000 км с установленным посередине регулируемым устройством продольной компенсации. На рис. 2 представлена схема замещения исследуемой системы [4].

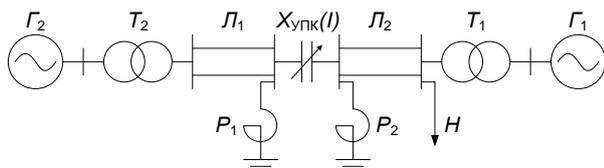


Рис. 1. Исследуемая двухмашинная электроэнергетическая система

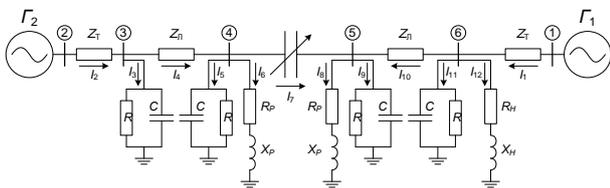


Рис. 2. Схема замещения исследуемой электроэнергетической системы

Регулирование осуществляется путем изменения емкостного сопротивления в зависимости от тока линии (передаваемой по линии мощности) [5]:

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

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

Подобного рода регулирование может приводить к колебательному нарушению устойчивости [6].

Для исследования колебательной устойчивости системы была сформирована упрощенная математическая модель, которая описывает электромеханический переходный процесс в исследуемой системе, а также электромагнитные

переходные процессы в обмотках возбуждения генераторов:

$$\begin{cases} T_{J1} p^2 \delta_1 - D_1 p \delta_{21} = P_{T1} - P'_{\text{Э}1}, \\ T_{J2} p^2 \delta_2 + D_2 p \delta_{21} = P_{T2} - P'_{\text{Э}2}, \\ T_{d01} p E'_{q1} + E_{q1} = E_{qe1}, \\ T_{d02} p E'_{q2} + E_{q2} = E_{qe2}, \\ I = f(\delta_{21}, X_{\text{упк}}, E_{q1}, E_{q2}), \\ X_{\text{упк}} = f(I). \end{cases} \quad (2)$$

После линеаризации и составления характеристического определителя получено характеристическое уравнение четвертого порядка. Коэффициент регулирования УПК  $K_2$  входит непосредственно в характеристическое уравнение. С использованием метода D-разбиения по одному параметру (в данном случае – коэффициент  $K_2$  регулирования УПК) построены области устойчивости [5]. Необходимо отметить, что для построения границы D-разбиения коэффициент  $K_2$  представлен в следующем виде:

$$K_2 = K_2(\omega) + jb(\omega). \quad (3)$$

Полином  $jb(\omega)$ , входящий в уравнение (3) и влияющий на форму границы D-разбиения, зависит от конфигурации электроэнергетической системы, а также от характеристик исходного установившегося режима (передаваемая мощность и соотношение активной и реактивной составляющих нагрузки).

Рассмотрим работу системы при следующих условиях: степень компенсации индуктивного сопротивления линии 80 %, на генераторах присутствует идеальное АРВ-СД (напряжение на выводах поддерживается равным  $1,05 \cdot U_n$ ), полная мощность нагрузки 6000 МВ·А, коэффициент мощности нагрузки 0,6. В исходном режиме взаимный угол между векторами ЭДС эквивалентных генераторов составляет  $50^\circ$ , что обеспечивает передачу мощности по линии от генератора 2 к нагрузке (рис. 1). Область устойчивости при таких условиях будет иметь тип, представленный на рис. 3 кривой 1 (будет иметь место область с внешней штриховкой).

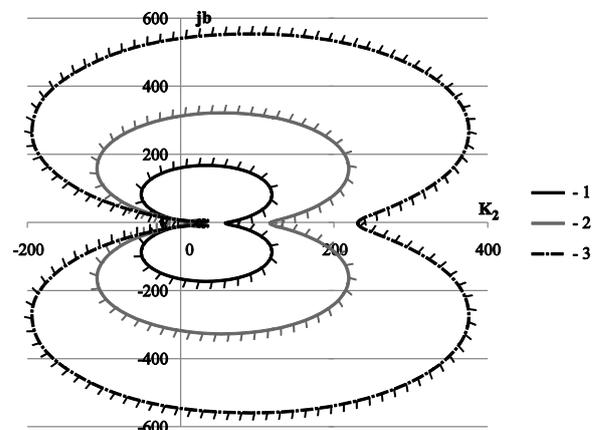


Рис. 3. Области устойчивости с внешней штриховкой: 1 –  $|S_{\text{нагр}}| = 6000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ; 2 –  $|S_{\text{нагр}}| = 4000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ; 3 –  $|S_{\text{нагр}}| = 3000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$

При планомерном снижении мощности нагрузки форма области устойчивости будет несколько изменяться, но тип ее до определенного момента останется неизменным (рис. 3, область с внешней штриховкой). При определенном значении полной мощности нагрузки изменится тип области устойчивости – область с внешней штриховкой сменится областью с внутренней штриховкой (рис. 4). Дальнейшее снижение мощности не приведет к изменению типа области устойчивости.

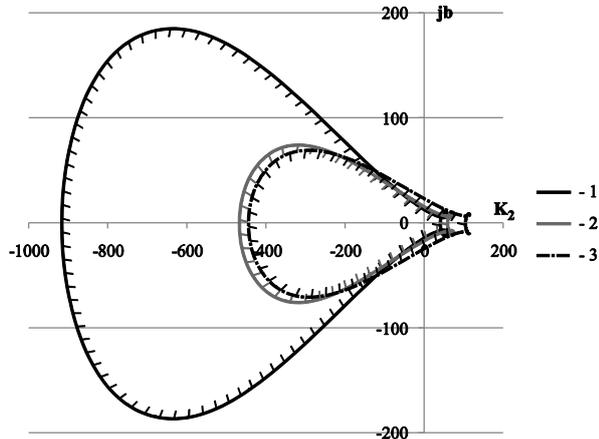


Рис. 4. Области устойчивости с внутренней штриховкой: 1 –  $|S_{нагр}| = 1500 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ; 2 –  $|S_{нагр}| = 1000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ; 3 –  $|S_{нагр}| = 400 \text{ МВ}\cdot\text{А}$

Таким образом, при некотором значении полной мощности нагрузки имеется граница смены типа области устойчивости – область с внеш-

ней штриховкой сменяется областью с внутренней штриховкой. На рис. 5 представлены области устойчивости при приближении к границе смены типа области устойчивости.

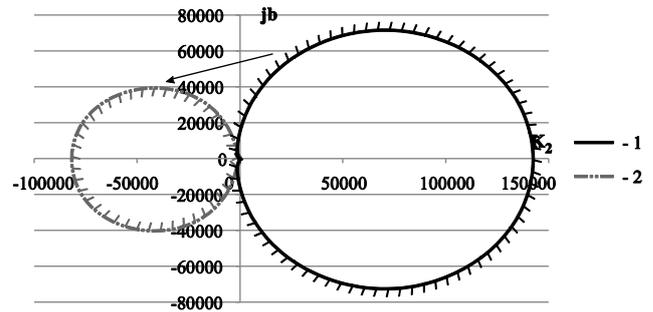


Рис. 5. Области устойчивости при приближении к границе смены типа области устойчивости: 1 –  $|S_{нагр}| = 1870 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ; 2 –  $|S_{нагр}| = 1865 \text{ МВ}\cdot\text{А}$

На рис. 6 объединены области устойчивости с внешней и внутренней штриховкой. Области устойчивости, находящиеся вблизи границы смены типа области устойчивости, представленные на рис. 5, не приведены, поскольку их невозможно наглядно представить вместе с остальными областями устойчивости ввиду различия в масштабе данных рисунков. Стрелками указано поведение области устойчивости при снижении мощности нагрузки.

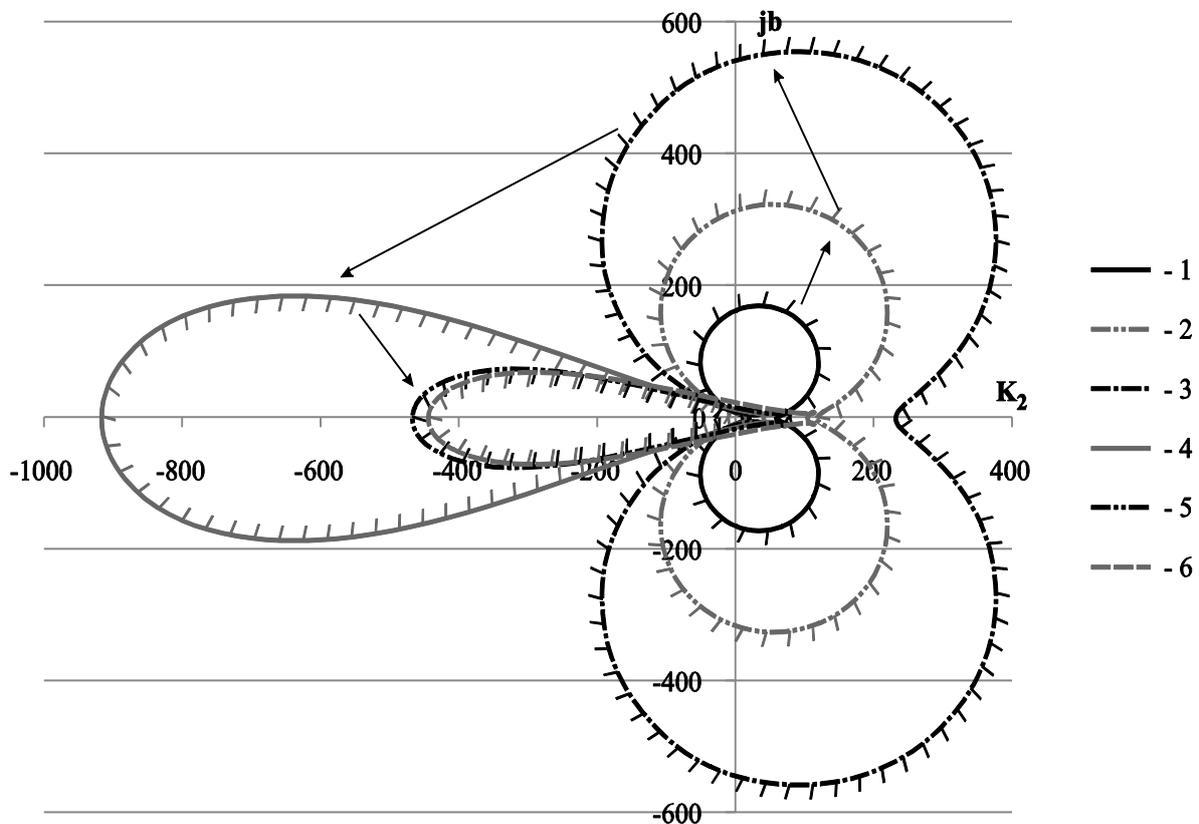


Рис. 6. Области устойчивости при вариации мощности нагрузки: 1 –  $|S_{нагр}| = 6000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ; 2 –  $|S_{нагр}| = 4000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ; 3 –  $|S_{нагр}| = 3000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ; 4 –  $|S_{нагр}| = 1500 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ; 5 –  $|S_{нагр}| = 1000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ; 6 –  $|S_{нагр}| = 400 \text{ МВ}\cdot\text{А}$

Рассмотрим интересующую часть областей устойчивости – положительные действительные значения, поскольку диапазон допустимого с точки зрения сохранения колебательной статической устойчивости изменения параметра регулирования УПК  $K_2$  принадлежит оси действительных чисел [7]. На рис. 7 рассмотрено планомерное сни-

жение полной мощности нагрузки с 6000 до 400 МВ·А при тех же условиях, что и в предыдущем случае: степень компенсации 80 %, на генераторах присутствует идеальное АРВ-СД (напряжение на выводах поддерживается равным  $1,05 \cdot U_n$ ), коэффициент мощности нагрузки 0,6.

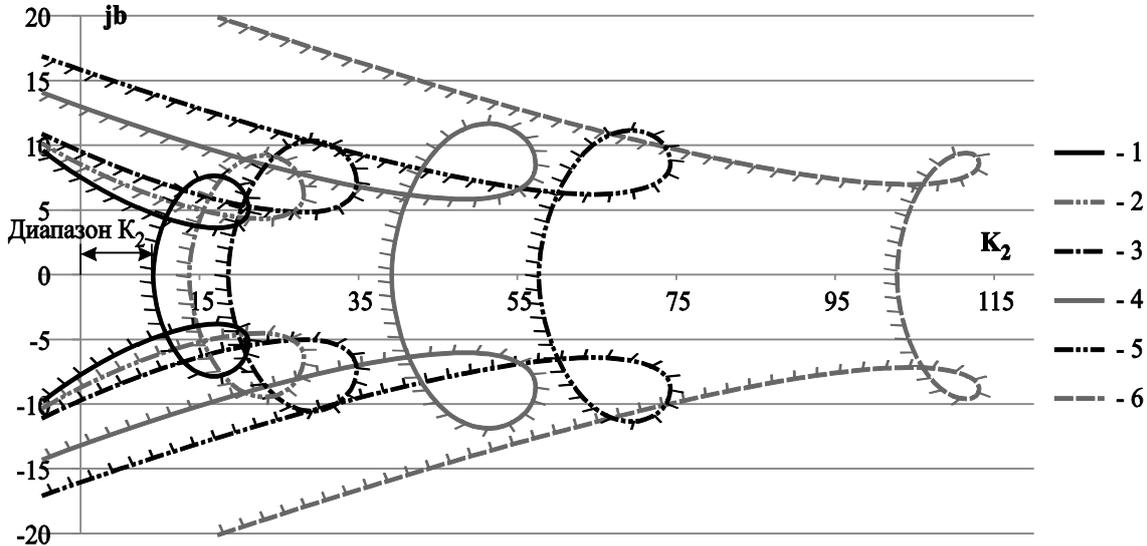


Рис. 7. Диапазоны изменения параметра регулирования  $K_2$  при снижении мощности нагрузки: 1 –  $|S_{нагр}| = 6000$  МВ·А; 2 –  $|S_{нагр}| = 4000$  МВ·А; 3 –  $|S_{нагр}| = 3000$  МВ·А; 4 –  $|S_{нагр}| = 1500$  МВ·А; 5 –  $|S_{нагр}| = 1000$  МВ·А; 6 –  $|S_{нагр}| = 400$  МВ·А

Для области устойчивости при мощности нагрузки, равной 6000 МВ·А (рис. 7, кривая 1), коэффициент  $K_2$  имеет диапазон от 0 до 8,971. Анализ полученных данных показывает, что при снижении полной мощности нагрузки диапазон допустимых значений  $K_2$  увеличивается и не зависит от типа области устойчивости – с внутренней или внешней штриховкой, на интересующем диапазоне форма области устойчивой работы не меняется.

и характеристики нагрузки и граница смены типа областей устойчивости при степени компенсации 80 %. Анализ зависимостей показывает, что диапазон допустимого изменения параметра  $K_2$  зависит как от мощности, так и от характеристики нагрузки. Граница смены типа области устойчивости также зависит от характеристики нагрузки (на рис. 8 стрелками указано перемещение границы смены типа области устойчивости при увеличении коэффициента мощности нагрузки).

На рис. 8 представлены зависимости допустимого изменения параметра  $K_2$  от мощности

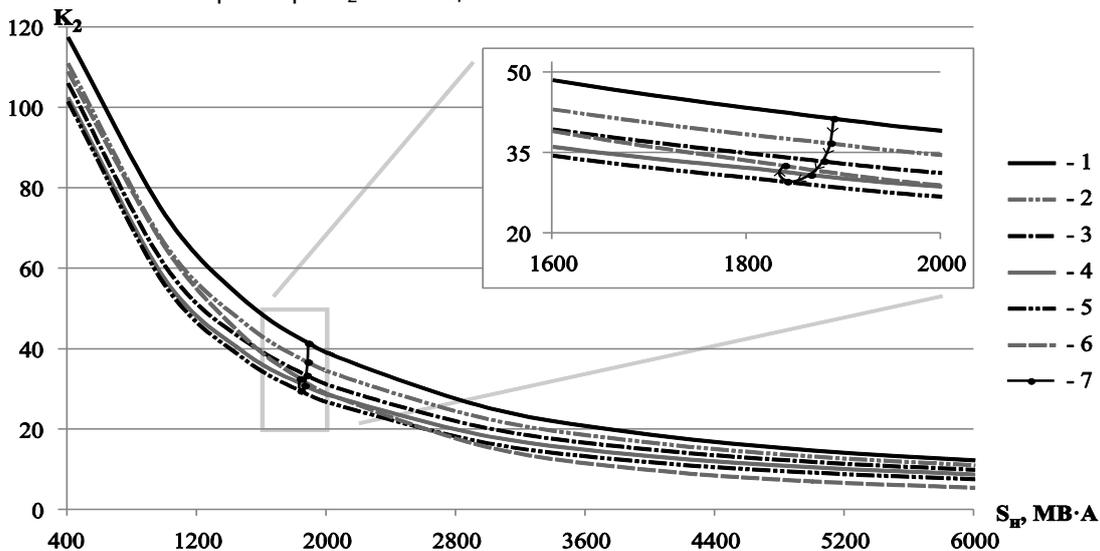


Рис. 8. Зависимости диапазона изменения коэффициента  $K_2$  от характеристики и мощности нагрузки и граница смены типа областей устойчивости при степени компенсации 80 %: 1 –  $\cos(\varphi_{нагр}) = 0$ ; 2 –  $\cos(\varphi_{нагр}) = 0,2$ ; 3 –  $\cos(\varphi_{нагр}) = 0,4$ ; 4 –  $\cos(\varphi_{нагр}) = 0,6$ ; 5 –  $\cos(\varphi_{нагр}) = 0,8$ ; 6 –  $\cos(\varphi_{нагр}) = 1$ ; 7 – граница смены типа области устойчивости

Анализ зависимостей рис. 8 также показывает, что при одном и том же значении коэффициента  $K_2$  можно передать больше полной мощности при увеличении реактивной составляющей нагрузки. Связано это с распределением реактивной мощности в данной изолированной системе. Дальняя линия электропередачи генерирует большое количество реактивной мощности, что приводит к повышению уровней напряжения во всей системе. Если нагрузка имеет большую реактивную составляющую, то большая часть сгенерированной линией мощности компенсируется нагрузкой. При активной нагрузке для поддержания напряжения на уровне  $1,05 \cdot U_n$  необходимо снижать токи возбуждения станций, что приводит к снижению ЭДС станций. Ток через УПК становится больше, чем в случае реактивной нагрузки, и, соответственно, для того чтобы степень компенсации (а по сути – сопротивление УПК) оставить прежней, необходимо снизить коэффициент  $K_2$ .

Однако стоит отметить, что в большинстве случаев диапазон изменения  $K_2$  редко превышает 8 [8]. Таким образом, даже при мощности нагрузки, сопоставимой с номинальной мощностью генерации станций, диапазон изменения  $K_2$  остается приемлемым.

На рис. 9, 10 представлены зависимости допустимого изменения параметра  $K_2$  от мощности и характеристики нагрузки при степенях компенсации 50 и 90 % соответственно, а также границы смены типа областей устойчивости. Анализ зависимостей рис. 9, 10 показывает, что диапазон допустимого изменения параметра  $K_2$  и граница смены типа области устойчивости также зависят и от степени компенсации индуктивного сопротивления ЛЭП.

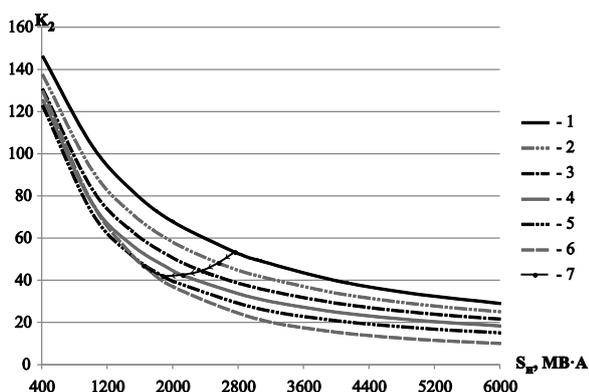


Рис. 9. Зависимости диапазона изменения коэффициента  $K_2$  от характеристики и мощности нагрузки и граница смены типа области устойчивости при степени компенсации 50 %: 1 –  $\cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0$ ; 2 –  $\cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0,2$ ; 3 –  $\cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0,4$ ; 4 –  $\cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0,6$ ; 5 –  $\cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0,8$ ; 6 –  $\cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 1$ ; 7 – граница смены типа области устойчивости

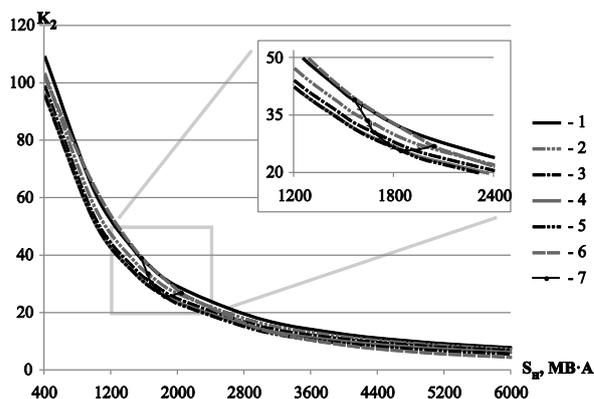


Рис. 10. Зависимости диапазона изменения коэффициента  $K_2$  от характеристики и мощности нагрузки и граница смены типа области устойчивости при степени компенсации 90 %: 1 –  $\cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0$ ; 2 –  $\cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0,2$ ; 3 –  $\cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0,4$ ; 4 –  $\cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0,6$ ; 5 –  $\cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0,8$ ; 6 –  $\cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 1$ ; 7 – граница смены типа области устойчивости

### Заключение

В исследуемой электроэнергетической системе возможны области устойчивости двух типов – с внутренней или внешней штриховкой.

Граница смены типа области устойчивости зависит от полной мощности нагрузки, ее характеристики и степени компенсации индуктивного сопротивления ЛЭП.

Тип области устойчивости никак не влияет на диапазон допустимого изменения коэффициента  $K_2$ , принадлежащего оси положительных действительных чисел, соответствующий сохранению колебательной устойчивости.

Диапазон допустимого с точки зрения сохранения колебательной устойчивости изменения коэффициента  $K_2$  зависит от полной мощности нагрузки, ее характеристики и степени компенсации индуктивного сопротивления ЛЭП.

Выявлено, что выбор коэффициента регулирования  $K_2$  необходимо производить при максимально возможной передаваемой мощности по ЛЭП, поскольку при снижении мощности диапазон допустимого значения коэффициента регулирования будет только увеличиваться и запас колебательной устойчивости также будет расти.

### Список литературы

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. – М.: ГУ ИЭС Минэнерго России, 2009. – 544 с.
2. Карташев И.И., Строев В.А., Шаров Ю.В. Научные исследования кафедры электроэнергетических систем // Вестник МЭИ. – 2014. – № 1. – С. 30–34.
3. Зарудский Г.К. О результатах исследований по применению продольной емкостной компенсации в электропередачах СВН // Электричество. – 2007. – № 9. – С. 48–51.
4. 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.
5. Голов В.П., Москвин И.А. Выбор характеристик регулируемого устройства продольной компенсации по условию обеспечения колебательной статической устойчивости // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 5. – С. 21–26.

6. **Веников В.А., Анисимова Н.Д., Долгинов А.И.** Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1964.

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

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.

#### References

1. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda* [Energy strategy of Russia until 2030]. Moscow, Energy Strategy Institute of Ministry of Energy of the Russian Federation, 2009. 544 p.

2. Kartashev, I.I., Stroeve, V.A., Sharov, Yu.V. Nauchnye issledovaniya kafedry elektroenergeticheskikh sistem [Electrical engineering department's scientific research]. *Vestnik MEI*, 2014, no. 1, pp. 30–34.

3. Zarudskiy, G.K. O rezul'tatakh issledovaniy po primeneniyu prodol'noy emkostnoy kompensatsii v elektroperedachakh SVN [Results of investigating series capacitors application in power networks of extra-high voltage]. *Elektrichestvo*, 2007, no. 9, pp. 48–51.

4. Fokin, V.K. Povyshenie vydachi moshchnosti Sayano-Shushenskoy GES s pomoshch'yu emkostnoy kompensatsii na

linii SSh GES – «Novokuznetskaya», «Kuzbasskaya» [Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station power output increase by means of capacitor-compensated transmission line «Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station – Novokuznetskaya, Kuzbasskaya»]. *Energiya edinoy seti*, 2013, no. 2(7), pp. 66–73.

5. Golov, V.P., Moskvin, I.A. Vybor kharakteristik reguliruemogo ustroystva prodol'noy kompensatsii po usloviyu obespecheniya kolebatel'noy staticheskoy ustoychivosti [Selection of controlled series capacitor characteristics ensuring oscillatory steady state stability]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 5, pp. 21–26.

6. 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.

7. *Elektricheskie sistemy. T. 1. Matematicheskie zadachi elektroenergetiki* [Electrical systems, vol. 1. Mathematical problems of electrical power industry]. Moscow, Vysshaya shkola, 1970. 336 p.

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

*Голов Валерий Павлович,*

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

*Кормилицын Дмитрий Николаевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры электрических систем,  
e-mail: dimak91dimak91@gmail.com

*Мартиросян Акоп Арамаисович,*

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

*Москвин Илья Александрович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электрических систем,  
e-mail: moskvin@es.ispu.ru