

УДК 621.311

**Валерий Павлович Голов**

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

**Дмитрий Николаевич Кормилицын**

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

**Ольга Сергеевна Суханова**

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

## **Сравнение характеристик линий высокого и сверхвысокого напряжений при выборе параметров управляемого устройства продольной компенсации**

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Применение устройств продольной компенсации приводит к увеличению пропускной способности линии электропередачи. Однако это повышает и опасность возникновения колебательного нарушения устойчивости электроэнергетической системы. Самораскачивание и самовозбуждение системы наблюдается в системах с регулируемым устройством продольной компенсации с высокой степенью емкостной компенсации. Известно, что автоматическое регулирование возбуждения генераторов частично устраняет отрицательное действие продольной емкостной компенсации на колебательную статическую устойчивость. Следовательно, при выборе настроечных параметров регулируемых устройств необходимо учитывать их совместное влияние на режимы системы. Разработанные методики исследования статической устойчивости позволяют анализировать режимы энергосистем с управляемой электропередачей различных классов напряжения. Таким образом, целесообразно провести сравнительный анализ влияния регулируемых параметров устройства продольной компенсации на статическую устойчивость систем различных классов напряжений с учетом автоматических регуляторов возбуждения на синхронных генераторах электростанции.

**Материалы и методы.** Исследования проведены с использованием методов математического моделирования электроэнергетической системы, теории дальних линий электропередачи и электромеханических переходных процессов, а также методов анализа устойчивости электроэнергетических систем. В качестве инструмента моделирования применено оригинальное программное обеспечение на языке программирования C++.

**Результаты.** Произведен выбор параметров законов регулирования управляемого устройства продольной компенсации и автоматического регулятора возбуждения при условии сохранения статической устойчивости. Построены области устойчивости исследуемой электроэнергетической системы в зависимости от настроечных параметров рассматриваемых устройств для различных классов напряжения. Проведен сравнительный анализ характеристик режимов линий высокого и сверхвысокого напряжений. Определены значения коэффициентов регулирования устройства продольной компенсации и автоматического регулятора возбуждения генераторов, при которых не происходит нарушение статической колебательной устойчивости для различных видов областей устойчивости.

**Выводы.** Проведенный сравнительный анализ характеристик линий высокого и сверхвысокого напряжений свидетельствует о необходимости учета класса напряжения электропередачи при комплексном выборе настроечных параметров управляемого устройства продольной компенсации и автоматического регулятора возбуждения генераторов.

**Ключевые слова:** статическая колебательная устойчивость, линии электропередачи высокого напряжения, линии электропередачи сверхвысокого напряжения, управляемое устройство продольной компенсации, автоматическое регулирование возбуждения

**Valery Pavlovich Golov**

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

**Dmitriy Nikolayevich Kormilitsyn**

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

**Olga Sergeevna Sukhanova**

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

## Comparison of characteristics of lines of high and extra-high voltage when selecting the parameters of controlled device of series compensation

### Abstract

**Background.** The use of series compensation devices leads to an increase of the transmission line capacity. However, it also increases the risk of an oscillatory violation of the stability of the electric power system. Cumulative hunting and self-excitation of the system is observed in the systems with controlled series compensation devices with a high degree of capacitive compensation. It is known that automatic excitation control of generators partially eliminates the negative effect of series capacitive compensation on oscillatory stability. Therefore, when choosing the tuning parameters of controlled devices, it is necessary to consider their combined effect on the system modes. The developed methods to study steady-state stability make it possible to analyze the modes of power systems with controlled power transmission of various voltage levels. Thus, it is advisable to conduct a comparative analysis of the influence of the adjustable parameters of the series compensation device on the steady-state stability of systems of various voltage levels, considering synchronous generators automatic excitation control.

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

**Results.** The choice of controlled series compensation device and the automatic excitation control regulation laws parameters is made, provided that steady-state stability is maintained. The stability regions of the studied electric power-engineering system are constructed depending on the tuning parameters of the considered devices of various voltage levels. A comparative analysis of the characteristics of the modes of high and extra-high voltage lines has been carried out. The regulation coefficients values of controlled series compensation device and automatic excitation of generators have been determined, under which there is no violation of oscillatory stability for different voltage levels.

**Conclusions.** The conducted comparative analysis of the characteristics of high and extra-high voltage power lines demonstrates the need to consider the power transmission rated voltage when comprehensively selecting the tuning parameters of the controlled series compensation device and the automatic excitation control regulator.

**Key words:** oscillatory stability, high voltage power lines, extra-high voltage power lines, controlled series compensation device, automatic excitation control

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2024.3.039-045

**Состояние вопроса.** Управляемые устройства продольной компенсации (УУПК) признаны в мировом научном сообществе одним из методов увеличения пропускной способности существующих линий электропередачи [1].

Максимальная мощность, передаваемая по идеализированной линии, определяется по известной формуле:

$$P_{\max} = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta, \quad (1)$$

где  $U_1$ ,  $U_2$  – напряжение в начале и в конце линии соответственно;  $X$  – реактивное сопротивление линии;  $\sin \delta$  – угол между векторами напряжений  $U_1$  и  $U_2$  [2].

УУПК позволяет плавно регулировать емкостное сопротивление в широком диапазоне, тем самым увеличивая нагрузочную способность электропередачи.

Кроме того, регулируемое УПК влияет на статическую устойчивость электроэнергетической системы (ЭЭС). Неправильный выбор коэффициентов регулирования УУПК

может привести к нарушению колебательной статической устойчивости. Самораскачивание и самовозбуждение системы являются примерами нарушений такого рода [3]. На выбор настроечных параметров УУПК также влияет наличие в системе других управляемых устройств, в том числе автоматических регуляторов возбуждения на генераторах электростанций. Следовательно, при совместном регулировании необходимо учитывать комплексное влияние на параметры ЭЭС.

Разработанные методики для исследования статической устойчивости позволяют анализировать энергосистемы с управляемой электропередачей различных классов напряжения. Следовательно, интерес представляет сравнительный анализ влияния регулируемых параметров устройства продольной компенсации на статическую устойчивость систем различных классов напряжений с учетом автоматических регуляторов возбуждения на синхронных генераторах электростанции.

**Материалы и методы. Модель рас-  
сматриваемой электроэнергетической  
системы.** Исследование производилось для двух простейших электроэнергетических систем высокого и сверхвысокого напряжений, содержащих управляемую линию электропередачи. Исследуемые электроэнергетические системы 220 кВ и 500 кВ изображены на рис. 1, 2 соответственно. Структура представленных моделей идентична: генераторы электрической станции с автоматическим регулированием возбуждения (АРВ) соединены с системой двухцепной линии электропередачи с расщепленной фазой на три провода с установленным управляемым устройством продольной компенсации (УУПК) в середине линии. На выводах УУПК установлены шунтирующие реакторы (ШР) [4, 11].

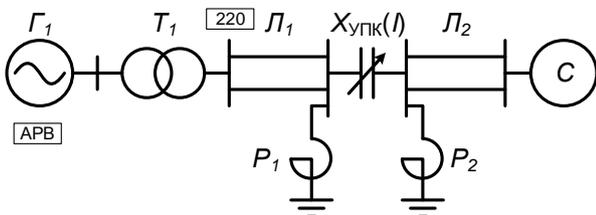


Рис. 1. Исследуемая электроэнергетическая система, содержащая управляемую ЛЭП ВН

На основе схем замещения систем сформированы математические модели. Они состоят из дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих

электромагнитные и электромеханические переходные процессы во всех элементах системы [5].

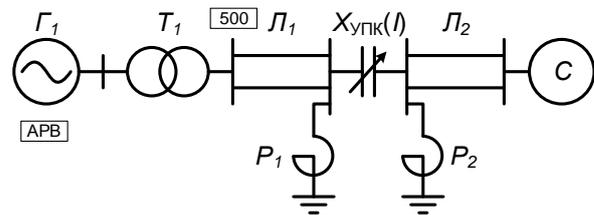


Рис. 2. Исследуемая электроэнергетическая система, содержащая управляемую ЛЭП СВН

Закон регулирования АРВ при анализе статической устойчивости [6] имеет вид

$$\Delta u_f = K_{0U}(U_0 - U_f), \quad (2)$$

где  $\Delta u_f$  – значение добавочного напряжения обмотки возбуждения под воздействием АРВ;  $K_{0U}$  – коэффициент регулирования по отклонению напряжения генератора;  $U_0$  – уставка АРВ пропорционального действия генератора по напряжению;  $U_f$  – напряжение на выводах генератора.

Регулирование степени компенсации на линии с управляемым УПК осуществляется путем изменения емкостного сопротивления в зависимости от тока линии (передаваемой по линии мощности) [7, 8]:

$$X_{уупк}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_{1уупк} - K_{2уупк} \cdot I)}, \quad (3)$$

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

Оценка устойчивости энергосистемы выполняется по характеру протекания переходного процесса при задании «малого» возмущения [9]. Под «малым» возмущением в данном исследовании принимается кратковременное (на 0,05 с) увеличение мощности турбины на 5 % от значения в исходном установившемся режиме.

Расчеты характеристик установившихся режимов систем выполнены с учетом минимального коэффициента запаса статической аperiodической устойчивости по активной мощности ( $K_{p,min} = 0,2$ ) с использованием оригинального программного обеспечения на языке программирования С++ [10].

**Результаты исследования.** На рис. 3–5 представлены области статической колебательной устойчивости для электропередачи

сверхвысокого напряжения 500 кВ при различных значениях длины ЛЭП и одинаковых начальных значениях сопротивления  $X_{уупк}$ . Аналогичные области статической устойчивости построены для электропередачи высокого напряжения 220 кВ (рис. 6, 7) [11].

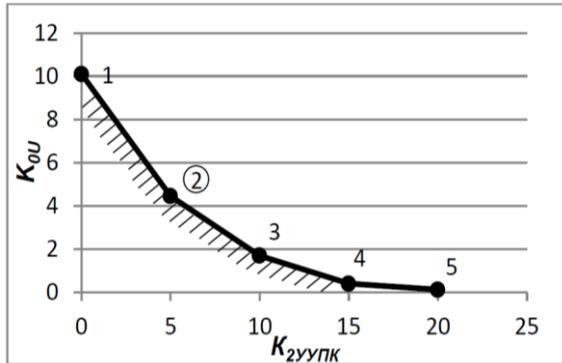


Рис. 3. Область устойчивости системы СВН при длине линии  $L = 1000$  км и  $X_{уупк} = 0,888$  о.е.

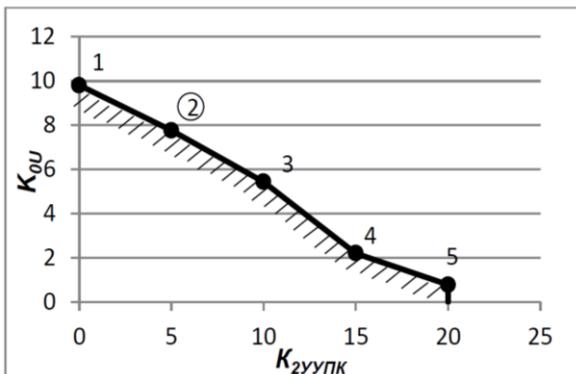


Рис. 4. Область устойчивости системы СВН при длине линии  $L = 1300$  км и  $X_{уупк} = 0,888$  о.е.

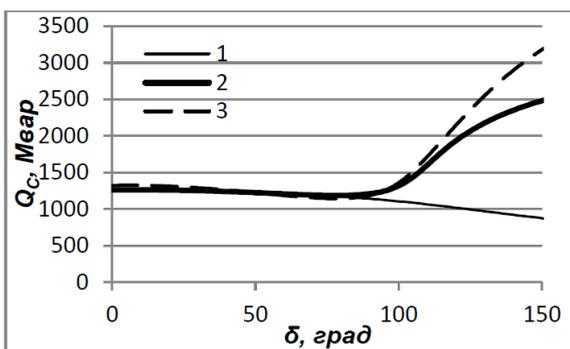


Рис. 5. Зарядная мощность ЛЭП СВН при  $L = 800$  км при различных коэффициентах регулирования УУПК: 1 –  $K_{2уупк} = 0$ ; 2 –  $K_{2уупк} = 5$ ; 3 –  $K_{2уупк} = 10$

Анализ результатов построения показывает, что в случае электропередачи сверхвысокого напряжения при увеличении коэффициента регулирования  $K_{2уупк}$  колебатель-

ная статическая устойчивость при допустимом уровне напряжения на шинах генератора обеспечивается при меньшем коэффициенте усиления АРВ  $K_{0U}$  (рис. 3–5).

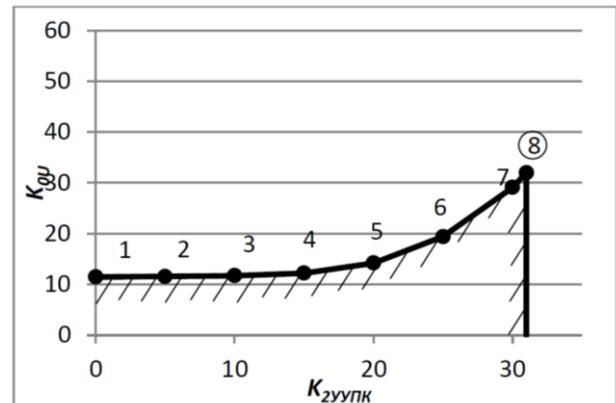


Рис. 6. Область устойчивости системы ВН при длине линии  $L = 200$  км и  $X_{уупк} = 0,232$  о.е.

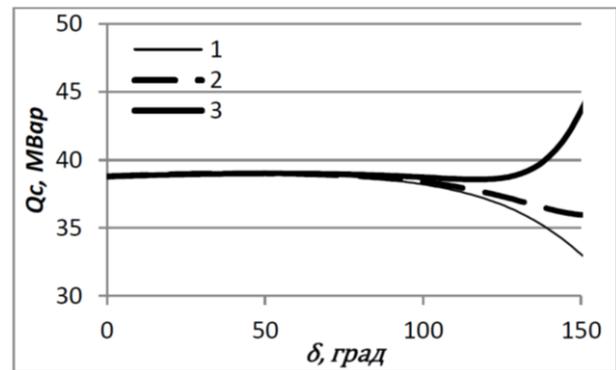


Рис. 7. Зарядная мощность ЛЭП ВН при  $L = 126$  км при различных коэффициентах регулирования УУПК: 1 –  $K_{2уупк} = 0$ ; 2 –  $K_{2уупк} = 5$ ; 3 –  $K_{2уупк} = 10$

В случае электропередачи высокого напряжения, наоборот, при увеличении коэффициента регулирования  $K_{2уупк}$  возможный диапазон изменения коэффициента усиления АРВ  $K_{0U}$  больше для тех же условий (рис. 8).

Такую закономерность можно объяснить, обратившись к схеме замещения линии электропередачи (рис. 9).

Любая линия электропередачи обладает емкостной проводимостью  $b_{л}$ , обусловленной емкостью между проводами, между проводами и землей, наличием заземленных тросов и параллельными линиями. Под действием приложенного напряжения через емкости линий электропередачи протекают емкостные (зарядные) токи, которые определяют генерацию зарядной мощности.

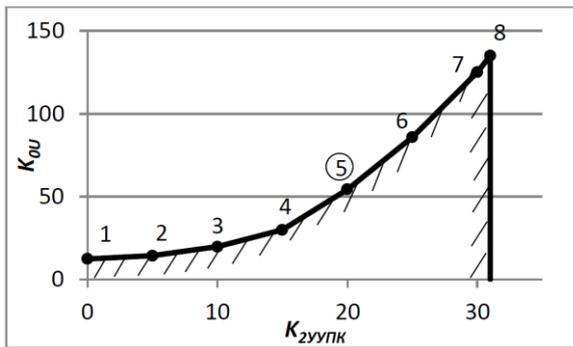


Рис. 8. Область устойчивости системы ВН при длине линии  $L = 126$  км и  $X_{ууПК} = 0,232$  о.е.

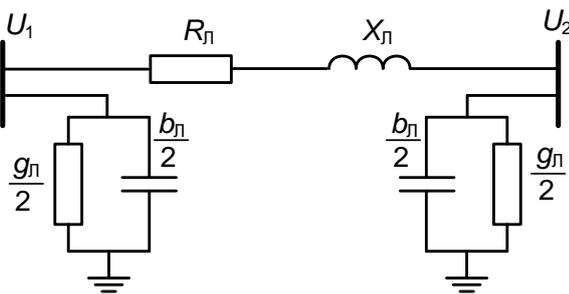


Рис. 9. Схема замещения линии электропередачи

Значение зарядной мощности можно определить по следующей формуле [12]:

$$Q_C = -U^2 b_0 l, \tag{4}$$

где  $Q_C$  – зарядная мощность линии электропередачи, МВар;  $U$  – напряжение, кВ;  $b_0$  – удельная емкостная проводимость, См/км;  $l$  – длина линии, км.

Кроме генерации реактивной мощности в линии существуют и потери реактивной мощности в индуктивности  $X_L$ , которые можно определить по формуле

$$\Delta Q_L = I^2 x_0 l = I^2 X_L, \tag{5}$$

где  $I$  – ток, протекающий по линии, кА;  $x_0$  – продольное индуктивное сопротивление, Ом/км;  $l$  – длина линии, км.

В зависимости от передаваемой мощности, в линиях может возникнуть либо избыток реактивной мощности, который будет вызывать повышение напряжения в сети, либо дефицит реактивной мощности, приводящий к снижению напряжения. В этих случаях действие АРВ будет различным.

Для электропередачи сверхвысокого и высокого напряжений построены характеристики зарядной мощности для различных коэффициентов регулирования  $K_{ууПК}$  (рис. 5, 7). Стоит отметить, что зарядная мощность линии пропорциональна квадрату

напряжения, следовательно, зарядная мощность ЛЭП СВН имеет существенно большее значение по сравнению с ЛЭП ВН. Кроме того, на значение зарядной мощности влияет длина ЛЭП, которая в данном исследовании для электропередачи СВН превосходит более чем в 6 раз длину ЛЭП ВН.

Согласно закону регулирования УУПК (2), увеличение коэффициента  $K_{ууПК}$  приводит к увеличению значения  $X_{ууПК}$  и уменьшению суммарного продольного реактивного сопротивления ( $X_{\Sigma} = X - X_{ууПК}$ ). Следовательно, сокращаются потери реактивной мощности и в системе возникает избыток реактивной мощности, генерируемой ЛЭП, который приводит к повышению напряжения на шинах генератора. Таким образом, для снижения напряжения до допустимых значений при сохранении колебательной статической устойчивости необходимо уменьшить коэффициент регулирования АРВ генератора  $K_{0U}$  (рис. 3–5).

В случае электропередачи высокого напряжения при увеличении коэффициента  $K_{ууПК}$  в системе происходят процессы, аналогичные процессам в системе с ЛЭП СВН, однако они не приводят к избытку реактивной мощности в силу более низкого класса напряжения электропередачи и малой протяженности линии. Таким образом, суммарная генерируемая реактивная мощность не компенсирует её потери в продольной части электропередачи, что приводит к понижению напряжения на шинах генератора. Следовательно, необходимо увеличить коэффициент усиления АРВ генератора  $K_{0U}$  для достижения допустимого значения напряжения при сохранении колебательной статической устойчивости (рис. 6, 7).

Сравнение характеристик линий высокого напряжения разной длины (рис. 6, 8) показывает, что при большей длине область устойчивости располагается ниже. Это объясняется тем, что с увеличением длины ЛЭП зарядная мощность также увеличивается (4). Следовательно, для того чтобы значения напряжений находились в допустимых пределах, требуется меньший коэффициент регулирования АРВ.

На рис. 10, 11 представлены семейства угловых характеристик активной мощности, соответствующих граничным режимам колебательной статической устойчивости для электропередачи сверхвысокого и высокого напряжений. Нумерация угловых

характеристик совпадает с нумерацией точек на соответствующих областях устойчивости. Анализ угловых характеристик показывает, что максимальный предел передаваемой мощности достигается при определенном сочетании коэффициентов регулирования УУПК и АРВ генераторов. Режимы, в которых наблюдается максимум активной мощности, на областях устойчивости обведены окружностью (рис. 3, 4, 6, 8).

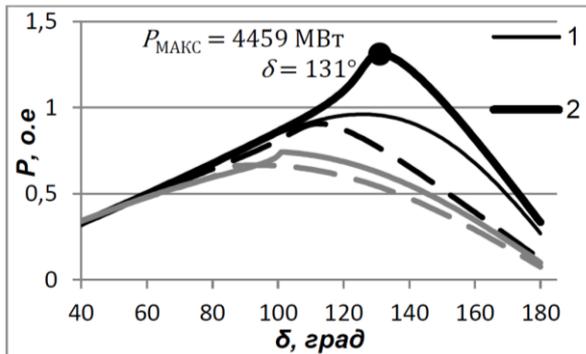


Рис. 10. Угловые характеристики активной мощности для граничных точек области устойчивости электропередачи СВН при длине линии  $L = 1000$  км

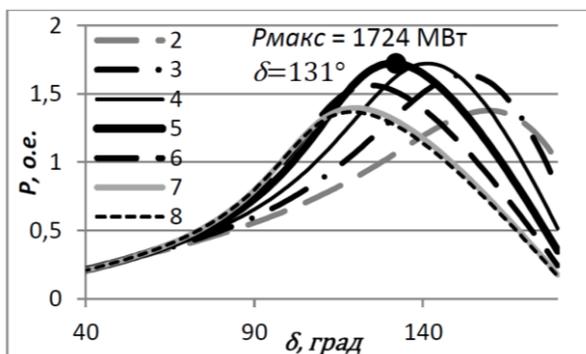


Рис. 11. Угловые характеристики активной мощности для граничных точек области устойчивости электропередачи ВН при длине линии  $L = 126$  км

На рис. 11 представлены угловые характеристики активной мощности для системы с ЛЭП 220 кВ. Значение максимального предела передаваемой активной мощности составляет  $P_{\text{макс}} = 1724$  МВт. Это значение имеет чисто теоретический смысл, так как соответствует углу  $\delta$ , равному  $131^\circ$ . Данный режим не входит в диапазон возможных длительных эксплуатационных режимов, которые, как правило, ограничиваются значениями углов  $\delta$  не более  $70^\circ$  при необходимых коэффициентах запаса статической устойчивости. Для таких режимов

мощность имеет вполне приемлемые значения для ЛЭП 220 кВ с управляемым УПК, дающим повышение передаваемой мощности.

**Выводы.** На основе сравнения характеристик линий высокого и сверхвысокого напряжений установлено следующее.

1. При комплексном подходе к выбору настроечных параметров АРВ генераторов и УУПК необходимо учитывать класс напряжения, которым выполнена электропередача, поскольку области устойчивости имеют различный вид. Для электропередачи сверхвысокого напряжения диапазон изменения коэффициента регулирования АРВ генераторов шире при небольших коэффициентах регулирования УУПК, а для высокого напряжения этот диапазон больше при максимальных значениях коэффициента регулирования УУПК.

2. Анализ характеристик передаваемой активной мощности для ЛЭП СВН показывает возможность совместного выбора настроечных параметров УПК и АРВ для областей устойчивости и характеристик устойчивости, дающих максимальное значение этой мощности, что показано на примере ЛЭП ВН [11].

#### Список литературы

1. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.: Высш. шк., 1985. — 536 с.
2. **Идельчик В.И.** Электрические системы и сети: учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 592 с.
3. **Москвин И.А.** Колебательная статическая устойчивость электроэнергетической системы с межсистемной связью, содержащей регулируемое устройство продольной компенсации // Вестник ИГЭУ. — 2013. — Вып. 5. — С. 46–50.
4. **Критерий** апериодической статической устойчивости электроэнергетической системы с управляемым устройством продольной компенсации на линии 220 кВ / В.П. Голов, Д.Н. Кормилицын, А.В. Калуцков, О.С. Суханова // Вестник ИГЭУ. — 2020. — Вып. 5. — С. 13–24.
5. **Использование** управляемых линий электропередачи с регулируемой последовательной компенсацией для реализации адаптивных сетей / В.П. Голов, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин, Д.Н. Кормилицын // Российская Электротехника. — 2017. — Т. 88, Вып. 2. — С. 60–66.
6. **Братолобов А.А.** Физические основы переходных процессов в электроэнергетических системах: учеб. пособие / ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». — Иваново, 2018. — 184 с.

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

8. Голов В.П., Мартиросян А.А., Москвин И.А. Расчет характеристик установившихся режимов электроэнергетической системы с регулируемым устройством продольной компенсации // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 18–22.

9. Голов В.П., Кормилицын Д.Н., Суханова О.С. Анализ влияния управляемой линии высокого напряжения и автоматического регулирования возбуждения генераторов на колебательную устойчивость электроэнергетической системы // Вестник ИГЭУ. – 2022. – Вып. 1. – С. 38–45.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021668911 Российская Федерация. Комплекс расчета статической устойчивости управляемой электроэнергетической системы с учетом нормативного коэффициента запаса статической апериодической устойчивости по активной мощности / Д.Н. Кормилицын, О.С. Суханова; опубл. 22.11.2021.

11. Голов В.П., Кормилицын Д.Н., Суханова О.С. Предел передаваемой мощности управляемой линии электропередачи высокого напряжения для режимов на границе статической устойчивости // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 2. – С. 28–35.

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

13. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии: учеб. пособие. – Ростов-н/Д.: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006. – 720 с.

## References

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

2. Idel'chik, V.I. *Elektricheskie sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 592 p.

3. Moskvina, I.A. Kolebatel'naya staticheskaya ustoychivost' elektroenergeticheskoy sistemy s mezhsistemnoy svyaz'yu, sodержashchey reguliruemoye ustroystvo prodol'noy kompensatsii [Oscillatory stability of an electrical power system with interconnection, containing an adjustable longitudinal compensation device]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 5, pp. 46–50.

4. Golov, V.P., Kormilitsyn, D.N., Kalutskov, A.V., Sukhanova, O.S. Kriteriy aperiodicheskoy staticheskoy ustoychivosti elektroenergeticheskoy sistemy s upravlyaemym ustroystvom prodol'noy kompensatsii na linii 220 kV [Aperiodic

steady-state stability criterion of electric power system with controlled series compensation on 200 kV line]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 6, pp. 14–24.

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

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

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

8. Golov, V.P., Martirosyan, A.A., Moskvina, I.A. Raschet kharakteristik ustanovivshikhsya rezhimov elektroenergeticheskoy sistemy s reguliruemym ustroystvom prodol'noy kompensatsii [Calculation of Characteristics of Steady Modes of an Electric Power System with an Adjustable Series Compensation Device]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 6, pp. 18–22.

9. Golov, V.P., Kormilitsyn, D.N., Sukhanova, O.S. Analiz vliyaniya upravlyaemoy linii vysokogo napryazheniya i avtomaticheskogo regulirovaniya возбуждениya генераторов на колебательную устойчивость электроenergeticheskoy sistemy [Analysis of influence of controlled high voltage line and automatic excitation control generators on oscillatory steady-state stability of electric-power system]. *Vestnik IGEU*, 2022, issue 1, pp. 38–45.

10. Kormilitsyn, D.N., Sukhanova, O.S. Kompleks rascheta staticheskoy ustoychivosti upravlyaemoy elektroenergeticheskoy sistemy s uchetom normativnogo koeffitsienta zapasa staticheskoy aperiodicheskoy ustoychivosti po aktivnoy moshchnosti [The complex for calculating the steady-state stability of a controlled electric power system, taking into account the standard safety factor of aperiodic stability in terms of active power]. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM 2021668911* [Certificate of state registration of a computer program 2021668911], 2021.

11. Golov, V.P., Kormilitsyn, D.N., Sukhanova, O.S. Predel peredavaemoy moshchnosti upravlyaemoy linii elektropredachi vysokogo napryazheniya dlya rezhimov na granitse staticheskoy ustoychivosti [Transmitted power limit of controlled high voltage transmission line for modes on steady-state stability boundary]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 2, pp. 28–35.

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

13. Gerasimenko, A.A., Fedin, V.T. *Peredacha i raspredelenie elektricheskoy energii* [Transmission and distribution of electrical energy]. Rostov-n/D.: Feniks; Krasnoyarsk: Izdatel'skie proekty, 2006. 720 p.