

УДК 621.311

Выбор коэффициентов регулирования автоматического регулятора возбуждения для сохранения колебательной устойчивости электроэнергетической системы с управляемой линией электропередачи¹

В.П. Голов, Н.А. Градов, Д.Н. Кормилицын, Е.С. Скоропеева, Ю.О. Чуркина
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: golov@ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Применение устройств продольной емкостной компенсации на дальних линиях электропередачи может приводить к колебательному нарушению устойчивости электроэнергетической системы. Применение автоматического регулирования возбуждения генераторов в целом положительно сказывается на показателях устойчивости системы, однако неправильный выбор коэффициентов регулирования может приводить к нежелательным ее нарушениям. В известных работах обычно рассматривается влияние только одного управляемого устройства на устойчивость электроэнергетической системы. Целями данного исследования являются анализ влияния выбора настроечных параметров устройства продольной компенсации и автоматического регулятора возбуждения на статическую устойчивость электроэнергетической системы и получение метода совместного определения таких значений этих параметров, при которых не происходит нарушения статической устойчивости. Кроме того, необходимо проанализировать возможность применения упрощенной модели, учитывающей только электромеханический переходный процесс для выявления устойчивых коэффициентов регулирования.

Материалы и методы: Для составления упрощенной математической модели использован метод первого приближения А.М. Ляпунова. По методу *D*-разбиения по двум и трем параметрам построены области колебательной устойчивости. В качестве инструмента моделирования применяется оригинальное программное обеспечение на языке программирования C++.

Результаты: Предложен метод получения областей устойчивости по характеру протекания переходного процесса при кратковременном малом утяжелении режима, отличающийся от известных учетом как электромеханического, так и электромагнитных переходных процессов в системе. Определены диапазоны изменения параметров регулирования устройства продольной компенсации и автоматического регулятора возбуждения для исходного рабочего режима при использовании как более полной, так и упрощенной модели электроэнергетической системы. Выявлена тенденция изменения области устойчивости в координатах настроечных параметров автоматического регулятора возбуждения при увеличении регулирующего воздействия со стороны устройства продольной компенсации.

Выводы: Для выбора коэффициентов регулирования автоматического регулятора возбуждения применение упрощенной модели допустимо, поскольку область устойчивости, полученная по упрощенной модели, входит в область устойчивости, полученной по более полной модели. Однако применение упрощенной модели для анализа колебательной устойчивости в существующей сети нецелесообразно, поскольку дает большое расхождение положения границы устойчивости с результатами вычислительного эксперимента по более полной модели (в разы). Для более точного выявления границы устойчивости необходимо использование более полной математической модели.

Ключевые слова: автоматическое регулирование возбуждения, дальние линии электропередачи сверхвысокого напряжения, колебательная статическая устойчивость, управляемые устройства продольной компенсации, области устойчивости.

Selecting of automatic excitation control regulation factors for maintaining oscillatory stability of a power engineering system with a controlled power transmission line

V.P. Golov, N.A. Gradov, D.N. Kormilitsyn, E.S. Skoropeyeva, Yu.O. Churkina
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: golov@ispu.ru

Abstract

Background: Application of series compensators at long-distance power transmission lines may cause electrical power system oscillatory instability. Automatic excitation control, as a whole, enhances the power engineering system stability. However, incorrect selection of automatic excitation control regulation factors may lead to undesirable stability problems. The known works normally consider the influence of only one controlled device on the stability of the electric power system. The objectives of this study are to analyze the influence of selecting automatic excitation control and series compensators regulation factors upon the steady-state stability of the electrical power system and to develop a method that will account for a combination of these parameters and will not result in system instability. In addition, it is necessary to analyze the possibility of applying a simplified model that takes into account only the electromechanical transients to identify stable control factors.

¹ Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (ГЗ шифр проекта 13.7824.2017/8.9).

Materials and methods: A.M. Lyapunov’s first approximation method was used to form a simplified mathematical model. Oscillatory stability regions were obtained by using two- and three-parameter *D*-decomposition method. As a simulation tool, we used the developed software in the C++ programming language.

Results: A method has been developed for obtaining stability regions according to the transient behavior under short-term mode variation. The method is different from the known ones as it accounts for both the electromechanical and electromagnetic transients in the system. We have also determined the variation ranges of series compensators and automatic excitation control regulation factors for operation conditions when using both a more complete and a simplified model of the electric power system. A trend has been revealed that the stability regions change as a function of automatic excitation control regulation parameters if the series compensator control action is increased.

Conclusions: It is possible to use the simplified model for selecting the control factors for an automatic excitation controller as the stability region obtained by such simplified model belongs to the stability region obtained by the more complete model. However, the use of the simplified model for analyzing oscillatory stability in an existing network is inexpedient as it produces a large stability boundary position discrepancy with the results of the computational experiment using the more complete model (multi fold discrepancy). For a more accurate identification of the stability boundary, a more complete mathematical model is required.

Key words: automatic excitation control, extra-high voltage long-distance power lines, oscillatory steady-state stability, controlled series compensation devices, stability regions

DOI: 10.17588/2072-2672.2017.5.027-036

Состояние вопроса. Управляемые устройства продольной компенсации (УУПК) значительно увеличивают предел передаваемой мощности, а также улучшают устойчивость электроэнергетической системы [1, 2]. Однако поскольку управляемая ЛЭП СВН является не единственным регулируемым элементом, то необходимо исследовать, как применение УУПК на таких линиях влияет на настройку других управляемых устройств, в частности АРВ генераторов. Таким образом, необходимо оценить влияние коэффициентов регулирования УУПК на настроечные параметры АРВ СД.

Материалы и методы. Модель рассматриваемой электроэнергетической системы. Исследование производилось для простейшей электроэнергетической системы, содержащей управляемую ЛЭП СВН (рис. 1). Генераторы электрической станции с суммарной номинальной мощностью 2400 МВт имеют устройство АРВ СД и соединены с системой двухцепной линией электропередачи 500 кВ длиной 1000 км с установленным посередине УУПК. На выводах УУПК установлены управляемые шунтирующие реакторы (УШР). На рис. 2 представлена схема замещения исследуемой системы [4].

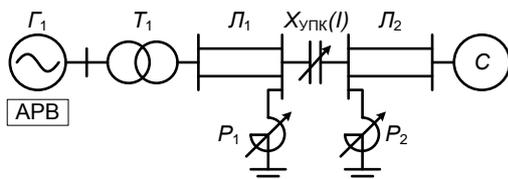


Рис. 1. Исследуемая электроэнергетическая система, содержащая управляемую ЛЭП СВН

Регулирование в УПК осуществляется путем изменения емкостного сопротивления в зависимости от тока линии (передаваемой по линии мощности) [4, 5]:

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

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.

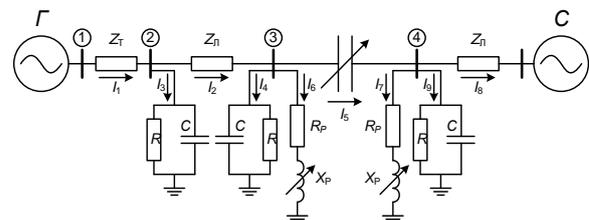


Рис. 2. Схема замещения исследуемой электроэнергетической системы

Представленный закон регулирования возможно реализовать с применением мощной силовой электроники (технология TCSC) [6].

Плавное регулирование ШР осуществляется путем изменения индуктивного сопротивления в зависимости от напряжения в точке подключения ШР [7]:

$$\Delta X_{\text{УШР}}(U) = -K_{\text{УШР}}(U - U_0), \quad (2)$$

где $\Delta X_{\text{УШР}}(U)$ – изменение сопротивления УШР, Ом; U – напряжение в точке подключения УШР, кВ; U_0 – уставка УШР по напряжению, кВ; $K_{\text{УШР}}$ – коэффициент регулирования УШР, кА⁻¹.

Эквивалентный генератор представлен уравнениями Парка-Горева. Система АРВ представлена следующей функцией, описывающей отклонение напряжения от уставки,

а также первую и вторую производные изменения угла во времени [8]:

$$\Delta E_{qe} = \frac{-K_{OU}(U_r - U_0) + (K_{1APB} + pK_{2APB})p\Delta\delta}{(1 + pT_e)(1 + pT_p)}, \quad (3)$$

где ΔE_{qe} – изменение стационарной синхронной ЭДС генератора, кВ; U_r – напряжение на выводах генератора, кВ; U_0 – уставка АРВ по напряжению, кВ; K_{OU} – коэффициент регулирования АРВ по отклонению напряжения ротора генератора; K_{1APB} , K_{2APB} – коэффициенты регулирования АРВ по первой и второй производным угла ротора генератора, $\frac{\text{кВ}}{\text{град} \cdot \text{с}}$ и $\frac{\text{кВ}}{\text{град} \cdot \text{с}^2}$ соответственно; p – оператор дифференцирования; T_e – постоянная времени возбудителя, с; T_p – постоянная времени преобразовательного устройства, с.

Модель для представленной системы можно сформировать в виде следующих матричных блоков дифференциальных и алгебраических уравнений [4]:

1. Уравнения переходных процессов синхронного генератора – уравнения Парка-Горева в их обычной форме. Для записи уравнений синхронных машин используется система координат (d, q) , вращающаяся с частотой ротора данной машины.

2. Дифференциальные уравнения электромагнитных переходных процессов. Для элементов электрической сети записываются в системе координат синхронного генератора.

3. Алгебраические уравнения балансов токов в узлах сети.

4. Уравнения связи генератора с сетью – уравнения преобразования координат в узлах подключения синхронного генератора.

5. Уравнение взаимного угла ротора генератора и эквивалентной системы.

6. Уравнения для УУПК.

7. Уравнения для УШР.

8. Уравнения для системы АРВ генератора.

Результаты исследования. Методика построения областей устойчивости.

Для корректного выбора коэффициентов регулирования АРВ необходимо построить области устойчивости для каждого конкретного режима работы электроэнергетической системы. В данном исследовании для построения используется модель, учитывающая как электромагнитные процессы в обмотках ротора и статора, так и электромеханический переходный процесс. При фиксации одного из коэффициентов (в данном случае это

K_{2APB}) и изменении второго (K_{1APB}) производится вычислительный эксперимент по определению границы устойчивости. Мощность турбины кратковременно (на 0,1 с) повышается на 5 % от значения в исходном установившемся режиме. По результату протекания переходного процесса делается вывод об устойчивости. Для анализа используются зависимости угла ротора δ_{12} активной мощности P_T , выдаваемой генератором. На рис. 3, 4 представлены графики зависимостей при следующих условиях: $K_2 = 2$, $K_{УШР} = 0$, $K_{OU} = 20$, $K_{1APB} = 0$, $K_{2APB} = 0$, что соответствует наличию в системе АРВ пропорционального действия, работе УУПК и нерегулируемых ШР.

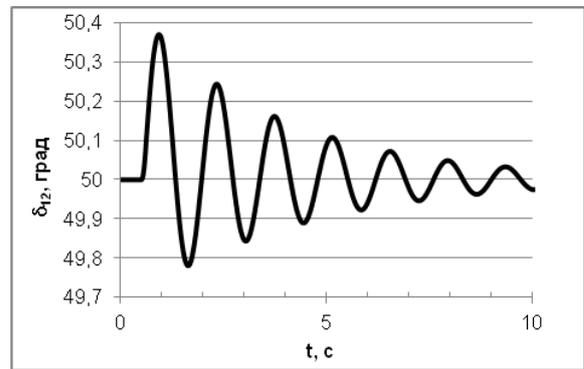


Рис. 3. График изменения угла ротора δ_{12} во времени при $K_2 = 2$, $K_{УШР} = 0$, $K_{OU} = 20$, $K_{1APB} = 0$, $K_{2APB} = 0$

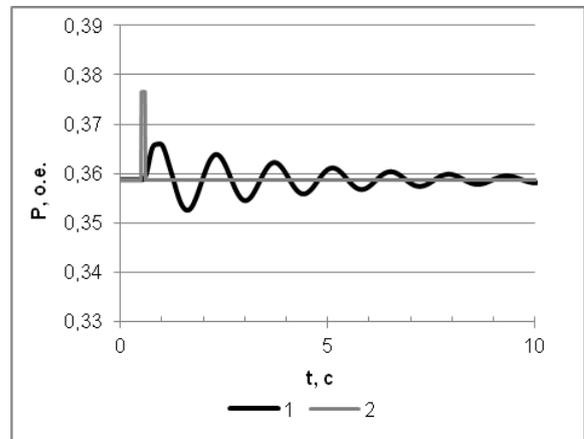


Рис. 4. График изменения выдаваемой генератором активной мощности P_T (1) и мощности турбины P_T (2) во времени при $K_2 = 2$, $K_{УШР} = 0$, $K_{OU} = 20$, $K_{1APB} = 0$, $K_{2APB} = 0$

На графиках отчетливо виден стандартный переходный процесс без наличия значительного сглаживания ввиду отсутствия регулирования АРВ по первой и второй производным угла ротора генератора. На рис. 5, 6 изображены графики тех же зависимостей при различных значениях K_{1APB} .

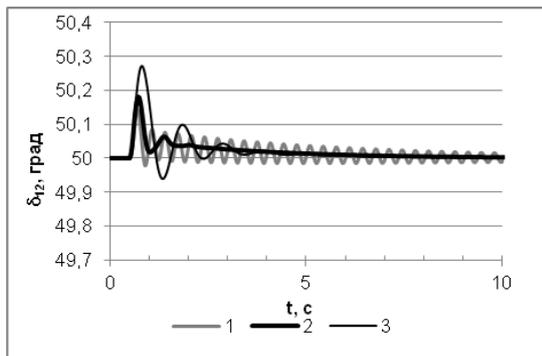


Рис. 5. График изменения угла ротора δ_{12} во времени: 1 – $K_{OU} = 20, K_{1APB} = 7,5, K_{2APB} = 0$; 2 – $K_{OU} = 20, K_{1APB} = 4, K_{2APB} = 0$; 3 – $K_{OU} = 20, K_{1APB} = 1, K_{2APB} = 0$

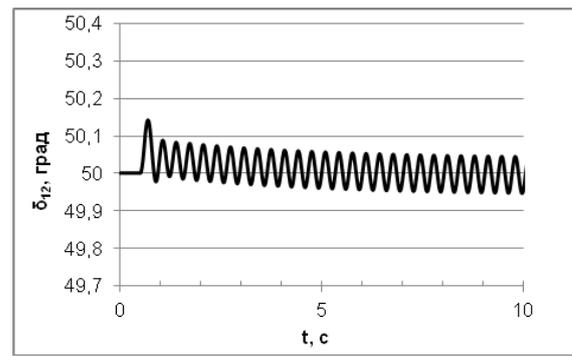


Рис. 7. График изменения угла ротора δ_{12} во времени при $K_{OU} = 20, K_{1APB} = 7,69, K_{2APB} = 0$

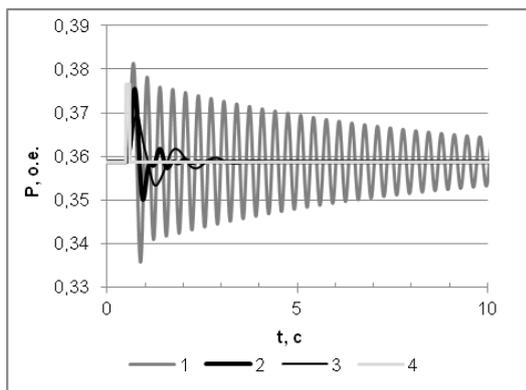


Рис. 6. График изменения выдаваемой генератором активной мощности P_G (1-3) и мощности турбины P_T (4) во времени: 1 – $K_{OU} = 20, K_{1APB} = 7,5, K_{2APB} = 0$; 2 – $K_{OU} = 20, K_{1APB} = 4, K_{2APB} = 0$; 3 – $K_{OU} = 20, K_{1APB} = 1, K_{2APB} = 0$

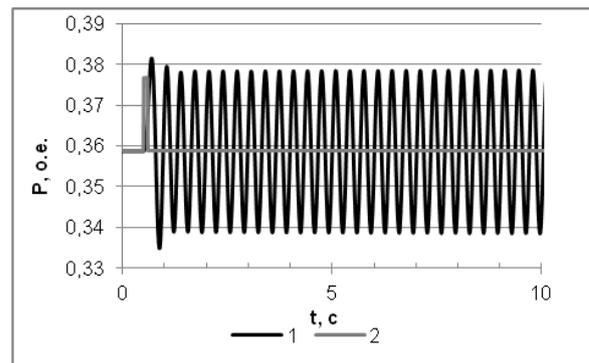


Рис. 8. График изменения выдаваемой генератором активной мощности P_G (1) и мощности турбины P_T (2) во времени при $K_{OU} = 20, K_{1APB} = 7,69, K_{2APB} = 0$

Анализируя полученные зависимости (рис. 3–6), можно сделать вывод о том, что увеличение коэффициентов регулирования АРВ СД приводит к различным последствиям. В начале наблюдается положительный эффект на сглаживание графиков переходных процессов, однако существует некоторое значение коэффициентов, когда имеет место перерегулирование и в системе возникают колебания с частотой гораздо выше той, что существует в системе без регулирования по производным угла ротора. Данный эффект свидетельствует о том, что рабочая точка находится на небольшом удалении от границы колебательной устойчивости [9].

Графики на рис. 7, 8 соответствуют границе колебательной устойчивости – в системе имеют место незатухающие колебания угла и мощности.

Таким образом, значение $K_{1APB} = 7,69$ при $K_{2APB} = 0$ считается границей колебательной устойчивости.

Аналогичным образом найдены точки границы устойчивости и при других значениях K_{2APB} .

Области устойчивости по результатам вычислительного эксперимента.

После проведения вычислительного эксперимента для различных значений $K_{2\delta}$ и нахождения для каждого из них соответствующей точки границы устойчивости можно построить область устойчивости для рассматриваемой системы в плоскости коэффициентов регулирования АРВ. На рис. 9 представлены области устойчивости при изменении коэффициента регулирования УУПК.

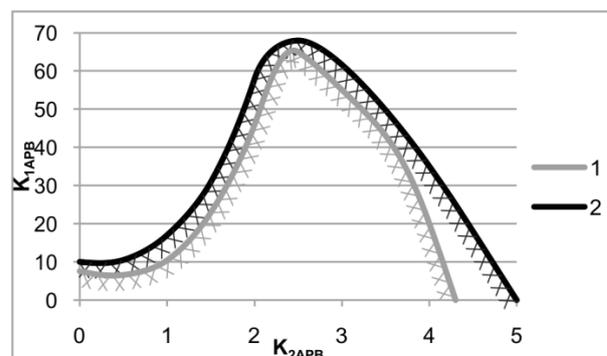


Рис. 9. Области колебательной устойчивости: 1 – $K_{OU} = 20, K_2 = 2, K_{УШР} = 0$; 2 – $K_{OU} = 20, K_2 = 0,5, K_{УШР} = 0$

Анализ полученных зависимостей (рис. 9) показывает, что снижение коэффициента регулирования УУПК увеличивает

допустимый диапазон выбора коэффициентов регулирования АРВ. Данный эффект обусловлен тем, что при снижении коэффициента регулирования УУПК для достижения режима перерегулирования, т.е. потери колебательной устойчивости необходимо большее регулирующее воздействие от АРВ на генераторах при одном и том же возмущении. Наблюдаемый эффект, приводящий к самораскачиванию синхронных генераторов, эквивалентен отрицательному демпфированию [9].

Для оценки влияния УШР на показатели устойчивости построены области устойчивости при наличии и отсутствии их регулирования (рис. 10).

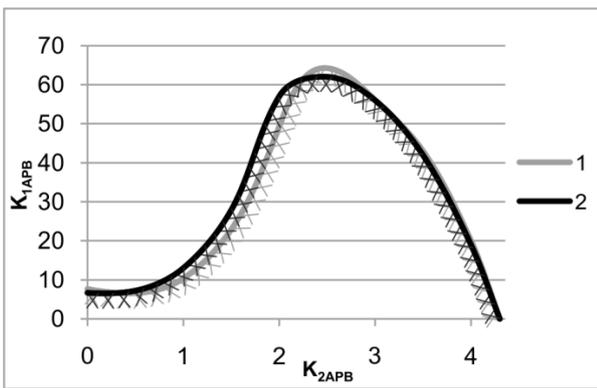


Рис. 10. Области колебательной устойчивости: 1 – $K_{OU} = 20$, $K_2 = 2$, $K_{УШР} = 0$; 2 – $K_{OU} = 20$, $K_2 = 2$, $K_{УШР} = 2$

Анализ полученных зависимостей (рис. 10) показывает, что применение УШР позволяет несколько увеличить диапазон изменения $K_{1АРВ}$ при малых значениях $K_{2АРВ}$.

Анализ возможности применения упрощенной модели для оценки колебательной устойчивости системы. Проведение вычислительного эксперимента связано с достаточно продолжительными расчетами, поскольку состоит из большого количества последовательных расчетов переходного процесса в ЭЭС при различных значениях коэффициентов регулирования. По этой причине проведен анализ возможности использования упрощенной модели ЭЭС для выбора коэффициентов регулирования АРВ и оценки колебательной устойчивости. Для этого традиционно используется метод D-разбиения характеристического уравнения, составленного по упрощенной математической модели. Дан-

ная модель обычно учитывает электро-механический переходный процесс, а также электромагнитный переходный процесс в обмотке возбуждения генератора и закон регулирования АРВ:

$$\left. \begin{aligned} T_J p^2 \delta + P_d p \delta &= P_T - P_{\mathcal{E}}, \\ T_{do} p E'_q + E_q &= E_{qe}, \\ E_{qe} &= E_{qo} + \sum_j W'_{Tj}(p) \Pi_j, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $W'_{Tj}(p)$ – передаточная функция системы возбуждения и АРВ синхронной машины.

После записи характеристического определителя находится характеристическое уравнение следующего вида:

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n, \quad (5)$$

где a_0, a_1, \dots, a_n – коэффициенты характеристического уравнения; n – порядок характеристического уравнения.

Коэффициенты характеристического уравнения содержат в себе частные производные параметров исходного режима.

Для простейших систем, не содержащих поперечные элементы или при минимальном их количестве, расчет частных производных, входящих в характеристическое уравнение, производится по аналитическим выражениям [10]. Однако в приведенной системе присутствует большое количество нелинейных элементов и поперечных ветвей (рис. 2), что приводит к нерациональности и невозможности расчета частных производных аналитическими методами.

Для решения поставленной задачи частные производные можно рассчитать только численным методом – как отношение разности между параметрами утяжеленного установившегося режима и исходного:

$$\frac{\partial P}{\partial \delta_{12}} \approx \frac{\Delta P}{\Delta \delta_{12}}.$$

Причем утяжеление производится при «малом» отклонении от исходного режима для минимизации погрешности от такого допущения.

Математическая модель рассматриваемой электроэнергетической системы с регулируемым УПК и

устройством АРВ генератора. Упрощенная математическая модель, использованная для получения области устойчивости по коэффициентам регулирования АРВ, имеет следующий вид [11]:

$$\left. \begin{aligned} T_j p^2 \delta + P_d p \delta &= P_T - P_{\Sigma}, \\ T_{d0} p E'_q + E_q &= E_{qe}, \\ I &= f(\delta, E_q, X_{УПК}), \\ X_{УПК} &= f(I_{УПК}), \\ E_{qe} &= E_{q0} + \sum_j W'_{Tj}(p) \Pi_j, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $W'_{Tj}(p)$ – передаточная функция системы возбуждения и АРВ синхронной машины.

Данная модель состоит из уравнений электромеханического переходного процесса в исследуемой ЭЭС и электромагнитного переходного процесса в обмотке возбуждения синхронного генератора, при этом учтены законы регулирования УУПК и АРВ.

Определение частных производных для системы с регулируемым УПК и устройством АРВ. После линеаризации уравнений составлен характеристический определитель 5 порядка:

$$D(p) = \begin{vmatrix} T_j p^2 + Dp + \frac{\partial P_T}{\partial \delta} & \frac{\partial P_T}{\partial E'} & \frac{\partial P_T}{\partial X_{УПК}} & 0 & 0 \\ T_d p \frac{\partial E_q}{\partial \delta} & T_d p \frac{\partial E_q}{\partial E'} + 1 & T_d p \frac{\partial E_q}{\partial X_{УПК}} & 0 & -1 \\ \frac{\partial I}{\partial \delta} & \frac{\partial I}{\partial E'} & \frac{\partial I}{\partial X_{УПК}} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{\partial X_{УПК}}{\partial I} & 0 \\ a & b & c & 0 & -1 \end{vmatrix}, \quad (7)$$

где $a = \frac{K_{OU} \frac{\partial U_T}{\partial \delta} + (K_{1АРВ} + K_{2АРВ} p) p \frac{\partial I_T}{\partial \delta}}{(T_e p + 1)(T_p p + 1)}$;

$b = \frac{K_{OU} \frac{\partial U_T}{\partial E'} + (K_{1АРВ} + K_{2АРВ} p) p \frac{\partial I_T}{\partial E'}}{(T_e p + 1)(T_p p + 1)}$;

$c = \frac{K_{OU} \frac{\partial U_T}{\partial X_{УПК}} + (K_{1АРВ} + K_{2АРВ} p) p \frac{\partial I_T}{\partial X_{УПК}}}{(T_e p + 1)(T_p p + 1)}$.

Раскрывая характеристический определитель, получим следующее характеристическое уравнение 5 порядка:

$$D(p) = a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5, \quad (8)$$

где $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ – коэффициенты характеристического уравнения.

Необходимо определить значения всех частных производных, входящих в выражения коэффициентов характеристического уравнения (8), кроме значения $\frac{\partial X_{УПК}}{\partial I}$, которое непосредственно включает в себя параметр регулирования УПК K_2 , определяющий крутизну зависимости $X_{УПК}(I)$. Данную частную производную легко найти по аналитическому выражению ввиду его простоты. Выражение $\frac{\partial X_{УПК}}{\partial I}$ связано с коэффициентом

K_2 следующим образом:

$$\frac{\partial X_{УПК}}{\partial I} = \frac{10^6 \cdot I_6 K_2}{\omega_0 (K_1 - K_2 I \cdot I_6)^2 Z_6}. \quad (9)$$

При рассмотрении конкретного установившегося режима зависимость (9) можно представить в виде линейного выражения (10). Коэффициент пропорциональности a получен при подстановке в выражение (9) значений режимных параметров, соответствующих точке исходного установившегося режима:

$$\frac{\partial X_{УПК}}{\partial I} = a \cdot K_2 + b. \quad (10)$$

В данном случае для построения каждой из областей устойчивости параметр K_2 будет фиксирован, поэтому частная производная сопротивления УПК по току будет принимать конечное значение [11].

Поиск частных производных производился двумя путями:

1) отдельное утяжеление режима по каждому аргументу частных производных ($\delta, E_q, X_{УПК}$) и поиск производных по соответствующему приращению режима;

2) по общему приращению режима, т.е. с однократным малым утяжелением режима по углу и поиском всех частных производных.

Области устойчивости для системы с регулируемым УПК и устройством АРВ по методу утяжеления режима по одному из параметров. Рассматриваемые параметры регулирования АРВ входят в характеристическое

уравнение (8) линейно. При этом данное уравнение можно представить в следующем виде:

$$D(p) = D_0(p) + K_{1APB}D_1(p) + K_{2APB}D_2(p) = 0. \quad (11)$$

Граница D -разбиения представляет собой отображение мнимой оси комплексной плоскости корней на плоскости исследуемых параметров, поэтому для построения области устойчивости принимаем в уравнении (11) чисто мнимый корень:

$$p = j\omega; \quad (12)$$

$$D(j\omega) = D_0(j\omega) + K_{1APB}D_1(j\omega) + K_{2APB}D_2(j\omega) = 0. \quad (13)$$

Таким образом, уравнение (11) распадается на два уравнения:

$$\left. \begin{aligned} K_{2APB} \operatorname{Re}_2(\omega) + K_{1APB} \operatorname{Re}_1(\omega) &= -\operatorname{Re}_0(\omega), \\ K_{2APB} \operatorname{Im}_2(\omega) + K_{1APB} \operatorname{Im}_1(\omega) &= -\operatorname{Im}_0(\omega). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Решив систему (14) относительно K_{1APB} и K_{2APB} , получим выражения для рассматриваемых коэффициентов регулирования. При подстановке в них значений ω от $-\infty$ до $+\infty$ получим для каждого значения ω пару значений K_{1APB} и K_{2APB} . По этим точкам можно построить кривую D -разбиения в плоскости рассматриваемых коэффициентов (рис. 11). Кривая D -разбиения разбивает плоскость K_{2APB} , K_{1APB} на области $D(m)$, показанные на рис. 11, где m – число неустойчивых корней. Чтобы выяснить, какая из областей $D(m)$ является претендентом на область устойчивости, необходимо применить правило штриховки.

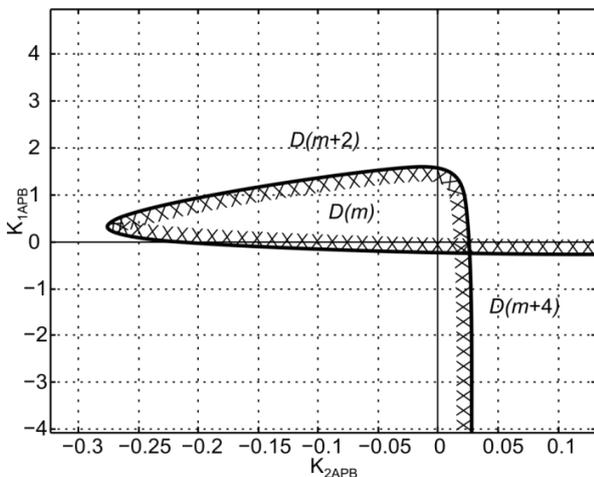


Рис. 11. Граница D -разбиения в плоскости коэффициентов регулирования АРВ

В целях проверки претендента на область устойчивости подставим K_{1APB} и K_{2APB} из полученной области в характеристическое уравнение и вычислим корни. Для $K_{1APB} = 1$ и $K_{2APB} = 0,01$ получили следующие корни характеристического уравнения: $p_1 = -156,255$; $p_{2,3} = -13,465 \pm 61,465i$; $p_{4,5} = -1,237 \pm 3,594i$.

При $K_{1APB} = 1$ и $K_{2APB} = 1$ получили два неустойчивых корня из пяти: $p_1 = 9475,87$; $p_2 = 14,457$; $p_3 = -13,025$; $p_{4,5} = -0,443 \pm 2,194i$.

Настройку регулируемых устройств, входящих в исследуемую систему, необходимо производить с учетом их влияния друг на друга. Иными словами, целесообразно выявить возможное изменение области устойчивости для коэффициентов регулирования АРВ при изменении коэффициента регулирования УПК. Это можно выполнить с помощью метода D -разбиения по трем параметрам [10]: для каждого интересующего значения коэффициента регулирования УПК нужно выполнить построение области устойчивости в координатах коэффициентов регулирования АРВ. Таким образом, суть метода D -разбиения по трем параметрам сводится к нескольким последовательным расчетам по методу D -разбиения по двум параметрам. При этом области устойчивости строятся либо в одной плоскости (рис. 12), либо в виде трехмерной фигуры (рис. 13).

Следует отметить, что при увеличении коэффициента регулирования УПК область возможных значений коэффициентов регулирования АРВ сужается.

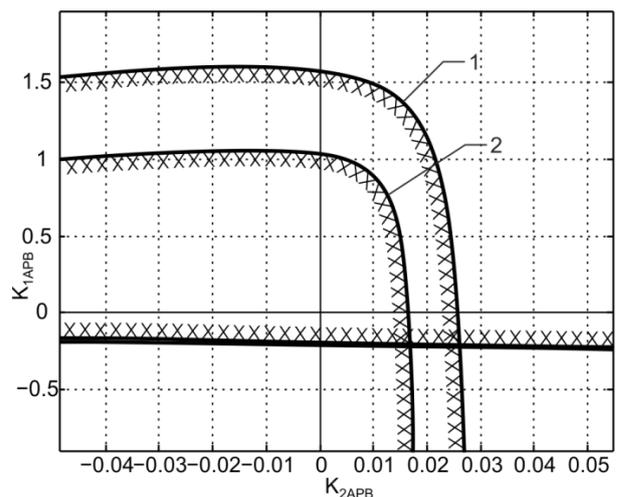


Рис. 12. Граница D -разбиения в координатах коэффициентов регулирования АРВ: 1 – $K_2 = 0$; 2 – $K_2 = 10$

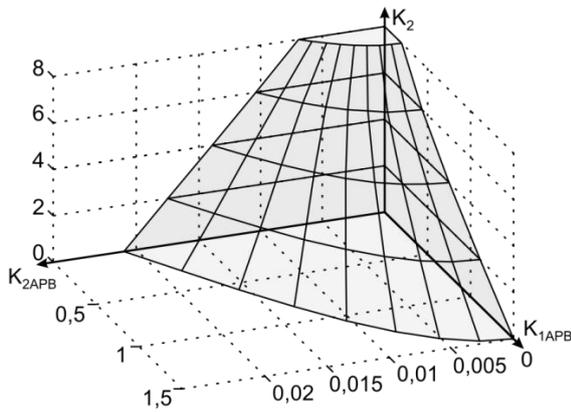


Рис. 13. Область устойчивости в координатах коэффициентов регулирования УПК и АРВ

Области устойчивости для системы с регулируемым УПК и устройством АРВ по методу общего приращения режима. Используя частные производные, по методу общего приращения режима построена граница *D*-разбиения в координатах K_{1APB} , K_{2APB} (рис. 14).

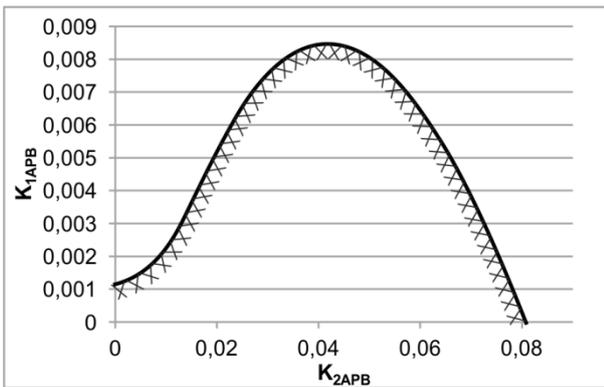


Рис. 14. Граница *D*-разбиения при использовании метода общего приращения режима

Исследовано влияние коэффициента усиления K_{OU} АРВ СД генератора. Исследования проводились для значений коэффициента усиления в 20, 40, 50, 300 единиц. При $K_{OU} = 20$ получили наименьшую область устойчивости, при $K_{OU} = 40$ – наибольшую (рис. 15, здесь и далее штриховка области не производится для более наглядного представления вида областей; принято, что направление штриховки соответствует штриховке на рис. 14).

Проведено изучение влияния коэффициента K_2 на область устойчивости (рис. 16). Установлено, что при уменьшении K_2 пределы изменения коэффициентов АРВ СД увеличиваются. Это объясняется тем, что увеличение K_2 ведет к более быстрому изменению сопротивления УУПК и, соответственно, более быстрому выходу на режим переком-

пенсации, что ведет за собой сокращение области.

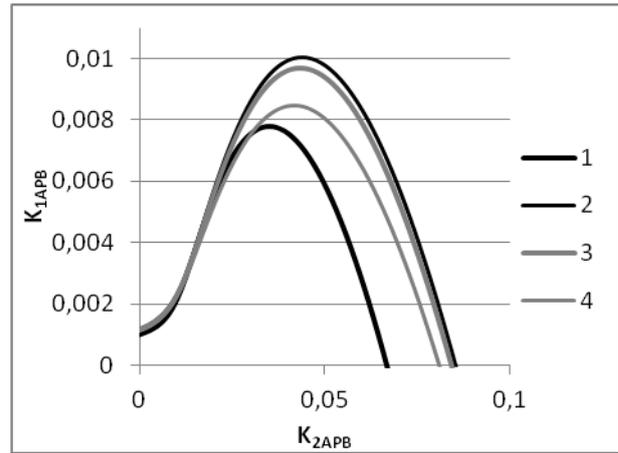


Рис. 15. Граница *D*-разбиения при изменении коэффициента усиления АРВ: 1 – $K_{OU} = 20$; 2 – $K_{OU} = 40$; 3 – $K_{OU} = 50$; 4 – $K_{OU} = 200$

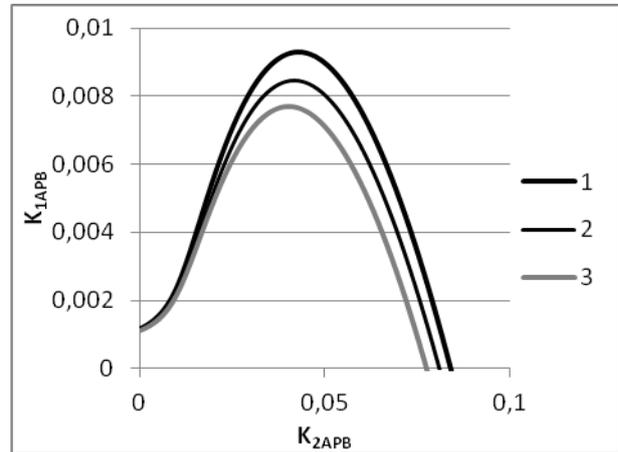


Рис. 16. Граница *D*-разбиения при изменении коэффициента регулирования K_2 УУПК: 1 – $K_2 = 1$; 2 – $K_2 = 2$; 3 – $K_2 = 3$

Дальнейшие исследования проведены для анализа влияния изменения значения сопротивления устройства УПК (исходной степени компенсации индуктивного сопротивления линии) на поведение границ области (рис. 17). Уменьшение значения сопротивления УУПК ведет к увеличению области устойчивости. Это происходит из-за того, что при уменьшении сопротивления УУПК снижается степень компенсации, увеличивается сопротивление связи между генератором и системой, поэтому требуется большее регулирующее воздействие АРВ генератора для поддержания необходимого уровня напряжения на выводах генератора.

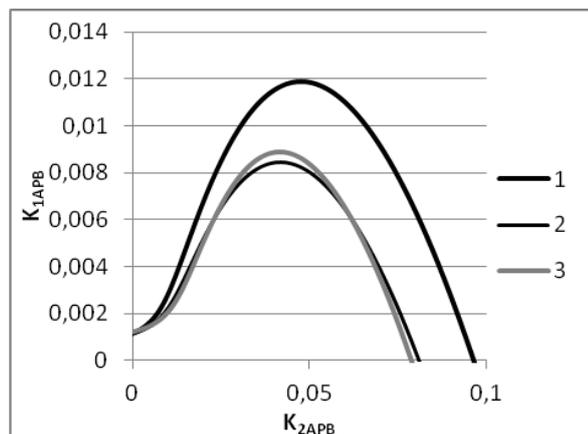


Рис. 17. Граница D -разбиения при изменении степени компенсации линии: 1 – $X_{УПК} = 1,3$; 2 – $X_{УПК} = 1,6$; 3 – $X_{УПК} = 1,8$

Выводы. Анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать ряд важных выводов:

1. Предложенная методика совместного получения возможных настроечных параметров регулирования УПК и АРВ позволяет выбирать коэффициенты, оказывающие положительное влияние на устойчивость исследуемой ЭЭС при осуществлении регулирования с помощью этих устройств. Подбор коэффициентов позволяет увеличить предел передаваемой мощности, улучшить апериодическую статическую и динамическую устойчивость, а также отстроиться от колебательной неустойчивости ЭЭС, обусловленной спецификой закона регулирования УПК.

2. Определенные диапазоны изменения параметров регулирования УПК и АРВ для исходного рабочего режима и при увеличении регулирующего воздействия со стороны УПК свидетельствуют об уменьшении указанного диапазона для параметров регулирования АРВ.

3. Приведенные результаты показывают, что применение упрощенной модели для анализа колебательной устойчивости дает большое расхождение с вычислительным экспериментом, использующим более детальное математическое описание. Таким образом, применение упрощенной модели для анализа колебательной устойчивости в уже существующей электроэнергетической системе нецелесообразно.

4. Существующее расхождение обусловлено тем, что в исследуемой системе присутствует большое количество нелинейных элементов (УУПК, АРВ, синхронный генератор), а упрощенная модель не учитывает электромагнитные переходные процессы в элементах ЭЭС.

5. Коэффициенты регулирования АРВ, выбранные при использовании упрощенной модели, входят в область устойчивости, полученную при более детальном математическом описании. Соответственно, для выбора коэффициентов регулирования применение упрощенной модели допустимо. Для более точного выявления границы устойчивости необходимо использование более полной математической модели.

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. **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.
3. **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.
4. **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.
5. **Mallesham M., Vathsala S.** Hybrid Series Capacitive Compensation Scheme In Damping Power System Oscillations Using TCSC // *International Journal of Engineering Research and Applications*. – January 2014. – Vol. 4, Issue 1 (Version 1). – P. 266–270.
6. **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)* ISSN: 2278-067X Recent trends in Electrical and Electronics & Communication Engineering (RTEECE 17th – 18th April 2015), 2015. – P. 62–68.
7. **Саженов А.В.** Статические характеристики электропередачи с управляемыми шунтирующими реакторами // *Электричество*. – 2006. – № 3. – С. 17–21.
8. **Электрические** системы. Т. 1. Математические задачи электроэнергетики / под ред. В.А. Веникова. – М.: Высш. шк., 1970. – 336 с.
9. **Веников В.А., Анисимова Н.Д., Долгинов А.И.** Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1964.
10. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
11. **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.

References

1. Dyakov, A.F. *Elektricheskie seti sverkh- i ul'travysokogo napryazheniya EES Rossii. Teoreticheskie i prakticheskie osnovy: v 3 t.* [Electric networks of extra- and ultrahigh voltage of the Unified Power System of Russia.

Theoretical and practical bases: in 3 vol.]. Moscow, NTF «EnergoProgress» Korporatsii «EEEEK», 2012.

2. Shakaryan, Yu.G., Fokin, V.K., Likhachev, A.P. Us-tanovivshiesya rezhimy raboty elektroenergeticheskikh sis-tem s setevymi ustroystvami gibkikh elektropredach [Steady state modes of electric power systems with flexible power transmission devices]. *Elektrichestvo*, 2013, no. 12, pp. 2–13.

3. Antonov, A.V., Fokin, V.K., Tuzlukova, E.V. O pri-menanii ustroystv prodol'noy kompensatsii v vysokovol'tnykh elektricheskikh setyakh Rossii [On applying longitudinal compensation devices in Russian high-voltage electric networks]. *Energiya edinoy seti*, 2013, no. 2(7), pp. 66–73.

4. Golov, V.P., Martirosyan, A.A., Moskvina, I.A. Raschet kharakteristik ustanovivshikhsya rezhimov elek-troenergeticheskoy sistemy s reguliruемым ustroystvom prodol'noy kompensatsii [Calculation of steady-state modes characteristics of electrical power engineering systems with controlled series compensation devices]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 6, pp. 18–22.

5. Malleham, M., Vathsal, S. Hybrid Series Capacitive Compensation Scheme In Damping Power System Oscillations Using TCSC. *International Journal of Engineering Research and Applications*, January 2014, vol. 4, issue 1 (Version 1), pp. 266–270.

6. Vaibhav, Desai, Vivek, Pandya, Anilkumar, Mar-kana. Enhancement of Transient Stability of Power Sys-

tem with Variable Series Compensation. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2015, pp. 62–68.

7. Sazhenkov, A.V. Statische kharakteristiki elektropredachi s upravlyaemyimi shuntiruyushchimi reaktora-mi [Steady state characteristics of the electric power transmission system with controlled shunt reactors]. *Elektrichestvo*, 2006, no. 3, pp. 17–21.

8. 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.

9. 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.

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

11. Golov, V.P., Moskvina, I.A. Vybor kharakteristik reguliruемого 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.

Голов Валерий Павлович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем,

e-mail: golov@ispu.ru

Golov Valery Pavlovich,

Ivanovo State Power Engineering University,

Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Electric Power Systems Department,

e-mail: golov@ispu.ru

Градов Николай Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

бакалавр кафедры электрических систем,

e-mail: gradov1996@yandex.ru

Gradov Nikolai Aleksandrovich,

Ivanovo State Power Engineering University,

Student of the Electric Power Systems Department,

e-mail: gradov1996@yandex.ru

Кормилицын Дмитрий Николаевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

аспирант кафедры электрических систем,

e-mail: dnk@es.ispu.ru

Kormilitsyn Dmitry Nikolayevich,

Ivanovo State Power Engineering University,

Postgraduate Student of the Department of Electric Power Systems,

e-mail: dnk@es.ispu.ru

Скоропеева Екатерина Сергеевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

бакалавр кафедры электрических систем,

e-mail: ses37@bk.ru

Skoropeyeva Ekaterina Sergeevna,

Ivanovo State Power Engineering University,

Student of the Electric Power Systems Department,

e-mail: ses37@bk.ru

Чуркина Юлия Олеговна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

бакалавр кафедры электрических систем,

e-mail: churkina_y_o@mail.ru

Churkina Yulia Olegovna,

Ivanovo State Power Engineering University,

Student of the Electric Power Systems Department,

e-mail: churkina_y_o@mail.ru