

Робастный адаптивный регулятор для демпфирования межрайонных колебаний в электроэнергетической системе¹

БЕЛЯЕВ А.Н., ЯДЫКИН И.Б., СМОЛОВИК С.В., СПИРИДОНОВ С.В., ГРИГОРЬЕВ А.А.

Рассматривается задача проектирования робастного адаптивного регулятора для демпфирования электромеханических межсистемных колебаний в электроэнергетической системе. Многоконтурный робастный адаптивный регулятор состоит из регуляторов отдельных генераторов, работающих параллельно с существующими автоматическими регуляторами возбуждения. Приводятся результаты вычислительных экспериментов с моделью трехрайонной электроэнергетической системы, в которой в контуре возбуждения генератора введен адаптивный робастный регулятор

Ключевые слова: электроэнергетические системы, колебания, адаптивное управление, робастное управление, регуляторы с заданной структурой, проектирование

Задача разработки адаптивных регуляторов с заданной структурой известна более полувека и относится к числу классических задач теории управления [1]. Основными методами синтеза подобных систем являются:

метод настройки, основанный на однократном решении задачи синтеза параметров регулятора, в том числе на основе решения линейных матричных неравенств;

метод автоматической настройки, основанный на применении релейной обратной связи;

метод непрямого адаптивного управления или неявной эталонной модели.

В энергетике применение методов адаптивного и робастного управления для демпфирования электромеханических и межсистемных колебаний и повышения устойчивости электроэнергетических систем интенсивно исследуется на протяжении двух последних десятилетий [2–8]. Это объясняется тем, что регуляторы заданной структуры, спроектированные традиционными методами, могут работать только внутри ограниченной рабочей области. Более сложные регуляторы, например адаптивные, робастные или регуляторы с переменной структурой, могут обеспечить удовлетворительное демпфирование межсистемных колебаний внутри гораздо более широких областей рабочих режимов.

The problem of designing a robust adaptive controller for damping electromechanical interarea swings in an electric power system is considered. The proposed multiloop robust adaptive controller consists of controllers of individual generators operating in parallel with the existing automatic excitation controllers. Results of numerical experiments are presented that were carried out on a model of a three-area electric power system containing an adaptive controller introduced in the generator excitation loop.

Key words: electric power systems, swings, adaptive control, robust control, controllers with a preset structure, designing

В [9] предложен подход к построению координированного противоаварийного управления на основе применения гибких систем передачи переменного тока (FACTS). Предложены принципы построения координирующей управляющей системы, устраняющей перегрузки, вызванные короткими замыканиями на линиях. Предлагаемый метод основан на использовании линеаризованных моделей энергосистем, которые описываются дифференциально-алгебраическими уравнениями.

В [10] предложен метод оценивания параметров моделей, описываемых дифференциально-алгебраическими уравнениями, который основан на использовании нескольких наблюдателей, работающих параллельно с одним и тем же массивом данных. Для идентификации параметров моделей авторы предлагают использовать метод наименьших квадратов, а сама параметрическая идентификация используется для диагностики и обнаружения отказов оборудования и систем управления. В данном случае метод наименьших квадратов используется для отыскания псевдорешения системы матричных алгебраических уравнений настройки регулятора и оптимизации параметров неявной эталонной модели.

В [11] предложен метод синтеза регулятора для демпфирования электромеханических колебаний путем воздействия одновременно на отношение мощностей и фазовые соотношения статических синхронных последовательных компенсаторов. Метод основан на определении функций чувствитель-

¹Статья написана по результатам исследований в рамках международного проекта ICOEUR (см. «Электричество», 2011, № 4).

ности собственных чисел системы к изменению ее параметров.

В [12] предлагается метод проектирования и верификации дискретного адаптивного регулятора для демпфирования межсистемных колебаний. Частью регулятора является идентификатор, определяющий параметры упрощенной модели доминирующей моды колебаний. Идентификатор играет роль предсказателя, а алгоритм адаптации использует фазовое опережение, создаваемое предсказателем, для демпфирования колебаний с помощью «быстрого» регулятора, в то время как управление перетоками реализуется с помощью «медленного» регулятора.

В [13] рассмотрен самонастраивающийся регулятор для демпфирования колебаний с использованием гибких систем передачи переменного тока (FACTS). В качестве идентификатора используется фильтр Калмана, а метод настройки регулятора основан на теории модального управления. Такие методы связаны с применением наблюдателей состояния, поэтому порядок синтезированного регулятора равен порядку модели электроэнергетической системы, что является недостатком данного метода.

В ряде работ рассматриваются общие принципы автоматического противоаварийного управления [4–8], где вопросы демпфирования колебаний рассматриваются в более общем контексте, в связи с решением важной задачи мониторинга степени устойчивости электроэнергетической системы.

Постановка и решение задачи H_2 – оптимального синтеза адаптивного робастного регулятора. Линейная система управления, состоящая из динамического объекта и регулятора заданной структуры, задана в пространстве состояний системой уравнений вида:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_p(t) &= \mathbf{A}_p \mathbf{x}_p(t) + \mathbf{B}_p \mathbf{u}(t); & \ddot{\mathbf{y}} \\ \mathbf{x}_p(0) &= \mathbf{x}_{p0}; \quad \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_p \mathbf{x}_p(t); & \dot{\mathbf{y}} \\ \dot{\mathbf{x}}_c(t) &= \mathbf{A}_{cm0} \mathbf{x}_c(t) + \mathbf{G}_1 [\mathbf{g}(t) - \mathbf{y}(t)]; & \dot{\mathbf{y}} \\ \mathbf{x}_{cm}(0) &= \mathbf{x}_{cm0}; \quad \mathbf{g}(0) = \mathbf{g}_0; & \dot{\mathbf{y}} \\ \mathbf{u}(t) &= \mathbf{C}_{cm} \mathbf{x}_c(t) + \mathbf{G}_2 [\mathbf{g}(t) - \mathbf{y}(t)]; & \mathbf{p} \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{x}_p , \mathbf{x}_c и \mathbf{y} , \mathbf{g} , \mathbf{u} – векторы состояний объекта, регулятора: выхода объекта, задания, выхода регулятора: $\mathbf{x}_p \in \mathbb{R}^{n_2}$, $\mathbf{x}_c \in \mathbb{R}^{n_1}$, \mathbf{u} , \mathbf{y} , $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^r$ и \mathbf{A}_{cm} , \mathbf{C}_{cm} , $\mathbf{G}_1 = \mathbf{B}_c$, $\mathbf{G}_2 = \mathbf{D}_c$ – матрицы параметров регулятора размерности $[n_1 \times n_1]$, $[r \times n_1]$, $[n_1 \times r]$, $[r \times r]$ соответственно.

Считаем, что регулятор имеет фиксированную структуру. Предположим, что объект (1) полностью управляем и наблюдаем, реализации $(\mathbf{A}_p, \mathbf{B}_p, \mathbf{C}_p)$, $(\mathbf{A}_{cm}, \mathbf{B}_c, \mathbf{C}_{cm}, \mathbf{D}_c)$ минимальны, а матрицы $\mathbf{A}_p, \mathbf{B}_p, \mathbf{C}_p$, известны или могут быть вычислены на этапе

параметрической идентификации. Целью регулирования является слежение за выходом для произвольного изменения параметров объекта внутри некоторой ограниченной области S . Характерной особенностью настройки регуляторов является то, что структура регулятора не меняется в процессе настройки и настраиваются только параметры матриц \mathbf{G}_1 и \mathbf{G}_2 . Далее используем обобщенный вектор настроек $\mathbf{G} = [\mathbf{G}_1 \ \mathbf{G}_2]$. Целью настройки регулятора на основе использования принципа постоянства внутренней модели контура управления является достижение равенства $\mathbf{y}_m(t) = \mathbf{y}(t)$, где $\mathbf{y}_m(t)$ – выход неявной (виртуальной) эталонной модели системы (1) при условии, что на вход объекта подан тестовый сигнал $\mathbf{g}(t)$ и параметры объекта характеризуются параметрической неопределенностью вида $\mathbf{A}_p, \mathbf{B}_p, \mathbf{C}_p \in S$ ($S: a_{p_{ij}} \in [a_{p_{ij}}^-, a_{p_{ij}}^+]; b_{p_{ij}} \in [b_{p_{ij}}^-, b_{p_{ij}}^+]; c_{p_{ij}} \in [c_{p_{ij}}^-, c_{p_{ij}}^+]$).

Таким образом, первая цель сводится к решению основной задачи адаптивного управления: каким образом, зная идентифицированные параметры объекта, настроить параметры регулятора, чтобы обеспечить совпадение выходов многосвязной системы с выходами ее виртуальной (неявной) эталонной модели.

Уравнения движения неявной эталонной модели разомкнутого контура управления имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_m &= \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m + \mathbf{B}_m \mathbf{g}; \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}_m \mathbf{x}_m + \mathbf{D}_m \mathbf{g}; \\ \mathbf{x}_m &\in \mathbb{R}^{n_1+n_2}, \text{ причем } \mathbf{x}_m^T = [\mathbf{x}_{pm}^T \ \mathbf{x}_{cm}^T]; \\ \mathbf{A}_m &= \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{A}}_p & 0 \\ \hat{\mathbf{A}}_c & \hat{\mathbf{A}}_{cm} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_m = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{B}}_p \\ \hat{\mathbf{B}}_c \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C}_m = [\mathbf{C}_{pm} \ 0]; \\ \mathbf{D}_m &= [0 \ \mathbf{G}_{2m}]. \end{aligned}$$

Уравнения движения неявной эталонной модели замкнутого контура управления могут быть описаны системой уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_{pm}(t) &= \mathbf{A}_{pm} \mathbf{x}_{pm}(t) + \mathbf{B}_{pm} \mathbf{u}(t); & \ddot{\mathbf{y}} \\ \mathbf{x}_{pm}(0) &= \mathbf{x}_{p0}; \quad \mathbf{y}_m(t) = \mathbf{C}_{pm} \mathbf{x}_{pm}(t); & \dot{\mathbf{y}} \\ \dot{\mathbf{x}}_{cm}(t) &= \mathbf{A}_{cm} \mathbf{x}_{cm}(t) + \mathbf{G}_{1m} [\mathbf{g}(t) - \mathbf{y}(t)]; & \dot{\mathbf{y}} \\ \mathbf{x}_{cm}(0) &= \mathbf{x}_{cm0}; \quad \mathbf{g}(0) = \mathbf{g}_0; & \dot{\mathbf{y}} \\ \mathbf{u}_m(t) &= \mathbf{C}_{cm} \mathbf{x}_c(t) + \mathbf{G}_{2m} [\mathbf{g}(t) - \mathbf{y}_m(t)]; & \mathbf{p} \end{aligned} \quad (2)$$

где векторы состояния объекта и регулятора, выхода объекта и управления имеют ту же размерность, что в системе (1).

Процедура настройки регулятора после выполнения идентификации объекта состоит из двух этапов: однократного синтеза параметров регулятора в номинальном режиме;

оптимальной настройки параметров регулятора по заданному критерию настройки.

Целевое условие в частотной области в предположении нулевых начальных условий имеет вид:

$$W(j\omega) = W_m(j\omega), \quad \forall \omega \in \mathbb{R}, \quad (3)$$

где W — матричная передаточная функция разомкнутой системы.

Для номинального режима линеаризованной системы имеем $W(s) = W_m(s)$, где $W_m(s)$ — матричная передаточная функция эталонной модели разомкнутой системы. Перейдем от равенства передаточных функций к равенству полиномов, порожденных этими передаточными функциями; этому соответствует следующее полиномиальное уравнение настройки регулятора [19]:

$$C_p (I_s - A_p)^{-1} B_p C_{cm} (I_s - A_{cm})^{-1} G_1 + C_p (I_s - A_p)^{-1} B_p G_2 = C_{pm} (I_s - A_{pm})^{-1} B_{pm} C_{cm} (I_s - A_{cm})^{-1} G_{1m} + C_{pm} (I_s - A_{pm})^{-1} B_{pm} G_{2m}. \quad (4)$$

Применяя разложение резольвент, стоящих в левой и правой части равенства, и умножая обе его части на произведение характеристических полиномов объекта, регулятора, неявной эталонной модели объекта и неявной эталонной модели регулятора, получим равенство матричных полиномов.

Определим следующие матрицы адаптируемости $L = [L_{m1} \quad L_{m2}]$, $N^T = [N_{m1} \quad N_{m2}]$ и функционал настройки:

$$J_1 = \sum_{m=0}^{2n_2+n_1-1} \text{tr}(P_m^T N_m^T (P_m^T N_m^T)^T);$$

$$P_m = \sum_{h=1}^2 L_{mh} G_h, \quad N_m = N_{m1} + N_{m2};$$

$$L_{m1} = \sum_{s=0}^{n_2} \sum_{i=j}^{n_2-1} \sum_{h=n}^{n_1-1} a_{ms} a_{cmh+1} a_{j+1} C A^{i-j} B C_{cm} A_{cm};$$

" s, h, i: s + h + i = m

$$L_{m2} = \sum_{s=0}^{n_2} \sum_{i=j}^{n_2-1} \sum_{n=0}^{n_j} a_{ms} a_{cmn} a_{i+1} C A^{i-j} B;$$

" s, n, i: s + n + i = m

$$N_{m1} = \sum_{s=0}^{n_2} \sum_{i=j}^{n_2-1} \sum_{h=n}^{n_1-1} a_s a_{cmh+1} a_{i+1} C_m A_m^{i-j} B_m C_{cm} A_{cm}^h G_{1m};$$

" s, h, i: s + h + i = m

$$N_{m2} = \sum_{s=0}^{n_2} \sum_{i=j}^{n_2-1} \sum_{n=0}^{n_1} a_s a_{cmn} a_{i+1} C_m A_m^{i-j} B_m.$$

" s, n, i: s + n + i = m

Здесь tr — след матричной функции.

Требуется найти решение H_2 -задачи квадратичной оптимизации: $J_1 \circledast \min J_1$.

Для того чтобы минимизировать функционал J_1 , необходимо решить эквивалентное матричное алгебраическое уравнение [14]: $LG = N$.

Минимизирует H_2 -норму функционала J_1 матрица G_{opt} , которая является приближенным решением уравнения

$$G_{opt} = (L)^+ N. \quad (6)$$

Здесь и далее обозначение $(\)^+$ — это псевдоинверсная матрица по Муру—Пенроузу. Для реализации алгоритма необходимо знание матриц параметров объекта, которые могут быть получены с помощью соответствующего алгоритма идентификации (в данном случае не рассматривается).

Заметим, что при решении первой задачи оптимизации настроек регулятора необходимо знать параметры матриц эталонной модели регулятора и объекта соответственно. Наиболее простой способ задания матриц состоит в том, что значения параметров матриц считаются равными их значениям в выбранном номинальном режиме. Выбор значений параметров матриц регулятора можно осуществить с помощью любого метода синтеза регулятора для непрерывных стационарных систем управления. Однако для систем с многими входами и многими выходами (МВМВ) задача синтеза является далеко не тривиальной. Она особенно сложна, если речь идет об удовлетворении требований к показателям качества регулирования, таких, как время регулирования, перерегулирование, число колебаний в переходном процессе.

Постановка и решение задачи h_2 -редукции эталонной модели разомкнутого контура управления. Равенство (6), в свою очередь, можно записать в виде

$$W_{pm}(s) W_{cm}(s) = W_{ml}(s). \quad (7)$$

В левой части равенства стоит передаточная функция основной эталонной модели разомкнутого контура, которая определяется значениями параметров матриц объекта и регулятора, а в правой части — матричная передаточная функция аппроксимирующей эталонной модели низкого порядка, которая в общем случае может иметь порядок не выше 2-го:

$$\sum_{m=0}^{n_1+n_2-1} M_{mm} s^m = \frac{M_{mn-1} s^{n-1} + \dots + M_{ml} s + M_{m0}}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} =$$

$$= \frac{M_{ml1}s + M_{ml0}}{a_{ml2}s^2 + a_{ml1}s + am10}, \quad (8)$$

где матричные коэффициенты полинома числителя матричной передаточной функции эталонной модели разомкнутой системы $M_{mm} = [M_{mm}^{ik}]_{[r' r]}$, $M_{mlm} = [M_{mlm}^{ik}]_{[r' r]}$ и скалярные коэффициенты a_z его характеристического уравнения могут быть найдены из правой части уравнения (6):

$$M_{mm} = \sum_{j=0}^m (a_{cmj} C_{pm} A_{pmj} B_{pm} G_{2m} + C_{pm} A_{pmj} B_{pm} C_{cm} A_{cmj} G_{1m}),$$

$$a_z = \sum_{n=0}^z a_{pmz-n} a_{cmn}.$$

Постановка задачи оптимизации параметров основной эталонной модели разомкнутой системы управления. Дано: порядок и коэффициенты характеристического уравнения основной эталонной модели разомкнутой системы управления, то же эталонной модели низкого порядка, коэффициенты числителя эталонной модели низкого порядка. Требуется найти элементы матриц:

$$M_{mm}^{ik} = \arg \min J^\circ, \quad i = 1, 2, \dots, r; \quad k = 1, 2, \dots, r. \quad (9)$$

Введем сетку частот $w_s = [w_{s1} w_{s2} \dots w_{sq}]$. Для фиксированного значения частоты

$$\sum_{m=0}^{n_1+n_1+1} \hat{a} (jw_s)^m \sum_{l=0}^m (M_{mm}^{ik} a_{ml} - M_{mlm}^{ik} a_l) = \text{Re}_s^{ik} + j \text{Im}_s^{ik} = 0. \quad (10)$$

Не снижая общности, будем считать, что $n = n_1 + n_2 + 1 = 2p$, ($p = 0, 1, 2, \dots$). Иными словами n – четное число, тогда действительная и мнимая части уравнения (10) определяются формулами:

$$\text{Re}_s^{ik} = \sum_{p=0}^{n/2} (-1)^p (w_s)^{2p} \sum_{l=0}^{2p} (M_{m2p-l}^{ik} a_{ml} - M_{ml2p-l}^{ik} a_l);$$

$$\text{Im}_s^{ik} = \sum_{p=0}^{(n/2)+1} (-1)^{p-1} (w_s)^{2p-1} \sum_{l=0}^{2p-1} (M_{m2p-1-l}^{ik} a_{ml} - M_{ml2p-1-l}^{ik} a_l).$$

Введем вектор неизвестных коэффициентов:

$$X^T = [M_{m0}^{ik} M_{m1}^{ik} M_{m2}^{ik} \dots M_{mn-1}^{ik}]$$

тогда (11) можно переписать в следующем виде:

$$\text{Re}_s^{ik} = L_{1s}^{ik} X^T + Q_{1s}^{ik};$$

$$\text{Im}_s^{ik} = L_{2s}^{ik} X^T + Q_{2s}^{ik}, \quad (12)$$

где

$$L_{1s}^{ik} = [a_{m0} - w_s^2 a_{m2} - w_s a_{m1} - w_s^2 a_{m0} + w_s^4 a_{m2} \dots \dots w_s^n a_{m2}];$$

$$L_{2s}^{ik} = [w_s a_{m1} - w_s a_{m0} - w_s^3 a_{m2} - w_s^3 a_{m1} \dots w_s^{n+1} a_{m2}];$$

$$Q_{1s}^{ik} = [M_{m0}^{ik} a_{m0} - w_s^2 (M_{m0}^{ik} a_{m2} + M_{m1}^{ik} a_{m1}) + w_s^4 (M_{m0}^{ik} a_{m4} + M_{m1}^{ik} a_{m3}) + \dots + (-1)^{n/2} w_s^n (M_{m0}^{ik} a_{mn} + M_{m1}^{ik} a_{mn-1})];$$

$$Q_{2s}^{ik} = [w_s (M_{m0}^{ik} a_{m1} + M_{m1}^{ik} a_{m0}) + w_s^3 M_{m0}^{ik} a_{m3} + M_{m1}^{ik} a_{m2}) + \dots + (-1)^{n/2} w_s^{n+1} M_{m1}^{ik} a_{mn}].$$

Введем функционалы вида:

$$J_s^{ik} = \text{tr}[(\text{Re}_s^{ik})^2 + (\text{Im}_s^{ik})^2] = [(\text{Re}_s^{ik})^2 + (\text{Im}_s^{ik})^2];$$

$$J_s^{ik} = \text{tr} \sum_{s=1}^q [(\text{Re}_s^{ik})^2 + (\text{Im}_s^{ik})^2];$$

$$J = \text{tr} \sum_{i=1}^r \sum_{k=1}^r \sum_{s=1}^q [(\text{Re}_s^{ik})^2 + (\text{Im}_s^{ik})^2].$$

Условия минимума функционала J для фиксированного значения частоты имеют вид:

$$\frac{\partial J_s^{ik}}{\partial M_0^{ik}} = 2 \text{Re}_s^{ik} (a_{m0} - w_s^2 a_{m2}) + 2 \text{Im}_s^{ik} w_s a_{m1} = 0;$$

$$\dots \dots \dots (13)$$

$$\frac{\partial J_s^{ik}}{\partial M_{n-1}^{ik}} = 2 \text{Re}_s^{ik} w_s^n a_{m1} + 2 \text{Im}_s^{ik} (-w_s^{n-1} a_{m0} + w_s^{n+1} a_{m2}) = 0.$$

Введем обозначения:

$$L_{1s}^{ik} = \begin{pmatrix} \hat{e} L_{1s}^{ik} (a_{m0} - w_s^2 a_{m2}) + L_{2s}^{ik} w_s a_{m1} \\ \hat{e} \dots \dots \dots \hat{e} L_{1s}^{ik} w_s^n a_{m2} + L_{2s}^{ik} (w_s^{n-1} a_{m0} + w_s^{n+1} a_{m2}) \end{pmatrix} \begin{matrix} \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \\ \dots \\ \hat{u} \end{matrix};$$

$$\tilde{Q}_{1s}^{ik} = \begin{pmatrix} \hat{e} Q_{1s}^{ik} (a_{m0} - w_s^2 a_{m2}) + Q_{2s}^{ik} w_s a_{m1} \\ \hat{e} \dots \dots \dots \hat{e} Q_{1s}^{ik} w_s^n a_{m2} + Q_{2s}^{ik} (w_s^{n-1} a_{m0} + w_s^{n+1} a_{m2}) \end{pmatrix} \begin{matrix} \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \\ \dots \\ \hat{u} \end{matrix}.$$

С учетом новых обозначений перепишем (13) в виде:

$$\mathbf{L}_S^{ik} \mathbf{X} = \tilde{\mathbf{Q}}_S^{ik}. \quad (14)$$

Вектор оптимальных значений параметров неявной эталонной модели разомкнутого контура, являющийся решением задачи оптимизации для фиксированной частоты, представляет собой решение уравнения (14) при условии, что ранг матрицы \mathbf{L}_S^{ik} максимален:

$$\mathbf{X}_{ik}^* = \arg \min J_S^{ik} = (\mathbf{L}_S^{ik})^{-1} \tilde{\mathbf{Q}}_S^{ik}. \quad (15)$$

Решение оптимизационной задачи на сетке частот является обобщением решения задачи оптимизации для фиксированной частоты. Введем расширенную матрицу \mathbf{L} и расширенный вектор \mathbf{Q} вида:

$$\mathbf{L}^{ik} = \begin{bmatrix} \hat{e}_1 \mathbf{L}_1 \hat{u} \\ \hat{e}_2 \mathbf{L}_2 \hat{u} \\ \hat{e}_3 \mathbf{L}_3 \hat{u} \\ \hat{e}_q \mathbf{L}_q \hat{u} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Q}^{ik} = \begin{bmatrix} \hat{e}_1 \mathbf{Q}_1 \hat{u} \\ \hat{e}_2 \mathbf{Q}_2 \hat{u} \\ \hat{e}_3 \mathbf{Q}_3 \hat{u} \\ \hat{e}_q \mathbf{Q}_q \hat{u} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{L}_S = [\mathbf{L}_S^{ik}]; \quad \mathbf{Q}_S = [\mathbf{Q}_S^{ik}],$$

$$s = 1, 2, \dots, q; \quad i = 1, 2, \dots, r; \quad k = 1, 2, \dots, r.$$

С учетом введенных обозначений уравнение (14) запишем в виде:

$$\mathbf{L}^{ik} \mathbf{X} = \mathbf{Q}^{ik}.$$

Если ранг матрицы \mathbf{L}^{ik} максимальный, то оптимальное решение по форме аналогично решению (6) и является единственным:

$$\mathbf{X}_{ik}^{**} = \arg \min J^{ik} = [(\mathbf{L}^{ik})^T \mathbf{L}^{ik}]^{-1} (\mathbf{L}^{ik})^T \mathbf{Q}^{ik}.$$

Полученное решение позволяет определить все параметры скалярной передаточной функции неявной эталонной модели полного порядка $W^{ik}(s)$, связывающей изображение i -го входа и k -го выхода разомкнутой системы управления по показателям качества, определенным с помощью аппроксимирующей неявной эталонной модели низкого (второго) порядка. Для определения всех параметров матричной неявной эталонной модели полного порядка потребуется решить r^2 аналогичных задач оптимизации.

Синтез робастной желаемой эталонной модели полного порядка. Отметим, что в данном случае методы H_∞ -теории робастного управления используются для того, чтобы усилить свойства робастности системы управления, которые обеспечивают мето-

ды адаптивного управления. Наиболее естественным приемом является применение теории робастного управления для синтеза желаемой эталонной модели разомкнутого контура полного порядка, а наиболее простым методом синтеза является метод, основанный на анализе H_∞ -нормы передаточной функции эталонной модели замкнутой системы управления. Введем матричные передаточные функции:

$$\begin{aligned} S &= (I + W_p W_c)^{-1}; \\ T &= W_p W_c (I + W_p W_c)^{-1}; \\ R &= W_c (I + W_p W_c)^{-1}. \end{aligned} \quad (16)$$

Запасы устойчивости замкнутой системы управления определяются неравенствами [16]:

$$A_m \leq 1 / \|T\|_\infty; \quad \text{dq} \leq 2 \arcsin \frac{1}{2 \|T\|_\infty}$$

в которых H_∞ -норма передаточной функции замкнутой системы управления определяется равенствами:

$$\begin{aligned} \|T\|_\infty &= \sup_s |w|; \quad 0 < w < \infty; \\ s(w) &= \max_i \sqrt{\text{eig}_i T^*(jw)T(jw)}. \end{aligned}$$

Для того чтобы норма существовала, передаточная функция замкнутой системы должна быть правильной. Поскольку мы ограничились параметрической неопределенностью интервального типа, следует рассматривать аддитивную вариацию передаточной функции объекта

$$W_p = W_{p0} + D W_p.$$

Достаточное условие робастной устойчивости в нашем случае имеет вид:

$$\|D W_{p0} W_c (I + W_{p0} W_c)^{-1}\|_\infty < g < 1.$$

Другой подход к анализу робастности основан на методах H_2 -теории робастности и вычислении H_2 -нормы матричной передаточной функции:

$$\|W\|_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{tr}[W^*(jw)W(jw)] dw}. \quad (17)$$

Чем больше значение нормы, тем робастность системы управления ниже. Для адаптивного регулятора целесообразно сравнивать уровни робастности настроенной и ненастроенной системы управления с уровнем робастности неявной эталонной модели разомкнутой или замкнутой системы управления. Для того чтобы норма существовала,

передаточная функция системы должна быть правильной и устойчивой. Поэтому мерой робастности могут служить нормы [11]:

$$\|W - W_m\|_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{tr} [W^*(j\omega)W_m^*(j\omega)][W(j\omega) - W_m(j\omega)]^T d\omega} \quad (18)$$

$$\|F - F_m\|_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{tr} [F^*(j\omega)F_m^*(j\omega)][F(j\omega) - F_m(j\omega)]^T d\omega} \quad (19)$$

Здесь W, W_m — передаточные функции разомкнутой системы управления и ее эталонной модели; F, F_m — то же замкнутой системы управления и ее эталонной модели.

Если передаточные функции системы и ее эталонной модели строго правильные, устойчивые и их полюса s_i являются простыми, то для их вычисления можно использовать равенства [11]:

$$\begin{aligned} \|W(s)\|_2^2 &= \sum_{i=1}^n \text{tr} [\text{Res} W(s_i)W^T(-s_i)] = \\ &= \sum_{i=1}^n \left. \frac{\text{tr} [M(s)M^T(-s)]}{N(-s) \frac{d}{ds} N(s)} \right|_{s=s_i} \end{aligned} \quad (20)$$

где $M(s)$ и $N(s)$ — числитель и знаменатель матричной передаточной функции соответственно.

Экспериментальное исследование трехрайонной электроэнергетической системы. Для трехрайонной ЭЭС простой структуры «машина – линия – шины бесконечной мощности» был предложен адаптивный регулятор с передаточной функцией вида:

$$W_i(s) = \frac{g_1 s + g_2}{1 + 70s + 5000} \quad (21)$$

В качестве расчетных приняты параметры g_1 и g_2 . Исследовалось поведение линеаризованной системы управления, в которой параметры g_1 и g_2 были рассчитаны с помощью алгоритма (6). Отмечен эффект стабилизации динамических характеристик системы, что выражается в меньших диапазонах разброса собственных чисел характеристического уравнения замкнутой системы с настроенным регулятором по сравнению с этими диапазонами для регулятора без настройки.

Для тестирования возможностей адаптивного робастного регулятора была рассмотрена трехрайонная модель электроэнергетической системы, представленная на рис. 1 [20].

Представление каждой станции рассматриваемой системы основано на комплексной математической модели, включающей синхронный генератор, описываемый полными уравнениями Горева–Парка (без учета быстропереходных процессов статорных цепей), автоматический регулятор воз-

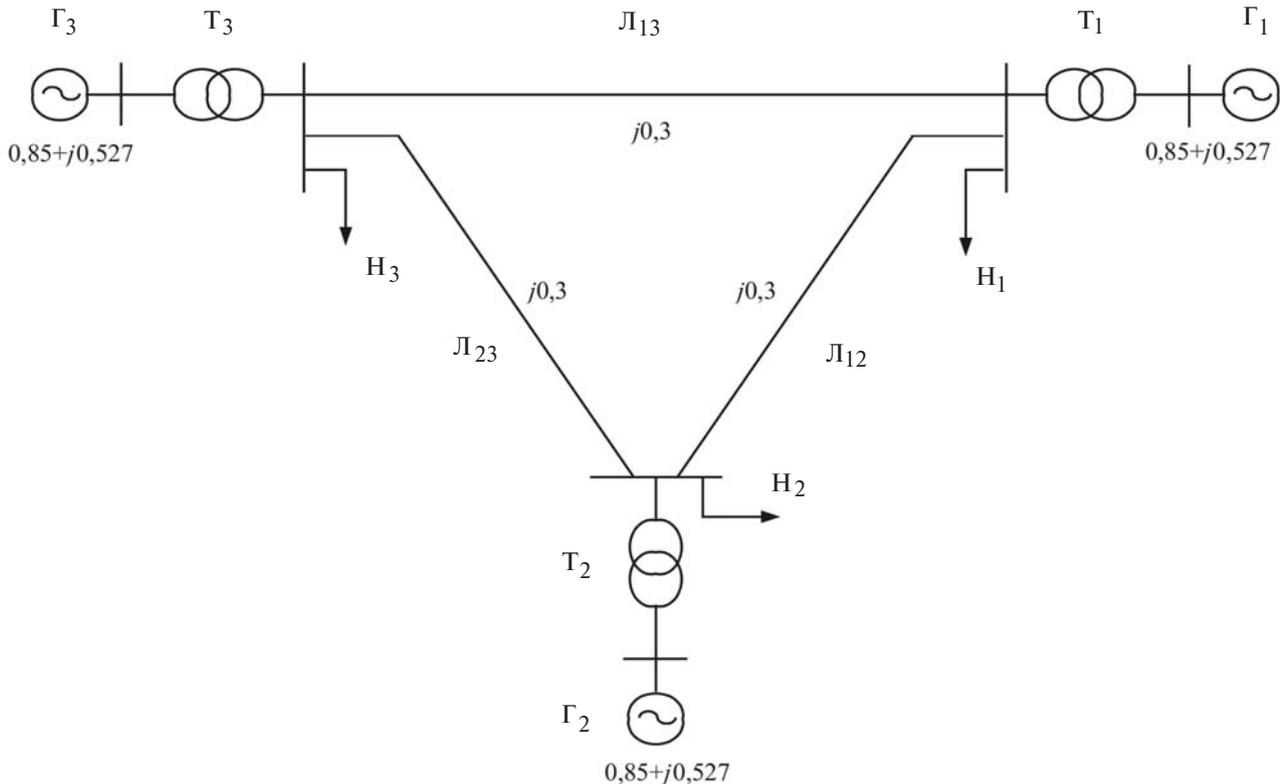


Рис. 1. Модель трехрайонной энергосистемы

буждения (АРВ) и упрощенную систему регулирования турбины. Адаптивный робастный регулятор использовался в контуре возбуждения 1-го генератора.

В качестве тестового при расчетах статической и динамической устойчивости использовался традиционный АРВ сильного действия (АРВ-СД), оптимальные настройки которого были получены с помощью метода D-разбиения (рис. 2).

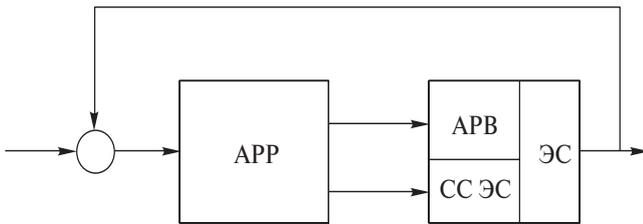


Рис. 2. Схема подключения адаптивного робастного регулятора при проведении вычислительного эксперимента: АРР – адаптивный робастный регулятор; АРВ – автоматический регулятор возбуждения; СС ЭС – система стабилизации энергосистемы

Параметры нагрузок приведены в табл. 1.

Таблица 1

Номер режима	Нагрузка					
	H_1		H_2		H_3	
	G_n	B_n	G_n	B_n	G_n	B_n
1-й исходный	0,5	-0,25	0,7	-0,35	1,3	-0,65
2	0,5	-0,25	1,2	-0,6	0,8	-0,4
3	0,9	-0,45	1,2	-0,6	0,4	-0,2
4	1,3	-0,65	0,8	-0,4	0,4	-0,2
5	1,3	-0,65	0,3	-0,15	0,9	-0,45

Результаты модального анализа приведены в табл. 2.

На графиках рис. 3 показано поведение системы после короткого замыкания на 20-й секунде. Показания снимались со второго выхода первого генератора (поведение второго и третьего генераторов аналогично).

Заключение. Достоинством H_2 -алгоритмов оптимальной настройки является прямое задание показателей качества регулирования путем задания неявной эталонной модели, независимость стационарной точки в пространстве настроечных параметров от начальных значений параметров объекта, а также то, что найденное решение обеспечивает глобальный минимум функционала настройки. С другой стороны, контроль евклидовой нормы Фробениуса матричной передаточной функции замкнутой системы, позволяет судить о приближении замкнутой системы к границе устойчивости.

Таблица 2

Мода колебаний в ЭЭС		Оптимальные настройки регуляторов	
без АРР	с АРР	g_1	g_2
2-й режим			
-1,1374 - 0,6319i -1,1374 + 0,6319i	-0,8856 - 0,6405i -0,8856 + 0,6405i	1096 970 1233	249 223 277
-0,8315 - 12,1087i -0,8315 + 12,1087i	-0,9030 - 12,1235i -0,9030 + 12,1235i		
-0,8299 - 12,1422i -0,8299 + 12,1422i	-0,8186 - 12,1570i -0,8186 + 12,1570i		
-0,6249 - 1,8354i -0,6249 + 1,8354i	-2,1279 - 1,8195i -2,1279 + 1,8195i		
3-й режим			
-1,1379 - 0,6318i -1,1379 + 0,6318i	-0,8819 - 0,6384i -0,8819 + 0,6384i	1017 974 1399	212 221 309
-0,8304 - 12,1024i -0,8304 + 12,1024i	-0,8391 - 12,0858i -0,8391 + 12,0858i		
-0,8295 - 12,1307i -0,8295 + 12,1307i	-0,7050 - 12,0888i -0,7050 + 12,0888i		
-0,6250 - 1,8354i -0,6250 + 1,8354i	-2,1502 - 1,7907i -2,1502 + 1,7907i		
4-й режим			
-1,1382 - 0,6315i -1,1382 + 0,6315i	-0,8799 - 0,6370i -0,8799 + 0,6370i	995 1078 1407	188 239 307
-0,8302 - 12,0854i -0,8302 + 12,0854i	-0,8298 - 12,1376i -0,8298 + 12,1376i		
-0,8287 - 12,1335i -0,8287 + 12,1335i	-0,5749 - 11,9564i -0,5749 + 11,9564i		
-0,6249 - 1,8354i -0,6249 + 1,8354i	-2,1614 - 1,7653i -2,1614 + 1,7653i		
5-й режим			
-1,1388 - 0,6314i -1,1388 + 0,6314i	-0,8806 - 0,6372i -0,8806 + 0,6372i	957 1266 1216	188 280 265
-0,8288 - 12,0765i -0,8288 + 12,0765i	-0,5784 - 11,9523i -0,5784 + 11,9523i		
-0,8282 - 12,1196i -0,8282 + 12,1196i	-0,8281 - 12,1211i -0,8281 + 12,1211i		
-0,6249 - 1,8354i -0,6249 + 1,8354i	-2,1600 - 1,7648i -2,1600 + 1,7648i		

Экспериментальное исследование трехрайонной электроэнергетической системы с использованием трех адаптивных робастных регуляторов в системах возбуждения генераторов показало, что при выбранных параметрах неявной эталонной модели не происходит существенного увеличения модуля вещественной части мод низкочастотных колебаний, что объясняется действием глубоких обратных связей автоматических регуляторов системы возбуждения генераторов, работающих параллельно с адаптивными робастными регуляторами. Однако сте-

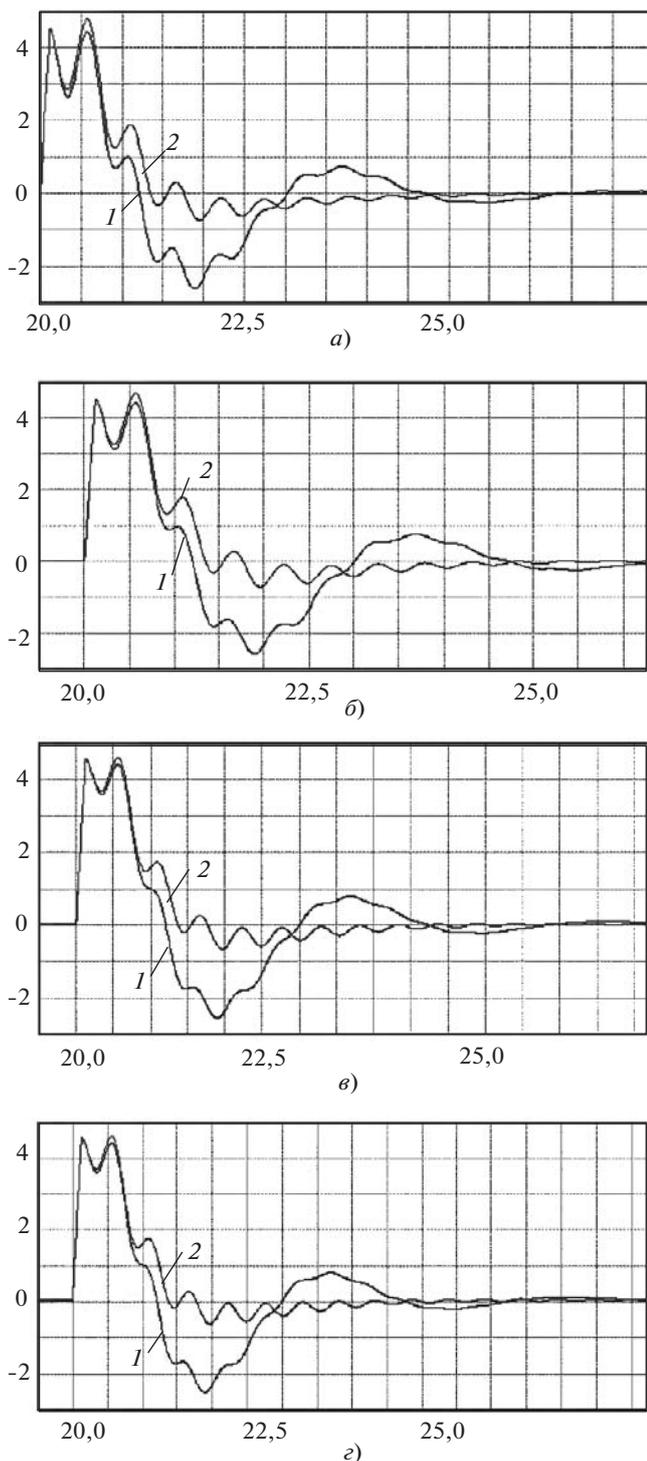


Рис. 3. Переходные процессы по частоте, вызванные коротким замыканием на линии 12 на 20-й секунде: а – 2-й режим; б – 3-й; в – 4-й; г – 5-й; 1 – в системе нет регулятора; 2 – на каждом генераторе установлен регулятор

пень демпфирования колебаний мод определяется не только полюсами, но и нулями матричной передаточной функции разомкнутой системы, которые изменяются под действием алгоритмов адаптивного робастного регулирования. Поскольку параметры неявной эталонной модели были выбраны такими, чтобы обеспечить максимальное демпфиро-

вание колебаний мод на номинальном режиме на всем множестве режимов, которое должно превосходить степень демпфирования колебаний в системе АРВ без использования адаптивных робастных регуляторов, то степень демпфирования колебаний в системе АРВ с использованием адаптивных робастных регуляторов в конечном счете оказывается существенно выше, несмотря на то, что моды низкочастотных колебаний изменяются незначительно. Сравнение результатов применения адаптивных робастных регуляторов в однорайонной и трехрайонной ЭЭС показывает, что эффект увеличения степени демпфирования за счет применения адаптивных робастных регуляторов в трехрайонной системе зависит от числа применяемых адаптивных робастных регуляторов в системах управления возбуждением генераторов отдельных районов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ротац В.Я. Теория автоматического управления: Учебник для вузов. 2-е изд. — М.: Изд-во МЭИ, 2004.
2. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. — Л.: Наука, 1985.
3. Rogers G. Power Systems Oscillations. — Norwell, MA: Kluwer, 2004.
4. Энергетика XXI века. Системы энергетики и управление ими/Под ред. Н.И. Воропая. — Новосибирск: Наука, 2004.
5. Аюев Б.И., Жуков А.В. Новые подходы к мониторингу запаса устойчивости электроэнергетических систем. — Сб. докладов 3-й Международ. научно-технической конф. «Энергосистема: управление, конкуренция, образование». — Екатеринбург, 2008.
6. Аюев Б.И., Шульгинов Н.Г., Кошечев Л.А. Развитие принципов, алгоритмов и задач автоматического противоаварийного управления в ЭЭС России. — Сб. докладов 3-й Международ. научно-технической конф. «Энергосистема: управление, конкуренция, образование». — Екатеринбург, 2008.
7. Воропай Н.И., Ефимов Д.Н., Решетов В.И. Анализ механизмов развития системных аварий в электроэнергетических системах. — Электричество, 2008, №10.
8. Войтов О.Н., Воропай Н.И., Гамм А.З. и др. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем. — Новосибирск: Наука, 1999.
9. Etingov P., Oudalov A., Voropai N. et al. Coordinated emergency control of load shedding and FACTS devices. — «2005 IEEE», St. Petersburg (Russia), 27–30 June 2005.
10. Scholtz E., Larsson M., Korba P. Real-Time Parameter Estimation of Dynamic Power Systems Using Multiple Observers. — Proc. CD «Power Tech. 2007», Lausanne (Switzerland), 1–5 July 2007, Paper ID # 533.
11. Sigquist L., Rouco L. Damping Electromechanical Oscillations with Both Ratio and Phase Modulation of Static Synchronous Series Sources: Controller Design. — Proc. CD «Power Tech. 2007», Lausanne (Switzerland), 1–5 July 2007, Paper ID # 509.
12. Johanson N.P., Nee H.P., Angquist L. Adaptive Control of Controlled Series Compensators for Power Systems Stability

Improvement. — Proc. CD «Power Tech. 2007», Lausanne (Switzerland), 1—5 July 2007.

13. **Corba P., Larsson M., Retanz C.** Detection of oscillations in Power systems using Kalman filtering techniques. — Proc. of 2003 IEEE Conf. on Control Applications, June 2003, vol. 1.

14. **Smolovik S.A., Belyaev A.G., Yadykin I.B.** Adaptive robust controller for elektromechanical and interarea oscillations damping in the power systems. — The 4-th Intern. Conf. «Liberalization and Modernization of Power Systems: Coordinated Monitoring and Control towards Smart Grids», Irkutsk (Russia), 13—17 July 2009.

15. **Lizalek N., Ladnova A., Tonyshev V., Danilov N.** Structural Organization of Electromechanical Oscillations in Power Systems and Stability. — The 4th Intern. Conf. «Liberalization and Modernization of Power Systems: Coordinated Monitoring and Control towards Smart Grids», Irkutsk (Russia), 13—17 July 2009.

16. **McFarlane D., Glover K.** A Loop Shaping Design Procedure Using H_∞ Synthesis. — IEEE Trans. on Automatic Control, 1992, 37(6).

17. **Поляк Б.Т., Щербаков П.С.** Робастная устойчивость и управление. — М.: Наука, 2002.

18. **Баландин Д.В., Коган М.М.** Линейные матричные неравенства в задаче робастного H_∞-управления по выходу. — ДАН, 2004, т. 396, №6.

19. **Левинштейн М.Л., Щербачев О.В.** Статическая устойчивость электрических систем. — СПб: СПбГТУ, 1994.

20. **Наумкин И.Е.** Цифровая электромагнитная модель электрической системы для исследования высокого и сверхвысокого напряжения. — Труды Международ. науч.-техн. конф. «Передача энергии переменным током». — Новосибирск, 2003, т. 2.

*Авторы: **Беляев Андрей Николаевич** окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ) в 1997 г. В 2000 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка и оптимизация регулирования возбуждения мощных генераторов» в СПбГПУ. Зам. декана, доцент СПбГПУ.*

***Ядыкин Игорь Борисович** окончил МВТУ им. Баумана в 1961 г. В 1975 г. защитил докторскую диссертацию по спецтеме в Институте проблем управления РАН. Заведующий лабораторией Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН).*

***Смоловик Сергей Владимирович** окончил Ленинградский политехнический институт (ныне СПбГПУ) в 1963 г. В 1988 г. защитил докторскую диссертацию «Математические методы моделирования переходных процессов мощных генераторов» в СПбГПУ. Зав. отделением ОАО «НИИ по передаче электроэнергии постоянного тока высокого напряжения».*

***Спирidonov Сергей Владимирович** окончил РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина в 2006 г. Аспирант ИПУ РАН.*

***Григорьев Алексей Алексеевич** окончил Московский инженерно-физический институт в 2009 г. Аспирант ИПУ РАН.*

* * *

ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении (стоимость по договоренности).

При повторении той же рекламы в следующем номере — скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах — скидка 20%. Стоимость оплаты рекламных статей — по договоренности. Последний срок представления рекламного материала — за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648

тел./факс: (7-495)362-7485

E-mail: l.s.kudinova@rambler.ru