Шаршеналиев Ж., Абдылдаев Р.Н.

МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ В УПРАВЛЕНИИ КОЛЕБАНИЯМИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Zh. Sharshenaliev, R.N. Abdyldaev

METHOD OF DYNAMIC PROGRAMMING IN OSCILLATION HANDLING IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

УДК: 621.311.: 681.513

Решается задача управления колебательными электромеханическими процессами в электроэнерГетических системах на основе устройств FACTS методом динамического программирования Р.Беллмана.

Problem of oscillating electromechanical processes handling in electric power systems is solved on the basis of FACTS assemblies by means of Bellman's method of dynamic programming.

Введение. Современные новые технологии FACTS в электроэнергетике обеспечивают во мнго раз более быстрое срабатывание всех механизмов, реализующих управляющие алгоритмы. Это позволяет значительно продвинуться математическим методам в сфере внедрения в электроэнергетику. В частности, методам модального управления (размещение корней характеристического уравнения замкнутой системы, вычеты передаточных функций в комплексной плоскости и др.) [1,2].

Высокоскоростное исполнение алгоритмов управления средствами FACTS позволит расширить область внедрения в электроэнергетику и других методов математической теории оптимального управления, в том числе динамического программирования Р.Беллмана, принципа максимума Л.С.Понтрягина, метода для задач с ограничениями Кротова-Гурмана. В работе [3] изложены идеи использования динамического программмирования для гашения колебаний в электроэнергетических системах, когда критерий качества зависит только от производной состояния управляемой системы.

В данной работе приведены результаты численных расчетов для подобных систем на примере колебаний математического маятника.

Постановка задачи. Модель колебаний имеет вид [4]:

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} = \pm\frac{g}{L}x + \frac{1}{ML^2}u,$$

где знаки «+» или «–» соответствуют неустойчивому и устойчивому положениям равновесия, $g = 10;\ L = 1;\ M = 1$.

Рассмотрим сначала критерий качества, который содержит функцию $x(t)$ и ее производную $\frac{dx}{dt}$ [4]:

$$J_0 = \int_0^\infty [100x^2 + 100\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + u^2]dt \cdot$$

Обозначим $x_1 = x,\quad x_2 = \frac{dx}{dt}$, для расчетов выбираем конечный интервал времени, минимизируемый критерий качества J_0 запишем в виде

$$J = \gamma_1\int_0^T \left[100x_1^2 + 100x_2^2\right]dt + \beta\int_0^T u^2 dt,$$

где $\gamma_1 \rangle\ 0,\quad \beta \rangle\ 0,\quad T \langle\ \infty$.

1) Неустойчивое положение равновесия. Модель имеет вид

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2,\quad x_1(0) = 10,$$

$$\frac{dx_2}{dt} = +\frac{g}{L}x_1 + \frac{1}{ML^2}u,\quad x_2(0) = -25 \cdot \qquad (1)$$

Корни характеристического уравнения $\det(A - \lambda E) = 0$ системы (1) равны $\lambda_1 = 3.1623;\quad \lambda_2 = -3.1623$. Матрица $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ +10 & 0 \end{pmatrix}$, вектор $b = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$.

Графики функций $x_1(t), x_2(t)$ при $u = 0$ приведены на рис. 1.

Задача. Найти управление $u(t, x_1(t), x_2(t))$ в виде обратной связи и соответствующее ему решение $x_1(t), x_2(t)$ системы (1), минимизирующие критерий J.

Задачу решаем методом динамического программирования Р.Беллмана [5]. Управляющую функцию $u(t)$ вычисляем по формуле

$$u(t) = -\frac{1}{\beta}b^* K(t)x(t),$$

где $K(t)$ - решение вспомогательного матричного дифференциального урав-нения типа Риккати, (*) - символ транспонирования. Получим рис. 1 – 4.

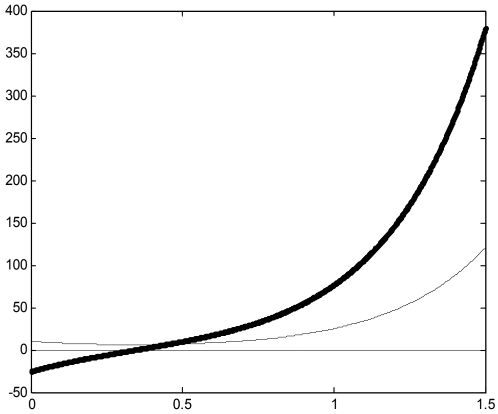

Рис. 1. Неустойчивое положение равновесия (1), $u=0$.

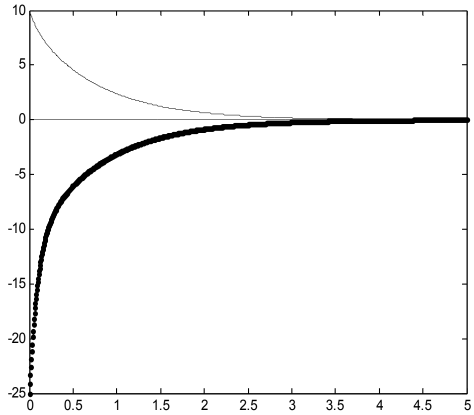

Рис. 4. Траектории для (1).

На рис. 1 и 4 жирной линией изображено $x_2(t)$.

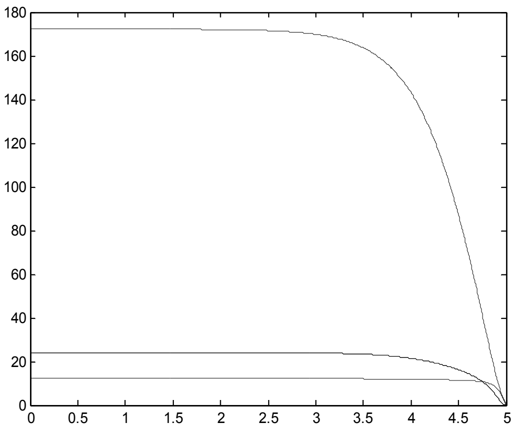

Рис. 2. Компоненты $k_{ij}(t)$ матричного дифференциального уравнения Риккати для (1).

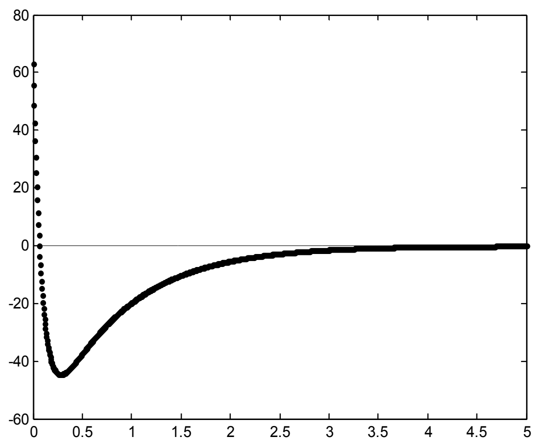

Рис. 3. Управление $u(t)$ для (1).

Корни характеристического уравнения замкнутой системы (1) равны

$$\lambda_1=-1.2948;\quad \lambda_2=-10.8770.$$

2) Устойчивое положение равновесия. Модель имеет вид

$$\frac{dx_1}{dt}=x_2,\quad x_1(0)=10,$$

$$\frac{dx_2}{dt}=-\frac{g}{L}x_1+\frac{1}{ML^2}u,\quad x_2(0)=-25\cdot \qquad (2)$$

Корни характеристического уравнения $\det(A-\lambda E)=0$ системы (2) равны $\lambda_1=0+3.1623i;\quad \lambda_2=0-3.1623i$. Матрица $A=\begin{pmatrix}0 & 1\\ -10 & 0\end{pmatrix}$.

Получим рис. 5 – 8.

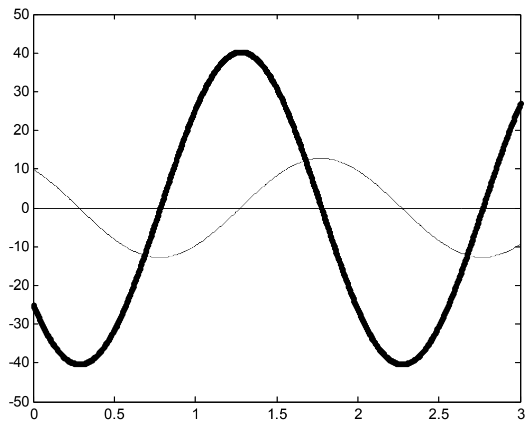

Рис. 5. Устойчивое положение равновесия (2), $u=0$.

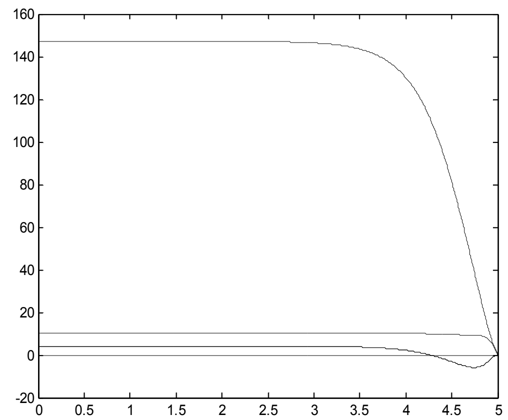

Рис. 6. Компоненты матричного дифференциального уравнения Риккати для (2).

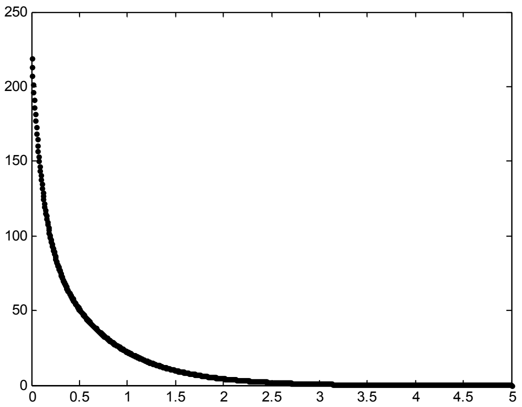

Рис. 7. Управление $u(t)$ для (2).

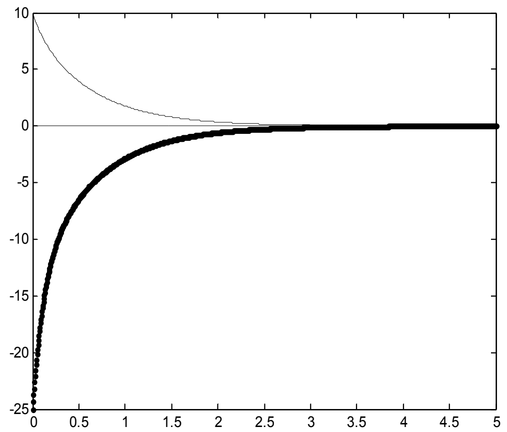

Рис. 8. Траектории для (2).

нКорни характеристического уравнения Корни характеристического уравнения замкнутой системы (2) равны $\lambda_1 = -1.6054$; $\lambda_2 = -8.7987$. Рис. 2, 6 показывают, что стационарные значения компонент $k_{ij}(t)$ матричной функции $K(t)$ совпадают с [4] с удовлетворительной точностью. Рис. 4, 8 показывают, что управления, изображенные на рис. 3, 7, успокаивают колебания маятника (1) и (2). В замкнутой системе управление вычисляется по формуле $u(t) = -\dfrac{1}{\beta} b^* \overline{K} x(t)$, где $\overline{K}$ - постоянная матрица, компоненты которой $\overline{k}_{ij}$ равны стационарным значениям компонент $k_{ij}(t)$.

Теперь рассмотрим критерий вида [3].

3). Минимизируемый критерий зависит только от производной состояния системы $\dfrac{dx(t)}{dt}$ [3]. Критерий качества запишем в виде

$$J = \gamma_1 \int_0^T \left[100 x_2^2\right] dt + \beta \int_0^T u^2 dt \cdot \qquad (3)$$

Матрица $Q1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 100 \end{pmatrix}$ или $Q1 = \begin{pmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 100 \end{pmatrix}$ с малым элементом $Q1(1,1) = 0.001$.

Для неустойчивого положения равновесия при $Q1(1,1) = 0$ получим рис. 9, 10.

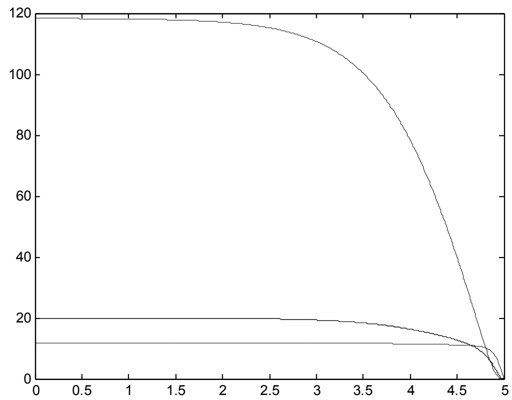

Рис. 9. Компоненты матричного диф. ур. Риккати для (1) при $Q1(1,1) = 0$.

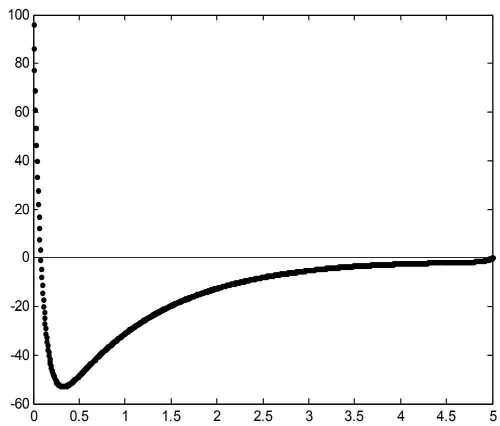

Рис. 10. Управление $u(t)$ для (1) при $Q1(1,1) = 0$.

Корни характеристического уравнения замкнутой системы с критерием (3) равны $\lambda_1 = -0.8904$; $\lambda_2 = -10.9161$.

4) Для устойчивого положения равновесия при $Q1(1,1) = 0$ получим рис. 11, 12.

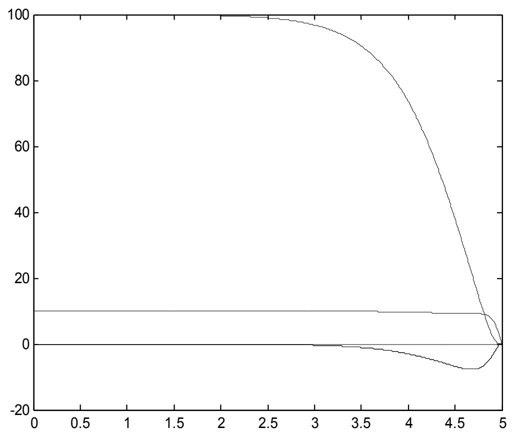

Рис. 11. Компоненты матричного диф. ур. Риккати для (2) при $Q1(1,1) = 0$.

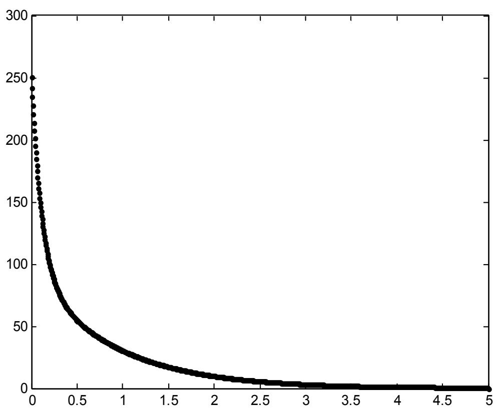

Рис. 12. Управление $u(t)$ для (2) при $Q1(1,1) = 0$.

Корни характеристического уравнения замкнутой системы с критерием (3) равны $\lambda_1 = -1.1138; \quad \lambda_2 = -8.8730$. Управления, изображенные на рис. 10, 12, также гасят колебания маятника, графики соответствующих траекторий $x_1(t), x_2(t)$ идентичны графикам, изображенным на рис. 4, 8.

Выводы. В рассмотренных примерах при минимизации критерия качества J, зависящего только от производной $\left(\frac{dx}{dt}\right)^2$, построено управление, которое успокаивает колебания систем (1) и (2).

Следовательно, метод динамического программирования в соответствии с [3] можно рекомендовать для включения в программное обеспечение системы FACTS и других с целью улучшения управления колебаниями в электроэнергетических системах.

Литература:

1. Шакарян Ю.Г. Управляемые (гибкие) системы передачи переменного тока (http: fsk-ees/ru/common/img/uploaded/managed systems.pdf).
2. Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Шаров Ю.В. Модальный синтез регуляторов энергосистемы на основе устройств FACTS. -Электротехника, 2007, №10.
3. Зеленохат Н.И., Поляков М.А., Зеленохат О.Н. Повышение эффективности управления электромеханическими колебаниями в электроэнергетических системах // М.: Электро, 2006, № 2. - С. 7 - 10.
4. Репин Ю.М., Третьяков В.Е. Решение задачи об аналитическом конструировании регуляторов на электронных моделирующих устройствах // АиТ, 1963, № 6. - С. 738 - 743.
5. Ройтенберг Я.Н. Автоматическое управление. - М.: Наука, 1978. -551с.

Резензент: к.тех.н., доцент Рырсалиев А.С.