вой, 2006. — 720 с.

2. Красовски А.А., Поспелов Г.С. Основы автоматики и технической кибернетики. — Л.: Госэнергоиздат, 1962. — 600 с.

3. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. – Изд. 2-е, стереотипное. — М.: Едиториал УРСС, 2004. — 400 с.

4. Крылов В.В. Построение моделей внутренней структуры динамических систем по входо-выходным соотношениям (теория абстрактной реализации) I. Обзор // АиТ. — 1984. —№2. — С. 5-19.

5. Изерман Р. Цифровые системы управления. — М.: Мир, 1984. — 530 с.

6. Острём К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ. — М.: Мир, 1987. — 480 с.

7. Kailath T. LinearSystems: Prentice-Hall. Englewood Cliffs, 1980. —682с.

8. Буков В.Н., Рябченко В.Н. Вложение систем. Проматрицы // Автоматика и телемеханика. — 2000. — № 5. — С. 20-33.

УДК 517.977

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЧНЫХ МЕТОДОВ

Т.Ф. Махмудов

Ташкентский государственный технический университет
Узбекистан, г. Ташкент
tox-05@yandex.ru

Аннотация

В статье изложен алгебраический подход к анализу и синтезу многосвязных систем на основе вложения систем, а также приведен пример синтеза оптимального регулятора синхронного генератора.

Ключевые слова: синтез оптимального регулятора, многосвязные системы, матрица коэффициентов, автоматический регулятор возбуждения, синхронный генератор.

SYNTHESIS OF OPTIMAL CONTROLLER USING MATRIX METHODS

T.F. Mahmudov

Tashkent State Technical University
Uzbekistan, Tashkent
tox-05@yandex.ru

Abstract

The article describes an algebraic approach to the analysis and synthesis of multiply-connected systems on the basis of attachments systems, and an example of synthesis of the optimal synchronous generator regulator.

Key words: synthesis of the optimal controller, multiply-connected system, the coefficient matrix, automatic excitation regulator, synchronous generator.

Актуальность работы

В статье показан подход к целенаправленной модификации методов синтеза регуляторов. Приведены модификации методов модального синтеза на основе функции Ляпунова в квадратичной форме и матричного уравнения Рикатти.

Введение

Число разработанных за последние три десятилетия методов размещения полюсов (модальные методы) и их разнообразных модификаций для многосвязных линейных систем, заданных в пространстве состояний, неуклонно растет и перевалило далеко за сотню. Все эти методы синтеза регуляторов для линейных систем, в основном, направлены на решение проблемы полюсов, т.е. проблемы формирования заданного характеристического полинома. Используемые до сих пор при синтезе разнообразные формы задания полюсов – корней характеристического знаменателя, не могут исчерпывающим образом решить «проблемы матричного числителя». Не могут решить потому, что в теории автоматического управления в отличие от математики как таковой не существует самой формулировки проблемы (за исключением нулей передачи квадратных систем) [1]. Изложенный в [2] новый алгебраический подход к анализу и синтезу многосвязных систем на основе вложения позволяет сформулировать и решить проблему матричного числителя в смысле его скалярного образа.

Проблематика

Рассмотрим линейные уравнения динамики стационарной системы, имеющие традиционный векторно-матричный вид [3]:

$$\overset{*}{x} = Ax + Bu, \tag{1}$$

$$y = Cx, \tag{2}$$

$$x(0) = x_0,$$

Предполагается, что система вполне управляема.

Задача оптимального управления в классической постановке решается традиционными методами.

В линейных стационарных системах при векторно-матричной модели объекта (1) и (2) синтез оптимального регулятора состояния, качество управления и их динамические показатели могут быть получены на основе матричных уравнений и матричной алгебры. Развитые матричные методы позволяют решать эту задачу компактно, а в некоторых случаях – и аналитически [4], тем более что для них разработаны современные методы решения матричных уравнений [1, 4, 5, 6].

Как отмечается в [1, 6, 7], данная задача находит решение на основе функции Ляпунова в квадратичной форме и, соответственно, матричного уравнения Ляпунова

$$A^T X + XA = -Q, \tag{3}$$

и матричного уравнения Риккати, получаемого из нижеследующих соображений.

Задан линейный закон управления [4, 6, 7, 8]:

$$U = -Kx, \tag{4}$$

где K – матрица, подлежащая определению, с параметрами, обеспечивающими оптимальный закон управления.

Необходимо добиться минимума интегрального функционала:

$$J = \int_0^\infty (x^T Qx + u^T Ku)dt. \tag{5}$$

Для достижения минимума (5) должно выполняться условие:

$$\min(\overset{*}{V} + x^T Qx + u^T Ru) = 0, \tag{6}$$

где

$$V = V(x) = x^T Px, \tag{7}$$

представляет функцию Ляпунова в квадратичной форме, а $P = P^T > 0$, $(P = X)$ находится из решения матричного уравнения Риккати:

$$A^T X + XA - XBR^{-1}B^T X = -Q, \tag{8}$$

где A, B, C, Q, R – заданные вещественные матрицы, определяемые исходя из параметров системы и ее режима, кроме того, $Q = Q^T > 0$, $R = R^T > 0$ – положительно определенные симметрические матрицы. В результате решения приведенных уравнений получают решение X, представляющее матрицу с оптимальными параметрами управления объектом и переменные состояния исследуемой системы.

Оптимальное управление объектом, описываемое линейными стационарными уравнениями (1), (2), с учетом (6), имеет вид:

$$u(t) = -R^{-1}B^T Xx(t) = Kx(t), \tag{9}$$

где

$$K = -R^{-1}B^T X. \tag{10}$$

Пример

В целях реализации возможности получения аналитических зависимостей матрицы коэффициентов и характеристического уравнения исследуемой системы проведем анализ для случая наличия автоматического регулятора возбуждения синхронного генератора сильного действия (АРВ-с), реагирующего на отклонения напряжения генератора ($\Delta U_Г$), угла нагрузки генератора ($\Delta\delta$) и первую производную угла $\left(d\Delta\delta/dt\right)$.

$$T_j\frac{d^2\delta}{dt^2}=-P_d\left(\frac{d\delta}{dt}\right)-\Delta P;$$
$$T_{do}\frac{dE'_q}{dt}=\Delta E_{qe}-\Delta E_q; \tag{11}$$
$$T_e\frac{dE_{qe}}{dt}=k_e\Delta e-\Delta E_{qe}.$$

Из вышеприведенных уравнений (11) выделим составляющую ΔE_{qe}, считая ее входным параметром:

$$\Delta E_{qe}=k_1\Delta\delta+k_2\frac{d(\Delta\delta)}{dt}+k_3\Delta E_q. \tag{12}$$

Введем обозначения:

$$\Delta\delta=x_1,\quad \frac{d(\Delta\delta)}{dt}=\frac{dx_1}{dt}=x_2,\ \Delta E_q=x_3,\ \ \Delta E_{qe}=u,\ u=-Kx,$$

$$u=u_1+u_2+u_3,\quad u_1=k_1\Delta\delta,\quad u_2=k_2\frac{d(\Delta\delta)}{dt},\quad u_3=k_3\,\Delta E_q.$$

Необходимо отметить, что знак минус в выражении $\mathbf{u}=-\mathbf{K}x$ означает необходимость наличия отрицательных обратных связей в системе АРВ для обеспечения устойчивости как системы управления, так и самой электрической системы [3].

Предположим, что выход исследуемой системы является линейной комбинацией переменных состояния (параметров режима) и описывается в виде:

$$y=\Delta\delta+2\cdot\Delta E_q=x_1+2x_3=\mathbf{C}x=[1\ \ 0\ \ 2]\begin{bmatrix}\mathbf{x_1}\\ \mathbf{x_2}\\ \mathbf{x_3}\end{bmatrix}. \tag{13}$$

Получим систему уравнений (14):

$$\frac{dx_1}{dt} = 0 \cdot x_1 + x_2 + 0 \cdot x_3 + 0 \cdot u_1 + 0 \cdot u_2 + 0 \cdot u_3,$$
$$\frac{dx_2}{dt} = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + 0 \cdot u_1 + 0 \cdot u_2 + 0 \cdot u_3, \qquad (14)$$
$$\frac{dx_3}{dt} = a_{31}x_1 + 0 \cdot x_2 + a_{33}x_3 + u_1 + u_2 + u_3,$$

Окончательно уравнения в переменных состояния

$$\begin{aligned} \overset{*}{x} &= Ax + Bu, \\ y &= Cx, \end{aligned} \qquad (15)$$

содержат матрицы вида:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & 0 & a_{33} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \dfrac{d(\Delta\,\delta)}{dt} \\ \Delta E_q \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = [1\ \ 0\ \ 2], \quad \mathbf{D} = [0], \qquad (16)$$

$$u = -Kx = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ k1 & k2 & k3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \dfrac{d(\Delta\,\delta)}{dt} \\ \Delta E_q \end{bmatrix},$$

где

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ k1 & k2 & k3 \end{bmatrix}, \; k_1 = (k_{0\delta} + k_{0U}\frac{\partial U_\Gamma}{d\delta}), \; k_2 = k_{1\delta}, \; k_3 = k_{0U}\frac{\partial U_\Gamma}{dE_q}. \qquad (17)$$

Уравнение (15) и ее сформированные матрицы при принятых условиях позволяют найти оптимальные параметры АРВ (17), обеспечивающие минимум среднеквадратичного функционала качества.

Выводы

При решении задачи оптимального выбора параметров регулятора вначале необходимо проверить, является ли исследуемая система управляемой и наблюдаемой [7, 8]. Если это не так, то синтез невозможен. Очевидно, что для определения этих свойств используются матрицы А, В, С уравнений переменных состояния (15), которые характеризуют входные и выходные параметры режима исследуемой системы.

Список литературы

1. Буков В.Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. – Калуга: Издательство Н.Ф. Бочкаревой, 2006. – 720 с.

2. Буков В.Н., Рябченко В.Н. Вложение систем. Синтез регуляторов // АиТ. – 2000. – № 7. – С. 3–14.

3. Аллаев К.Р., Мирзабаев А.М. Малые колебания электрических систем. – Т.: «Fan va texnologiya», 2011. – 316 с.

4. Мисриханов М.Ш. Инвариантное управление многомерными системами. – М.: Наука, 2007. – 284 с.

5. Икрамов Х.Д. Численное решение матричных уравнений. – М.: Наука, 1984. – 190 с.

6. Андреев Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами. –М.: Наука, 1976. – 423 с.

7. Дорф Р.К., Бишоп Р.Х. Современные системы управления // Пер.с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2004. – 832 с.

УДК 621.314

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХЗВЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

О.Г. Брылина, М.В. Гельман

Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г.Челябинск
teolge@mail.ru, mwg30@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена исследованию двухзвенного преобразователя частоты (ДПЧ). Приведена его принципиальная схема и виртуальная модель. Показаны временные диаграммы работы ДПЧ с активным выпрямителем напряжения и с неуправляемым выпрямителем на входе. Проведен спектральный анализ осциллограмм напряжения сети.

Ключевые слова: двухзвенный преобразователь частоты, активный выпрямитель напряжения, виртуальная модель, временные диаграммы, спектральный анализ.

RESEARCH OF VARIABLE ADJUSTABLE FREQUENCY CONVERTERS

O.G. Brylina, M.V. Gelman

** South Ural State University (national research university), Chelyabinsk*