

Министерство высшего образования и науки РФ
Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники
Кафедра экономической математики, информатики и статистики

«Управление в технических системах»

В.И.Смагин

Методические указания
к практическим и лабораторным работам для магистрантов
направления 09.04.01 «Информатика и вычислительная
техника»

Предлагаемые задания к лабораторным работам выполняются магистрантами в компьютерном классе с использованием пакета прикладных программ MATCAD. В приложении к описанию даны варианты исходных данных к заданиям.

Томск – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Аннотация.....	3
Перечень закрепленных за дисциплиной компетенций.....	4
Построение дискретной модели объекта.....	5
Локально-оптимальное управление с учетом ограничений на управление.....	6
Локально-оптимальное управление с использованием оценщиков.....	8
Адаптивное управление в случае трех неизвестных параметров (b_1 , b_2 и γ).....	10
Адаптивное управление в случае двух неизвестных параметров (b_1 и b_2).....	12
Адаптивное управление объектом с использованием алгоритма двухэтапной идентификации.....	14
Оптимальное управление линейным объектом 3-го порядка.....	17
Адаптивное управление линейным объектом 3-го порядка.....	19
Оптимальное управление нелинейным объектом 3-го порядка.....	22
Адаптивное управление нелинейным объектом 3-го порядка.....	24
ПРИЛОЖЕНИЕ. Варианты заданий к лабораторным работам.....	26
Литература.....	30

Аннотация

В учебно-методическом пособии приводятся задания к лабораторным работам, в которых рассмотрены задачи управления в технических системах. Лабораторные работы выполняются с использованием пакета прикладных программ Mathcad.

Пособие разработано для магистрантов ФВС, используется при изучении курса “Управление в технических системах”.

Перечень закрепленных за дисциплиной компетенций

Код	Формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции
ОК-1	Способность совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень	Должен знать: - терминологию, основные понятия и определения задач управления в технических системах;
ОК-5	Способность использования на практике умений и навыков в организации исследовательских и проектных работ, в управлении коллективом	- и применять на практике методы анализа и синтеза управления в технических системах.
ОК-9	Умение оформлять отчеты о проведенной научно-исследовательской работе и подготавливать публикации по результатам исследования	Должен уметь: - правильно выбирать методы управления в технических системах для решения конкретной задачи;
ПК-7	Способность применения перспективных методов исследования и решения профессиональных задач на основе знания мировых тенденций развития вычислительной техники и информационных технологий	- осуществлять расчет и анализ погрешностей метода; - понимать и применять на практике компьютерные технологии решения практических задач управления на основе знаний мировых тенденций развития вычислительной техники. Должен владеть: - навыками решения практических задач с использованием перспективных методов управления в технических системах.

Лабораторная работа № 1

ПОСТРОЕНИЕ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ

ЗАДАНИЕ

1. Для модели управляемого технического объекта с непрерывным временем

$$\dot{x}(t) = \bar{A}x(t) + \bar{B}u(t), \quad x(0) = x_0, \quad (1)$$

где

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} 1 & -\gamma b_2 \\ b_1 & b_1 \end{pmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{pmatrix} -b_2 \\ b_1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

составить программу решения дифференциального уравнения по методу Эйлера, преобразовав модель к дискретной форме:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k),$$

для шага интегрирования $\Delta t = 0,1$ (определить матрицы A и B). Построить графики переходных процессов для фондов и построить фазовый портрет, построить графики при критическом управлении u . Сравнить по точности два метода решения дифференциального уравнения при критическом u . Построить график абсолютной ошибки (исходные данные приведены в таблице 1).

2. Выполнить моделирование объекта со случайными возмущениями:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + q(k),$$

где $q(k)$ – гауссовская последовательность с характеристиками:

$$M\{q(k)\} = 0, \quad M\{q(k)q^T(j)\} = Q\delta_{k,j}.$$

Отметим, что аддитивные возмущения $q(k)$ вводятся для учета возможных ошибок в модели (матрица Q приведена в таблице 1).

3. Повторить моделирование (пункт 4) для матрицы

$$Q = \begin{pmatrix} 2,0 & 0,1 \\ 0,1 & 0,25 \end{pmatrix}.$$

Замечание. В этом случае необходимо извлечь корень из матрицы Q , т.е. дополнительно решить матричное уравнение $XX^T = Q$. Решение этого уравнения и будет корнем квадратным из матрицы.

4. В отчете привести результаты моделирования в виде графиков переходных процессов, фазовые портреты. Сделать выводы.

Лабораторная работа № 2

ЛОКАЛЬНО-ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ

Для дискретной модели

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + q(k), \quad x(0) = x_0, \quad (2)$$

решить задачу локально оптимального управления. Все исходные данные и варианты приведены в таблицах 1, 2. Матрица выхода системы равна

$$F = (0 \quad 1).$$

Оптимизируемый локальный критерий имеет вид:

$$J(k) = M\{(Fx(k+1) - z)^T C(Fx(k+1) - z) + u^T(k)Du(k)\}, \quad (3)$$

где C , D – весовые коэффициенты критерия (заданы в таблице 2).

ЗАДАНИЕ

1. Выполнить моделирование системы (2), реализовав локально-оптимальное управление

$$u(k) = -(B^T F^T CFB + D)^{-1} B^T F^T C[FAx(k) - z],$$

обеспечивающее слежение за z . Сначала задать матрицу $Q = 0$. Интервал времени: $k = 0, \dots, 140$.

Повторить моделирование для $Q \neq 0$ (см. таблицу 1). Исследовать влияние весового коэффициента C на качество слежения (задать $C=0,1$; $C=1$; $C=10$).

2. Выполнить моделирование с учетом ограничений на управление:

$$\bar{u}(k) = \begin{cases} 10,5 & \text{если } u(k) > 10,5; \\ u(k) & \text{если } 2,1 \leq u(k) \leq 10,5; \\ 2,1 & \text{если } u(k) < 2,1. \end{cases}$$

3. Для всех рассмотренных случаев построить графики переходных процессов и графики управлений. Сделать выводы.

Лабораторная работа № 3

ЛОКАЛЬНО-ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОЦЕНИВАТЕЛЕЙ

1. Для дискретной модели объекта

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + q(k), \quad x(0) = x_0, \quad (4)$$

выполнить моделирование системы (4), реализовав локально-оптимальное управление

$$u(k) = -(B^T F^T CFB + D)^{-1} B^T F^T C(FA\hat{x}(k) - z),$$

обеспечивающее слежение за траекторией z . Здесь $\hat{x}(k)$ – оценка фильтрации или экстраполяции. Диагональные элементы матрицы Q , весовые коэффициенты критерия C , D взять из таблиц 1, 2. Интервал времени: $k = 0, \dots, 140$.

Предполагается, что модель системы контроля имеет вид:

$$y(k) = Hx(k) + \eta(k),$$

где $\eta(k)$ – гауссовская случайная последовательность, независимая от $q(k)$, с характеристиками:

$$M\{\eta(k)\} = 0, \quad M\{\eta(k)\eta^T(j)\} = V\delta_{k,j},$$

Матрица системы контроля равна

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Реализовать уравнения фильтра Калмана:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + Bu(k) + K_f(k)[y(k+1) - H(A\hat{x}(k) + Bu(k))], \\ \hat{x}(0) &= \bar{x}(0), \end{aligned} \quad (5)$$

$$P_f(k+1/k) = AP_f(k)A^T + Q, \quad (6)$$

$$K_f(k) = P_f(k+1/k)H^T[HP_f(k+1/k)H^T + V]^{-1}, \quad (7)$$

$$P_f(k+1) = (E_2 - K_f(k)H)P_f(k+1/k), \quad P_f(0) = P_{f0}. \quad (8)$$

2. Повторить моделирование с использованием экстраполятора Калмана (этот случай позволяет учитывать возможные задержки поступления информации в системе контроля на 1 такт, результат можно обобщить на случай задержек на несколько тактов):

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + K_e(k)[y(k) - H\hat{x}(k)], \quad \hat{x}(0) = \bar{x}(0), \quad (9)$$

$$K_e(k) = AP_e(k)H^T(HP_e(k)H^T + V)^{-1}, \quad (10)$$

$$P_e(k+1) = (A - K_e(k)H)P_e(k)(A - K_e(k)H)^T + Q + K_e(k)VK_e^T(k), \quad P_e(0) = P_{e0}. \quad (11)$$

Начальные условия следующие $\hat{x}(0)$, диагональные элементы матриц $P_e(0) = P_f(0)$ приведены в таблице 3.

ЗАДАНИЕ

1. Исследовать качество оценивания в зависимости от матрицы $P_e(0)$, уменьшая и увеличивая диагональные элементы.

2. Для всех рассмотренных случаев построить графики переходных процессов их оценок и графики управлений. Сделать выводы.

Лабораторная работа № 4

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

В СЛУЧАЕ ТРЕХ НЕИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ (b_1 , b_2 и γ)

Для дискретной модели объекта

$$x(k+1) = A(\theta)x(k) + B(\theta)u(k) + q(k), \quad x(0) = x_0, \quad (12)$$

и заданного значения z решить задачу синтеза и моделирования адаптивного локально-оптимального управления. В (12) трехмерный вектор неизвестных параметров задается в виде:

$$\theta = \begin{pmatrix} 1 \\ b_1 \\ \frac{b_2}{b_1} \\ \gamma \end{pmatrix}.$$

Предполагается, что вектор θ является неизвестной константой. Это означает, что динамическая модель для вектора θ следующая:

$$\theta(k+1) = \theta(k), \quad \theta(0) = \theta_0, \quad (13)$$

где θ_0 – случайный вектор с характеристиками:

$$M\{\theta_0\} = \bar{\theta}_0, \quad M\{(\theta_0 - \bar{\theta}_0)(\theta_0 - \bar{\theta}_0)^T\} = P_{\theta_0}.$$

Выполнить моделирование системы (12), реализовав адаптивное управление в предположении, что вектор $x(k)$ контролируется точно без ошибок. Тогда адаптивное управление будет иметь вид:

$$u(k) = -[B^T(\hat{\theta}(k))F^T CFB(\hat{\theta}(k)) + D]^{-1} B^T(\hat{\theta}(k)) \times \\ \times F^T C[FA(\hat{\theta}(k))x(k) - z], \quad (14)$$

Определить матрицу $G(k) = G(x(k), u(k))$ и вектор $g(k) = g(x(k), u(k))$ из соотношения

$$x(k+1) = A(\theta)x(k) + B(\theta)u(k) + q(k) = G(k)\theta + g(k) + q(k). \quad (15)$$

В качестве алгоритма идентификации используется дискретный фильтр Калмана, построенный с использованием модели (13) и представлении объекта (12) в виде (15):

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + K_{\theta}(k)[x(k+1) - G(k)\hat{\theta}(k) - g(k)], \quad \hat{\theta}(0) = \bar{\theta}_0, \quad (16)$$

$$K_{\theta}(k) = P_{\theta}(k)G(k)^T [G(k)P_{\theta}(k)G(k)^T + Q]^{-1}, \quad (17)$$

$$P_{\theta}(k+1) = (E_3 - K_{\theta}(k)G(k))P_{\theta}(k), \quad P_{\theta}(0) = P_{\theta_0}. \quad (18)$$

Начальные условия для уравнения (16) следующие:

$$\hat{\theta}(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Матрица $P_{\theta}(0)$ диагональная (элементы матрицы приведены в таблице 3).

ЗАДАНИЕ

Построить графики переходных процессов, графики адаптивного управления и оценок неизвестных параметров. Исследовать влияние на качество идентификации диагональных элементов матрицы P_{θ_0} (увеличивая их в 10 и 100 раз), диагональных элементов матрицы Q (уменьшая их в 10 и 100 раз, при этом P_{θ_0} принимает исходное значение). Также исследовать влияние на качество оценок параметров ограничений на управление. Сделать выводы.

Лабораторная работа № 5

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

В СЛУЧАЕ ДВУХ НЕИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ (b_1 и b_2)

Для дискретной модели объекта

$$x(k+1) = A(\theta)x(k) + B(\theta)u(k) + q(k), \quad x(0) = x_0, \quad (19)$$

и заданного значения z синтезировать адаптивное управление.

В (19) вектор неизвестных параметров определить следующим соотношением:

$$\theta = \begin{pmatrix} 1 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_1 \end{pmatrix}.$$

Предполагается, что вектор θ является неизвестной константой.

Выполнить моделирование системы (19), реализовав адаптивное управление в предположении, что вектор $x(k)$ контролируется точно без ошибок. Тогда адаптивное управление будет иметь вид:

$$u(k) = -(B^T(\hat{\theta}(k))F^T CFB(\hat{\theta}(k)) + D)^{-1} B^T(\hat{\theta}(k))F^T \times \\ \times C(FA(\hat{\theta}(k))x(k) - z). \quad (20)$$

Диагональные элементы матрицы Q , весовые коэффициенты критерия C , D заданы в таблицах. Интервал времени: $k = 0, \dots, 200$.

В качестве алгоритма идентификации используется дискретный фильтр Калмана:

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + K_\theta(k)[x(k+1) - G(k)\hat{\theta} - g(k)], \quad \hat{\theta}(0) = \bar{\theta}_0, \quad (21)$$

$$K_\theta(k) = P_\theta(k)G(k)^T (G(k)P_\theta(k)G(k)^T + Q)^{-1}, \quad (22)$$

$$P_{\theta}(k+1) = (E_2 - K_{\theta}(k)G(k))P_{\theta}(k), \quad P_{\theta}(0) = P_{\theta_0}. \quad (23)$$

Начальные условия для уравнения (4) следующие:

$$\hat{\theta}(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Матрица $P_{\theta}(0)$ диагональная и задана в таблице 3.

Определить матрицу $G(x(k), u(k))$ и вектор $g(x(k), u(k))$. Учитывая, что 2-ая строка матрицы $G(x(k), u(k))$ нулевая, модифицировать уравнения фильтрации (21–23). Эта модификация позволит вместо полного вектора $x(k+1)$ в (21) использовать только 1-ю компоненту этого вектора.

ЗАДАНИЕ

1. Построить графики переходных процессов, графики адаптивного управлений и оценок неизвестных параметров. Результаты моделирования выполнить для 2-х случаев:

- а) без учета на ограничения;
- б) с учетом ограничений.

Сравнить качество оценок неизвестных параметров. Сделать выводы.

2. Выполнить моделирование в предположении, что контроль за состоянием объекта осуществляется с ошибками. Модель системы контроля имеет вид:

$$y(k) = Hx(k) + \eta(k),$$

где $\eta(k)$ – гауссовская последовательность независимая от $q(k)$ с характеристиками:

$$M\{\eta(k)\} = 0, \quad M\{\eta(k)\eta^T(j)\} = V\delta_{k,j}.$$

Матрица V диагональная, ее элементы заданы в таблице 2. Матрица системы контроля следующая

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Лабораторная работа № 6

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА ДВУХЭТАПНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Для дискретной модели объекта

$$x(k+1) = A(\theta)x(k) + B(\theta)u(k) + q(k), \quad x(0) = x_0, \quad (24)$$

решить задачу адаптивного управления с использованием двухэтапного алгоритма идентификации.

Вектор неизвестных параметров определяется следующим соотношением:

$$\theta = \begin{pmatrix} \frac{1}{b_1} \\ b_2 \\ b_1 \\ \gamma \end{pmatrix}.$$

Выполнить моделирование системы (24), реализовав адаптивное управление в предположении, что вектор $x(k)$ контролируется с помощью следующей модели:

$$y(k) = Hx(k) + \eta(k),$$

где $\eta(k)$ – гауссовская случайная последовательность, независимая от $q(k)$, с характеристиками:

$$M\{\eta(k)\} = 0, \quad M\{\eta(k)\eta^T(j)\} = V\delta_{k,j}.$$

Матрица системы контроля равна

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для вычисления оценок вектора неизвестных параметров использовать алгоритм двухэтапной идентификации.

Адаптивное управление будет иметь вид:

$$u(k) = -[B^T(\hat{\theta}(k))F^T CFB(\hat{\theta}(k)) + D]^{-1}B^T(\hat{\theta}(k)) \times \\ \times F^T C[FA(\hat{\theta}(k))\hat{x}(k) - z], \quad (25)$$

Интервал времени: $k = 0, \dots, 140$.

Оценки векторов $\hat{x}(k)$ и $\hat{\theta}(k)$ определяются с помощью следующих формул:

$$\hat{x}(k+1) = A(\hat{\theta}(k))\hat{x}(k) + B(\hat{\theta}(k))u(k) + K_f(k)[y(k+1) - \\ - H(A(\hat{\theta}(k))\hat{x}(k) + B(\hat{\theta}(k))u(k))], \quad \hat{x}(0) = \bar{x}(0), \quad (26)$$

$$P_f(k+1/k) = A(\hat{\theta}(k))P_f(k)A(\hat{\theta}(k))^T + Q, \quad (27)$$

$$K_f(k) = P_f(k+1/k)H^T[HP_f(k+1/k)H^T + V]^{-1}, \quad (28)$$

$$P_f(k+1) = (E_2 - K_f(k)H)P_f(k+1/k), \quad P_f(0) = P_{f_0}, \quad (29)$$

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + K_\theta(k)[y(k+1) - HG(k)\hat{\theta} - Hg(k)], \quad \hat{\theta}(0) = \bar{\theta}_0, \quad (30)$$

$$K_\theta(k) = P_\theta(k)G(k)^T[G(k)P_\theta(k)G(k)^T + HQH^T + V]^{-1}, \quad (31)$$

$$P_\theta(k+1) = (E_3 - K_\theta(k)G(k))P_\theta(k), \quad P_\theta(0) = P_{\theta_0}, \quad (32)$$

где

$$G(k) = G(\hat{x}(k), u(k)), \quad g(k) = g(\hat{x}(k), u(k)).$$

Начальные условия для уравнения (30) следующие:

$$\hat{\theta}(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Матрица $P_{\theta}(0)$ диагональная (см. таблицу 3).

ЗАДАНИЕ

Построить графики переходных процессов, графики адаптивного управления и оценок неизвестных параметров. Исследовать влияние на качество идентификации диагональных элементов матрицы P_{θ_0} (увеличивая их в 10 и 100 раз), диагональных элементов матрицы Q и V (уменьшая их в 10 и 100 раз). Сделать выводы.

Лабораторная работа № 7

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫМ ОБЪЕКТОМ 3-го ПОРЯДКА

1. Для дискретной модели

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + q(k), \quad x(0) = x_0, \quad (33)$$

синтезировать локально-оптимальное управление. В (33) матрицы A и B следующие

$$A = \begin{bmatrix} 1 - n_0 \exp(-c) - k_1 & 0 & 0 \\ n_0 \exp(-c) & 1 - k_2 & 0 \\ cn_0 \exp(-c) - k_3 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -c_0 \end{pmatrix}, \quad (34)$$

Реализовать оптимальное управление:

$$u(k) = -(B^T F^T CFB + D)^{-1} B^T F^T C(FA\hat{x}(k) - z). \quad (35)$$

Рассмотреть два варианта вычисления оценки $\hat{x}(k)$:

- с использованием фильтра Калмана,
- с использованием экстраполятора Калмана (с задержками на 1 и 2 такта).

Предполагается, что модель системы контроля имеет вид:

$$y(k) = Hx(k) + \eta(k), \quad (36)$$

где $\eta(k)$ – гауссовская случайная последовательность, независимая от $q(k)$, с характеристиками:

$$M\{\eta(k)\} = 0, \quad M\{\eta(k)\eta^T(j)\} = V\delta_{k,j}.$$

Исходные данные, необходимые для решения задачи адаптивного управления следующие:

$$F = (0 \ 0 \ 1), \quad C = 1, \quad D = 0,01, \quad r = 0,0062, \quad c = 3,5, \quad c_0 = 1,$$

$$n_0 = 0,8, k_1 = 0,0001, k_2 = 0,02, k_3 = 0,05,$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} 0,11 & 0 & 0 \\ 0 & 0,08 & 0 \\ 0 & 0 & 0,095 \end{bmatrix},$$

$$V = \begin{bmatrix} 2,1 & 0 & 0 \\ 0 & 3,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0,05 \end{bmatrix}, x(0) = \begin{pmatrix} 200 \\ 110 \\ w_0 \end{pmatrix}, \hat{x}(0) = \begin{pmatrix} 190 \\ 100 \\ w_0 \end{pmatrix}.$$

Дополнительные данные, необходимые для выполнения работы, приведены в таблице 4.

ЗАДАНИЕ

Построить графики переходных процессов, графики оптимального управления и оценок вектора. Моделирование выполнить на интервале времени от 0 до 140 (один такт соответствует 1 дню). Сравнить качество систем управления.

Сделать выводы.

Лабораторная работа № 8

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫМ ОБЪЕКТОМ 3-го ПОРЯДКА

Для дискретной линейной модели

$$x(k+1) = A(\theta)x(k) + Bu(k) + q(k), \quad x(0) = x_0, \quad (37)$$

решить задачу адаптивного управления. В (37) вектор неизвестных параметров определен следующим соотношением:

$$\theta = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix},$$

Предполагается, что вектор θ является неизвестной константой. В (37) матрицы $A(\theta)$ и B следующие

$$A(\theta) = \begin{bmatrix} 1 - \theta_1 \exp(-c) - k_1 & 0 & 0 \\ \theta_1 \exp(-c) & 1 - \theta_2 & 0 \\ c\theta_1 \exp(-c) - k_3 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -c_0 \end{pmatrix}, \quad (38)$$

Предполагается, что модель системы контроля имеет вид:

$$y(k) = Hx(k) + \eta(k),$$

где $\eta(k)$ – гауссовская случайная последовательность, независимая от $q(k)$, с характеристиками:

$$M\{\eta(k)\} = 0, \quad M\{\eta(k)\eta^T(j)\} = V\delta_{k,j},$$

Определить матрицу G и вектор g , необходимые для реализации алгоритма двухэтапной идентификации (см. лабораторную работу № 6). Реализовать адаптивное управление фирмой:

$$u(k) = -(B^T F^T CFB + D)^{-1} B^T F^T C(FA(\hat{\theta}(k))\hat{x}(k) - z). \quad (39)$$

Исходные данные, необходимые для решения задачи адаптивного управления следующие:

$$F = (0 \ 0 \ 1), \quad C = 1, \quad D = 0,01, \quad r = 0,0062, \quad c = 3,5, \quad c_0 = 1, \\ k_1 = 0,0001, \quad k_3 = 0,05, \\ H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 0,11 & 0 & 0 \\ 0 & 0,08 & 0 \\ 0 & 0 & 0,095 \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} 2,1 & 0 & 0 \\ 0 & 3,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0,05 \end{bmatrix}. \\ \hat{\Theta} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad x(0) = \begin{pmatrix} 200 \\ 110 \\ w_0 \end{pmatrix}, \quad \hat{x}(0) = \begin{pmatrix} 190 \\ 100 \\ w_0 \end{pmatrix}.$$

При моделировании истинные значения θ_1 и θ_2 k_2 принять следующие:

$$\theta_1 = 0,8, \quad \theta_2 = 0,02.$$

Дополнительные данные, необходимые для выполнения работы, приведены в таблице 4.

ЗАДАНИЕ

Построить графики переходных процессов, графики адаптивного управления и оценок неизвестных параметров. Использовать двухэтапный алгоритм идентификации. Моделирование выполнить на интервале времени от 0 до 140 (один такт соответствует 1 дню). Исследовать влияние диагональных элементов матрицы V на качество оценивания параметров модели, увеличивая их сначала в 5 и затем в 10, затем в 100 раз.

Сделать выводы.

Лабораторная работа № 9

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫМ ОБЪЕКТОМ 3-го ПОРЯДКА

1. Для дискретной нелинейной модели объекта

$$x(k+1) = A\varphi(x(k)) + Bu(k) + q(k), \quad x(0) = x_0, \quad (40)$$

синтезировать оптимальное управление.

Вектор $\varphi(x(k)) = (x_1(k) \ x_2(k) \ x_3(k) \ x_1(k)x_2(k))^T$.

В (40) матрицы A и B следующие

$$A = \begin{bmatrix} 1 - n_0 \exp(-c) - k_1 & 0 & 0 & n_0 \exp(-c)/Y \\ n_0 \exp(-c) & 1 - k_2 & 0 & -n_0 \exp(-c)/Y \\ cn_0 \exp(-c) - k_3 & 0 & 1 & -cn_0 \exp(-c)/Y \end{bmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -c_0 \end{pmatrix}, \quad (41)$$

Реализовать оптимальное управление фирмой:

$$u(k) = -(B^T F^T CFB + D)^{-1} B^T F^T C(FA\varphi(\hat{x}(k)) - z). \quad (42)$$

где $\hat{x}(k)$ вычисляется с помощью линеаризованного фильтра Калмана:

$$\hat{x}(k+1) = A\varphi(\hat{x}(k)) + Bu(k) + K_f(k)[y(k+1) - H(A\varphi(\hat{x}(k)) + Bu(k))],$$

$$\hat{x}(0) = \bar{x}(0), \quad (43)$$

$$P_f(k+1/k) = \bar{A}P_f(k)\bar{A}^T + Q, \quad (44)$$

$$K_f(k) = P_f(k+1/k)H^T[HP_f(k+1/k)H^T + V]^{-1}, \quad (45)$$

$$P_f(k+1) = (E_2 - K_f(k)H)P_f(k+1/k), \quad P_f(0) = P_{f0}, \quad (46)$$

где матрица \bar{A} определяется по формуле

$$\bar{A}(k) = A \frac{\partial \varphi(x(k))}{\partial x(k)} \Big|_{\hat{x}(k)}. \quad (47)$$

Предполагается, что модель системы контроля имеет вид:

$$y(k) = Hx(k) + \eta(k), \quad (48)$$

где $\eta(k)$ – гауссовская случайная последовательность, независимая от $q(k)$, с характеристиками:

$$M\{\eta(k)\} = 0, \quad M\{\eta(k)\eta^T(j)\} = V\delta_{k,j}.$$

Исходные данные, необходимые для решения задачи адаптивного управления следующие:

$$F = (0 \ 0 \ 1), \quad C = 1, \quad D = 0,01, \quad r = 0,0062, \quad c = 3,5, \quad c_0 = 1,$$

$$n_0 = 0,8, \quad k_1 = 0,0001, \quad k_2 = 0,02, \quad k_3 = 0,05,$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 0,11 & 0 & 0 \\ 0 & 0,08 & 0 \\ 0 & 0 & 0,095 \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} 2,1 & 0 & 0 \\ 0 & 3,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0,05 \end{bmatrix},$$

$$x(0) = \begin{pmatrix} 200 \\ 110 \\ w_0 \end{pmatrix}, \quad \hat{x}(0) = \begin{pmatrix} 190 \\ 100 \\ w_0 \end{pmatrix}.$$

Дополнительные данные, необходимые для выполнения работы, приведены в таблице 4.

ЗАДАНИЕ

Построить графики переходных процессов, графики оптимального управления и оценок вектора. Моделирование выполнить на интервале времени от 0 до 140. Выполнить моделирование с использованием линеаризованного экстраполятора Калмана.

Сделать выводы.

Лабораторная работа № 10

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫМ ОБЪЕКТОМ 3-го ПОРЯДКА

Для дискретной модели объекта

$$x(k+1) = A(\theta)\varphi(x(k)) + Bu(k) + q(k), \quad x(0) = x_0, \quad (49)$$

решить задачу адаптивного управления. В (49) вектор неизвестных параметров определен следующим соотношением:

$$\theta = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix}.$$

В (49) матрицы $A(\theta)$ и B следующие

$$A(\theta) = \begin{bmatrix} 1 - \theta_1 \exp(-c) - k_1 & 0 & 0 & \theta_1 \exp(-c)/Y \\ \theta_1 \exp(-c) & 1 - \theta_2 & 0 & -\theta_1 \exp(-c)/Y \\ c\theta_1 \exp(-c) - k_3 & 0 & 1 & -c\theta_1 \exp(-c)/Y \end{bmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -c_0 \end{pmatrix}, \quad (50)$$

Определить матрицу $G(\hat{x}(k), u(k))$ и вектор $g(\hat{x}(k), u(k))$ необходимые для реализации алгоритма двухэтапной идентификации. Реализовать адаптивное управление фирмой:

$$u(k) = -(B^T F^T CFB + D)^{-1} B^T F^T C(FA(\hat{\theta}(k))\varphi(\hat{x}(k)) - z), \quad (51)$$

где $\hat{x}(k)$ вычисляется с помощью линеаризованного фильтра Калмана (см. лабораторную работу № 12):

$$\hat{x}(k+1) = \hat{A}\varphi(\hat{x}(k)) + Bu(k) + K_f(k)[y(k+1) - H(\hat{A}\varphi(\hat{x}(k)) + Bu(k))],$$

$$\hat{x}(0) = \bar{x}(0), \quad (52)$$

$$P_f(k+1/k) = \bar{A}P_f(k)\bar{A}^T + Q, \quad (53)$$

$$K_f(k) = P_f(k+1/k)H^T[HP_f(k+1/k)H^T + V]^{-1}, \quad (54)$$

$$P_f(k+1) = (E_2 - K_f(k)H)P_f(k+1/k), \quad P_f(0) = P_{f0}, \quad (55)$$

где матрица \bar{A} определяется по формуле

$$\bar{A}(k) = \hat{A} \frac{\partial \varphi(x(k))}{\partial x(k)} \Big|_{\hat{x}(k)}. \quad (56)$$

В (56) $\hat{A} = A(\hat{\theta}(k))$.

Исходные данные, необходимые для решения задачи адаптивного управления следующие:

$$F = (0 \ 0 \ 1), \quad C = 1, \quad D = 0,01, \quad r = 0,0062, \quad c = 3,5, \quad c_0 = 1, \\ k_1 = 0,0001, \quad k_3 = 0,05, \\ H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 0,11 & 0 & 0 \\ 0 & 0,08 & 0 \\ 0 & 0 & 0,095 \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} 2,1 & 0 & 0 \\ 0 & 3,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0,05 \end{bmatrix}. \\ \hat{\Theta}(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad x(0) = \begin{pmatrix} 200 \\ 110 \\ w_0 \end{pmatrix}, \quad \hat{x}(0) = \begin{pmatrix} 190 \\ 100 \\ w_0 \end{pmatrix}.$$

При моделировании истинные значения θ_1 и θ_2 k_2 принять следующие:

$$\theta_1 = 0,8, \quad \theta_2 = 0,02.$$

Дополнительные данные, необходимые для выполнения работы, приведены в таблице 4.

ЗАДАНИЕ

Построить графики переходных процессов, графики адаптивного управления и оценки неизвестных параметров. Моделирование выполнить на интервале времени от 0 до 140. Исследовать влияние диагональных элементов матрицы V на качество оценивания параметров модели, увеличивая их сначала в 5 и затем в 10, затем в 100 раз. Сделать выводы.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Таблица 1

N	γ	$x_1(0)$	$x_2(0)$	b_1	b_2	Q_{11}	Q_{22}
1	0,0003	300	200	15	22	2,0	0,25
2	0,0004	310	210	14	20	1,0	0,3
3	0,0002	305	195	15	19	1,0	0,2
4	0,0005	310	205	17	22	1,2	0,05
5	0,0004	320	216	19	23	2,0	0,2
6	0,0003	325	198	17	18	1,0	0,12
7	0,0004	300	200	15	22	2,0	0,14
8	0,0004	330	210	14	20	3,0	0,12
9	0,0002	315	195	15	19	2,1	0,22
10	0,0003	310	215	18	24	2,0	0,02
11	0,0004	310	216	19	23	1,1	0,04
12	0,0005	325	198	17	18	1,0	0,1
13	0,0004	300	200	15	22	2,0	0,1
14	0,0004	310	210	14	20	1,5	0,03
15	0,0003	305	195	15	19	1,0	0,16
16	0,0005	315	205	17	22	2,0	0,07
17	0,0004	320	216	19	23	1,3	0,08
18	0,0005	325	198	17	19	1,2	0,04
19	0,0004	300	205	15	22	2,0	0,06
20	0,0004	320	210	14	20	1,5	0,07
21	0,0003	315	195	17	18	1,7	0,05
22	0,0005	330	215	18	24	1,9	0,09
23	0,0003	320	216	19	23	1,3	0,07
24	0,0005	325	198	17	18	1,0	0,04
25	0,0003	315	195	15	19	2,0	0,03
26	0,0005	310	215	18	24	2,2	0,08
27	0,0004	310	216	20	23	1,7	0,05
28	0,0005	325	210	17	18	1,7	0,04
29	0,0003	310	200	15	22	1,2	0,03
30	0,0004	315	210	16	20	1,2	0,03

Таблица 2

<i>N</i>	<i>z</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>V</i> ₁₁	<i>V</i> ₂₂
1	2,1	1	0,06	3,5	3,4
2	2,5	1,2	0,08	5,5	4,5
3	2,2	1,1	0,07	3,9	3,0
4	2,1	1,3	0,05	3,5	3,4
5	2,6	1,2	0,09	4,2	3,5
6	2,2	1,6	0,08	4,9	3,0
7	2,5	1	0,05	3,5	1,4
8	2,4	1,2	0,08	5,5	4,5
9	2,3	1,1	0,07	2,9	3,0
10	2,4	1,4	0,05	4,5	3,8
11	2,2	1,2	0,08	7,5	2,5
12	2,6	1,5	0,07	4,9	3,8
13	2,1	1	0,06	7,5	2,4
14	2,2	1,2	0,08	5,5	4,5
15	2,5	1,1	0,07	5,9	3,6
16	2,1	1,3	0,05	3,5	3,2
17	2,2	1,2	0,09	3,5	3,5
18	2,4	1,6	0,08	4,9	3,0
19	2,1	1,1	0,05	7,5	2,4
20	2,2	1,2	0,09	6,5	4,5
21	2,3	1,1	0,07	6,9	3,0
22	2,0	1,0	0,05	3,5	3,8
23	2,3	1,2	0,08	4,5	4,5
24	2,2	1,5	0,07	4,9	3,8
25	2,5	1,2	0,08	3,3	2,3
26	2,2	1,6	0,09	4,9	3,9
27	2,1	1,5	0,05	6,5	2,1
28	2,2	1,2	0,08	3,5	4,5
29	2,4	1,3	0,09	6,2	3,0
30	2,3	1,4	0,04	2,5	2,9

Таблица 3

N	$\hat{x}_1(0)$	$\hat{x}_2(0)$	$P_{f11}(0)$	$P_{f22}(0)$	$P_{011}(0)$	$P_{022}(0)$	$P_{033}(0)$
1	270	190	15	15	1,5	2,0	1,0
2	280	180	20	20	1,2	2,5	1,5
3	290	185	21	19	1,4	2,7	2,5
4	275	192	15	16	2,5	2,8	2,3
5	285	184	16	24	1,5	4,9	2,5
6	280	180	22	29	1,7	2,7	2,5
7	275	190	15	15	1,6	2,0	1,0
8	280	180	20	20	1,3	2,5	1,5
9	295	170	21	18	1,5	3,7	3,5
10	275	192	15	16	2,5	2,8	2,5
11	295	185	16	25	1,5	2,3	3,5
12	270	180	22	30	1,6	2,7	2,5
13	270	190	15	15	1,5	2,0	1,0
14	280	180	20	20	1,2	2,5	3,5
15	290	185	21	19	1,4	2,7	2,7
16	265	192	15	16	2,5	2,8	2,3
17	285	184	16	24	1,5	4,9	5,1
18	270	180	22	29	1,7	2,7	2,5
19	275	195	15	15	1,6	3,0	2,0
20	280	180	22	20	1,4	2,5	2,5
21	285	170	21	18	1,5	3,7	3,5
22	275	190	15	16	2,7	4,8	5,5
23	285	195	16	25	1,5	2,3	3,3
24	270	180	25	31	1,6	2,7	2,5
25	280	192	15	16	2,5	2,8	2,3
26	285	180	16	24	1,9	5,9	4,5
27	270	185	22	29	1,7	2,7	2,8
28	265	180	16	16	1,8	2,0	3,0
29	285	180	20	20	1,3	2,5	5,5
30	275	170	22	19	1,5	3,7	3,2

Таблица 4

N	$P_{f11}(0)$	$P_{f22}(0)$	$P_{f33}(0)$	$P_{011}(0)$	$P_{022}(0)$
1	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0
2	2,0	2,0	1,2	2,5	1,5
3	2,1	1,0	1,4	2,1	2,2
4	1,5	1,5	2,5	2,8	2,3
5	1,6	2,4	1,5	1,9	2,5
6	2,2	2,9	1,7	2,7	2,5
7	1,5	1,5	1,6	2,0	1,0
8	2,0	2,0	1,3	2,5	1,5
9	2,6	1,5	1,5	1,6	3,5
10	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0
11	2,0	2,0	1,2	2,5	1,5
12	2,7	1,0	1,4	2,1	2,2
13	1,5	1,8	2,5	2,8	2,3
14	1,6	2,4	1,5	1,9	2,5
15	2,2	2,6	1,7	2,7	2,5
16	1,5	1,5	1,6	2,0	1,0
17	2,2	2,0	1,3	2,5	1,5
18	2,6	1,7	1,5	3,5	3,2
19	2,1	1,0	1,4	2,1	2,2
20	1,5	1,5	2,5	2,8	2,3
21	1,6	2,4	1,5	1,9	2,5
22	2,6	2,9	1,7	2,7	2,5
23	1,5	1,5	1,6	2,0	1,0
24	2,0	2,0	1,3	2,5	1,5
25	2,2	1,5	1,5	2,7	3,5
26	1,5	1,2	1,0	1,3	1,4
27	1,0	2,0	1,2	2,5	1,5
28	2,1	1,0	1,4	2,1	2,2
29	1,5	1,5	2,5	2,3	2,3
30	1,6	2,4	1,5	1,9	2,5

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кротов В.Ф., Гурман В.И.** Методы и задачи оптимального управления. М.: Наука, 1973. 446 с.
2. **Горский А.А., Колпакова Н.Г., Локшин Б.Я.** Динамическая модель производства, хранения и сбыта товара повседневного спроса // Изв. РАН Теория и системы управления. 1998. № 1. С. 144–149.
3. **Браммер К., Зиффлинг Г.** Фильтр Калмана-Бьюси. М.: Наука, 1972. 200 с.
4. **Смагин В.И.** Локально-оптимальные следящие системы управления при косвенных измерениях с ошибками // Изв. вузов Авиационная техника. 1995. № 1. С. 26–30.
5. **Смагин В.И., Параев Ю.И.** Синтез следящих систем управления по квадратичным критериям. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1996. 171 с.
6. **Смагин В.И.** Локально-оптимальные следящие системы управления для дискретных объектов со случайными параметрами // Автоматика и вычислительная техника. 1997. № 2. С. 32–40.
7. **Смагин В.И.** Адаптивные локально-оптимальные следящие системы управления // Изв. вузов Авиационная техника. 1997. № 2. С. 41–46.
8. **Смагин В.И.** Локально-оптимальное управление запасами. Учебно-методическое пособие. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2001. 32 с.
9. **Охорзин В.А.** Прикладная математика в системе Mathcad. Учебное пособие. 3-е изд. СПб.: Лань, 2009. 352с.