

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 3 (132)

март

2012

Редакционный совет:

КУЗНЕЦОВ Н. А.
МАКАРОВ И. М.
МАТВЕЕНКО А. М.
ПЕШЕХОНОВ В. Г.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.
ФЕДОРОВ И. Б.

Главный редактор:

ТЕРЯЕВ Е. Д.

Заместители гл. редактора:

ПОДУРАЕВ Ю. В.
ПУТОВ В. В.
ЮЩЕНКО А. С.

Выпускающий редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Ответственный секретарь:

ПЕТРИН К. В.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М.
БОГАЧЕВ Ю. П.
БУКОВ В. Н.
ВИТТИХ В. А.
ВОСТРИКОВ А. С.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г.
ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.
ИВЧЕНКО В. Д.
ИЛЬЯСОВ Б. Г.
КАЛЯЕВ И. А.
КОЛОСОВ О. С.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.
КУЗЬМИН Н. Н.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.
ЛЕОНОВ Г. А.
ЛЁВИН Б. А.
ЛОХИН В. М.
НОРЕНКОВ И. П.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.
ПРОХОРОВ Н. Л.
РАПОПОРТ Э. Я.
РАЧКОВ М. Ю.
РЕЗЧИКОВ А. Ф.
СЕБРЯКОВ Г. Г.
СИГОВ А. С.
СИРОТКИН О. С.
СОЙФЕР В. А.
ТИМОФЕЕВ А. В.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.
ФУРСОВ В. А.
ХИМЕНКО В. И.
ЮРЕВИЧ Е. И.
ЮСУПОВ Р. М.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЧУГУНОВА А. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М.** Энергетически оптимальное управление в линейных многоточечных задачах о встрече движений 2
- Анисимов Д. Н., Мьякинков Д. А.** Проблемы снижения погрешностей оценок параметров нелинейных динамических объектов при идентификации методом экспоненциальной модуляции 6

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

- Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П.** Принципы построения и проблемы разработки мультиагентных робототехнических систем 11
- Осипов В. Ю.** Стирание устаревшей информации в ассоциативных интеллектуальных системах 16

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Волкоморов С. В., Карпенко А. П.** Оптимизация геометрии многосекционного манипулятора типа "хобот" 21
- Татмышевский К. В., Павлов Д. Д.** Механолюминесцентные сенсоры для тактильного очувствления роботов 27
- Красильникьянц Е. В., Варков А. А., Тютиков В. В.** Программное обеспечение системы управления IntNCR манипуляционным роботом 31

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

- Шаршеналиев Ж. Ш., Миркин Е. Л.** Синтез модифицированных алгоритмов адаптивного управления процессом роста монокристаллов кремния 37
- Гиндин П. Д., Кондратенко В. С., Сорокин А. В., Хлызов В. А.** Программа управления для промышленных установок лазерного управляемого термораскалывания . . 44

Журнал в журнале "УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Мироненко А. А.** Программирование траектории и режимов движения судна в стесненных водах 49
- Севрюк А. Н.** Метод оптимизации кластерного анализа для решения задач локализации подводных объектов 55
- Игнатьев С. В., Степанов А. П., Завьялов П. П., Винокуров И. Ю.** Синтез алгоритма управления модуляционным вращением измерительного блока инерциально-спутниковой системы 62
- Канушкин С. В., Лебедев Г. Н., Чан Ван Туен, Швыдченко К. И.** Подготовка операторов безотказного управления сложными подвижными объектами при регулируемом регламенте проведения проверок 67
- Contents** 71

Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: mech@novtex.ru

УДК 629.191

В. И. Миронов,

д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр.,

Ю. В. Миронов, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
mironuv@yandex.ru,

Р. М. Юсупов,

чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., директор,
spiiran@iias.spb.su,

Санкт-Петербургский институт
информатики и автоматизации РАН

Энергетически оптимальное управление в линейных многоточечных задачах о встрече движений

Рассматривается задача энергетически оптимального управления движением активного объекта при его последовательной встрече с системой подвижных целевых объектов. Приводится аналитическое решение соответствующей модельной линейно-квадратической задачи.

Ключевые слова: оптимальное управление, сближение, целевые объекты, многоточечные задачи

Введение

Задача оптимизации управления активным объектом (АО) при его последовательном сближении с группой подвижных целевых объектов (ЦО) относится к сложному и сравнительно мало изученному классу нелинейных многоточечных вариационных задач и, кроме того, связана с большим объемом вычислений. Задача такого рода рассматривалась, в частности, в работах [2, 3] для импульсной постановки применительно к условиям космического полета к астероидам, где определялся оптимальный маршрут облета нескольких небесных тел. Аналогичные задачи возникают и при маневрировании космических аппаратов в околоземном пространстве.

В теории оптимального управления рассматривали, в основном, такие многоточечные задачи последовательного типа, как задачи с промежуточными граничными условиями. Наиболее общие результаты в этой области получены в [1, 5]. Однако сформулированные задачи и полученные в этих работах необходимые условия оптимальности не учитывают главной особенности многоточечной задачи о встрече движений, в которой граничные условия формируются на решениях соответствующих систем нелинейных дифференциальных уравнений. В работе авторов [4] были конкретизированы необхо-

димые условия оптимальности управления для данного класса задач. Данная статья продолжает эти исследования. В ней рассматривается задача энергетически оптимального управления для случая, когда динамика АО описывается системой линейных дифференциальных уравнений второго порядка в открытой области управления.

1. Постановка задачи и необходимые условия оптимальности

Пусть динамика АО на интервале $t \in [t_0, T]$ описывается системой уравнений

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{v}; \quad \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{A}_r(t)\mathbf{r} + \mathbf{A}_v(t)\mathbf{v} + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t), \quad (1)$$

а движение N ЦО — системами

$$\dot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{v}_i; \quad \dot{\mathbf{v}}_i = \mathbf{f}_i(\mathbf{r}_i, \mathbf{v}_i, t);$$

$$t \in [t_0, t_i]; \quad i = \overline{1, N}. \quad (2)$$

В начальный момент t_0 исходное положение АО и каждого ЦО определяется соответствующими значениями координат и скорости их движения

$$\mathbf{r}_0, \mathbf{v}_0, \mathbf{r}_{i_0}, \mathbf{v}_{i_0}; \quad i = \overline{1, N}. \quad (3)$$

Здесь \mathbf{r}, \mathbf{v} и $\mathbf{r}_i, \mathbf{v}_i$ — векторы координат и скоростей АО и i -го ЦО соответственно; $\mathbf{A}_r(t), \mathbf{A}_v(t), \mathbf{B}(t)$ — функциональные матрицы соответствующих размерностей; \mathbf{f}_i — нелинейная функция своих аргументов; $\mathbf{u}(t)$ — управляющее воздействие АО.

Требуется найти траекторию $\mathbf{x}(t)$, управление $\mathbf{u}(t) \in \Omega_u$ и временные параметры

$$t_0, t_1, \dots, t_N = T,$$

обеспечивающие в моменты t_i выполнение заданных условий встречи АО с каждым i -м целевым объектом

$$\mathbf{r}(t_i) = \mathbf{r}_i(t_i); \quad i = \overline{1, N}; \\ t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_N = T, \quad (4)$$

и при этом квадратический функционал

$$I = \frac{1}{2} \int_0^T \mathbf{u}^T \mathbf{u} dt, \quad (5)$$

характеризующий энергетические затраты на выполнение операции, принимает минимальное значение.

На основе результатов, приведенных в работе [4], для рассматриваемой задачи нетрудно получить необходимые условия оптимальности управления, которые сформулируем следующим образом.

Для оптимальности n -мерного вектора $\mathbf{x}(t) = [\mathbf{r}(t), \mathbf{v}(t)]^T$, а также $\mathbf{u}(t) \in \Omega_u$ и $\mathbf{T}_N = [t_1, t_2, \dots, t_N]^T$ необходимо выполнение следующих условий:

1) векторы $\mathbf{x}(t)$ и $\boldsymbol{\lambda}(t)$ удовлетворяют сопряженной системе

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\lambda}, t)}{\partial \mathbf{x}}; \dot{\boldsymbol{\lambda}} = \frac{\partial H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\lambda}, t)}{\partial \mathbf{x}}; \boldsymbol{\lambda} = [\lambda_r, \lambda_v]^T;$$

2) вектор управления обеспечивает максимум гамильтониана H

$$\mathbf{u}(t) \rightarrow \max_{\mathbf{u} \in \Omega_u} \left\{ H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) = \lambda_r^T \mathbf{v} + \lambda_v^T [\mathbf{A}_r(t)\mathbf{r} + \mathbf{A}_v(t)\mathbf{v} + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}] - \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{u} \right\};$$

$$t_0 \leq t \leq T;$$

3) выполняются условия трансверсальности в конечный момент $t_N = T$

$$\lambda_{V, N}(t_N = T) = 0;$$

4) при $t = t_i$ выполняются условия Эрдмана—Вейерштрасса

$$\lambda_{r, i+1}(t_i) - \lambda_{r, i}(t_i) + \Delta \lambda_{r, i} = 0;$$

$$\lambda_{V, i+1}(t_i) - \lambda_{V, i}(t_i) = 0; i = \overline{1, N-1};$$

$$H_{i+1}(t_i) - H_i(t_i) + \Delta \lambda_{r, i}^T [\mathbf{v}(t_i) - \mathbf{v}_i(t_i)] = 0; i = \overline{1, N},$$

где $\lambda_{r, 0}, \lambda_{V, 0}, \Delta \lambda_{r, i}$ — неопределенные параметры сопряженных переменных.

Как видно из условий 4, сопряженные переменные имеют скачки в моменты времени t_i , что является особенностью данного класса задач, которую необходимо учитывать при решении. Приведенные соотношения дают достаточное число условий для определения всех неизвестных параметров и функций.

2. Модельная задача и ее аналитическое решение

Несмотря на линейность модели движения АО и квадратический характер оптимизируемого функционала, общая задача остается нелинейной не только из-за необходимости определения сопряженных параметров $\lambda_{r, 0}, \lambda_{V, 0}, \Delta \lambda_{r, i}$, но и временных параметров встречи объектов $\mathbf{T}_N = [t_1, t_2, \dots, t_N]^T$. Поэтому рассматриваемая задача может быть решена только с помощью численных методов. Для решения данного класса задач может быть предложен комбинированный метод, в котором комбинационно используются вариационный и прямой принципы построения вычислительных алгоритмов.

Он предусматривает декомпозицию вычислительного процесса и позволяет на каждой итерации свести исходную многоточечную задачу оптимизации к более простой модельной задаче оптимального управления, решаемой при фиксированных временных параметрах. Метод включает два цикла или этапа.

1. На первом (внутреннем) цикле исходная задача решается при фиксированных значениях вектора временных параметров \mathbf{T}_N в соответствии с принятым начальным приближением на основе принципа максимума.

2. На втором (внешнем) цикле осуществляется построение аппроксимационных моделей зависимости основного критерия оптимальности $I(\mathbf{T}_N)$ и изопериметрических условий $L(\mathbf{T}_N)$ от вектора временных параметров \mathbf{T}_N и проводится его уточнение.

Далее организуется итерационное повторение циклов 1 и 2 для окончательного определения $\mathbf{u}^{\text{opt}}(t)$ и $\mathbf{T}_N^{\text{opt}}$.

Задача оптимального управления, решаемая на первом этапе данного метода, значительно упрощается по сравнению с исходной, так как временные параметры встречи объектов фиксированы. По существу, она переходит в класс задач с промежуточными фазовыми ограничениями, заданными в фиксированные моменты времени [6].

В рамках рассматриваемой в данной статье задачи о встрече АО с системой подвижных объектов решение такой модельной задачи в открытой области управления Ω_u сводится к следующей многоточечной краевой задаче

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{v}; \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{A}_r(t)\mathbf{r} + \mathbf{A}_v(t)\mathbf{v} + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t);$$

$$\dot{\lambda}_r = -\mathbf{A}_r^T(t)\lambda_v; \dot{\lambda}_v = -\lambda_r - \mathbf{A}_v^T(t)\lambda_v; \quad (6)$$

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{B}^T(t)\lambda_v(t)$$

при следующих краевых и промежуточных условиях

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0; \mathbf{r}(t_i) = \mathbf{r}_i; i = \overline{1, N};$$

$$\lambda_{r, i+1}(t_i) - \lambda_{r, i}(t_i) + \Delta \lambda_{r, i} = 0;$$

$$\lambda_{V, i+1}(t_i) - \lambda_{V, i}(t_i) = 0;$$

$$\lambda_{V, N}(t_N = T) = 0; i = \overline{1, N}.$$

Для решения задачи введем расширенный вектор размерности $2n$

$$\mathbf{z} = [\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}]^T = [\mathbf{r}, \mathbf{v}, \lambda_r, \lambda_v]^T.$$

Тогда П-система (6) может быть представлена в виде

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{z}; \mathbf{z}(t_0) = \mathbf{z}_0, \quad (7)$$

где

$$\mathbf{C}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(t) & \tilde{\mathbf{B}}(t)\tilde{\mathbf{B}}^T(t) \\ 0 & -\mathbf{A}^T(t) \end{bmatrix}; \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{E} \\ \mathbf{A}_r & \mathbf{A}_v \end{bmatrix}; \tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B} \end{bmatrix}.$$

Решение расширенной системы для любого $t \in [t_0, t_1]$ дается формулой Коши

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{R}(t, t_0)\mathbf{z}_0, \quad (8)$$

где $\mathbf{R}(t, t_0)$ — нормированная фундаментальная матрица размерности $2n \times 2n$.

Определим структуру фундаментальной матрицы \mathbf{R} . Решение системы (6) может быть представлено в виде

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{U}(t, t_0)\mathbf{x}_0 + \int_{t_0}^t \mathbf{U}(t, \tau)\tilde{\mathbf{B}}(\tau)\tilde{\mathbf{B}}^T(\tau)\mathbf{V}(\tau, t_0)d\tau \cdot \lambda_0; \quad (9)$$

$$\lambda(t) = \mathbf{v}(t, t_0)\lambda_0,$$

где $\mathbf{U}(t, t_0)$ и $\mathbf{V}(t, t_0)$ — нормированные фундаментальные матрицы решения соответствующих однородных уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}; \quad \dot{\lambda} = -\mathbf{A}^T(t)\lambda.$$

В привязке к векторным компонентам \mathbf{x} , λ матрица \mathbf{R} записывается в следующем виде

$$\mathbf{R}(t, t_0) = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{11}(t, t_0) & \mathbf{Q}_{12}(t, t_0) \\ \mathbf{Q}_{21}(t, t_0) & \mathbf{Q}_{22}(t, t_0) \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{Q}_{ij}(t, t_0)$ — квадратные матрицы размерности $n \times n$.

Из сопоставления соответствующих блоков получаем равенства

$$\mathbf{Q}_{11}(t, t_0) = \mathbf{U}(t, t_0); \quad \mathbf{Q}_{12}(t, t_0) =$$

$$= \int_{t_0}^t \mathbf{U}(t, \tau)\tilde{\mathbf{B}}(\tau)\tilde{\mathbf{B}}^T(\tau)\mathbf{V}(\tau, t_0)d\tau;$$

$$\mathbf{Q}_{21}(t, t_0) = 0; \quad \mathbf{Q}_{22}(t, t_0) = \mathbf{V}(t, t_0).$$

Матрицу $\mathbf{R}(t, t_0)$ в привязке к векторным компонентам \mathbf{r} , \mathbf{v} , λ_r , λ_v представим в следующем блочном виде:

$$\mathbf{R}(t, t_0) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{11}(t, t_0) & \mathbf{R}_{12}(t, t_0) & \mathbf{R}_{13}(t, t_0) & \mathbf{R}_{14}(t, t_0) \\ \mathbf{R}_{21}(t, t_0) & \mathbf{R}_{22}(t, t_0) & \mathbf{R}_{23}(t, t_0) & \mathbf{R}_{24}(t, t_0) \\ \mathbf{R}_{31}(t, t_0) & \mathbf{R}_{32}(t, t_0) & \mathbf{R}_{33}(t, t_0) & \mathbf{R}_{34}(t, t_0) \\ \mathbf{R}_{41}(t, t_0) & \mathbf{R}_{42}(t, t_0) & \mathbf{R}_{43}(t, t_0) & \mathbf{R}_{44}(t, t_0) \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{R}_{ij}(t, t_0)$ — квадратные матрицы, соответствующие векторам \mathbf{r} , \mathbf{v} , λ_r , λ_v .

Определим структуру матриц $\mathbf{R}_{ij}(t, t_0)$ в зависимости от соответствующих блоков фундаментальных матриц $\mathbf{U}(t, t_0)$ и $\mathbf{V}(t, t_0)$ однородных уравнений применительно к системе второго порядка (6). Для

этого матрицу $\mathbf{U}(t, t_0)$ в привязке к векторным компонентам \mathbf{r} , \mathbf{v} представим как

$$\mathbf{U}(t, t_0) = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{11}(t, t_0) & \mathbf{U}_{12}(t, t_0) \\ \mathbf{U}_{21}(t, t_0) & \mathbf{U}_{22}(t, t_0) \end{bmatrix},$$

а матрицу $\mathbf{V}(t, t_0)$ в привязке к векторным компонентам λ_r , λ_v — как

$$\mathbf{V}(t, t_0) = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{11}(t, t_0) & \mathbf{V}_{12}(t, t_0) \\ \mathbf{V}_{21}(t, t_0) & \mathbf{V}_{22}(t, t_0) \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{U}_{ij}(t, t_0)$, $\mathbf{V}_{ij}(t, t_0)$ — квадратные матрицы.

Из сопоставления соответствующих блоков получаем следующие равенства:

$$\mathbf{R}_{ij}(t, t_0) = \mathbf{U}_{ij}(t, t_0) \text{ при } i, j = 1, 2; \quad (10)$$

$$\mathbf{R}_{ij}(t, t_0) = 0 \text{ при } i = 3, 4; j = 1, 2;$$

$$\mathbf{R}_{ij}(t, t_0) = \mathbf{V}_{i-2, j-2}(t, t_0) \text{ при } i, j = 3, 4;$$

$$\mathbf{R}_{13}(t, t_0) = \int_{t_0}^t \mathbf{U}_{12}(t, \tau)\mathbf{B}\mathbf{B}^T\mathbf{V}_{21}(\tau, t_0)d\tau;$$

$$\mathbf{R}_{14}(t, t_0) = \int_{t_0}^t \mathbf{U}_{12}(t, \tau)\mathbf{B}\mathbf{B}^T\mathbf{V}_{22}(\tau, t_0)d\tau;$$

$$\mathbf{R}_{23}(t, t_0) = \int_{t_0}^t \mathbf{U}_{22}(t, \tau)\mathbf{B}\mathbf{B}^T\mathbf{V}_{21}(\tau, t_0)d\tau;$$

$$\mathbf{R}_{24}(t, t_0) = \int_{t_0}^t \mathbf{U}_{22}(t, \tau)\mathbf{B}\mathbf{B}^T\mathbf{V}_{22}(\tau, t_0)d\tau.$$

С учетом принятых обозначений покомпонентные решения системы (6) находятся по формулам

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{R}_{11}(t, t_0)\mathbf{r}_0 + \mathbf{R}_{12}(t, t_0)\mathbf{v}_0 +$$

$$+ \mathbf{R}_{13}(t, t_0)\lambda_{r_0} + \mathbf{R}_{14}(t, t_0)\lambda_{v_0};$$

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{R}_{21}(t, t_0)\mathbf{r}_0 + \mathbf{R}_{22}(t, t_0)\mathbf{v}_0 +$$

$$+ \mathbf{R}_{23}(t, t_0)\lambda_{r_0} + \mathbf{R}_{24}(t, t_0)\lambda_{v_0};$$

$$\lambda_r(t) = \mathbf{R}_{33}(t, t_0)\lambda_{r_0} + \mathbf{R}_{34}(t, t_0)\lambda_{v_0};$$

$$\lambda_v(t) = \mathbf{R}_{43}(t, t_0)\lambda_{r_0} + \mathbf{R}_{44}(t, t_0)\lambda_{v_0}.$$

Заметим далее, что в силу линейности системы (6), если в некоторый момент $t_i \in [t_0, t]$ вектор $\lambda_r(t_i)$ получает приращение $\delta\lambda_r(t_i)$, то на момент t значения векторов $\mathbf{r}(t)$ и $\lambda_r(t)$ получают, соответственно, приращения

$$\delta\mathbf{r}(t) = \mathbf{R}_{13}(t, t_i)\delta\lambda_r(t_i); \quad \delta\mathbf{v}(t) = \mathbf{R}_{43}(t, t_i)\delta\lambda_r(t_i).$$

Это обстоятельство позволяет составить следующую систему уравнений для краевых условий встре-

чи АО с ЦО относительно неизвестных векторов $\lambda_{r_0}, \lambda_{V_0}, \Delta\lambda_{r_1}, \Delta\lambda_{r_2}, \dots, \Delta\lambda_{r_{N-1}}$

$$\Delta\mathbf{r}_1(t_1) = \mathbf{R}_{13}(t, t_0)\lambda_{r_0} + \mathbf{R}_{14}(t, t_0)\lambda_{v_0}; \quad (11)$$

$$\Delta\mathbf{r}_2(t_2) = \mathbf{R}_{13}(t_2, t_0)\lambda_{r_0} + \mathbf{R}_{14}(t_2, t_0)\lambda_{v_0} + \mathbf{R}_{13}(t_2, t_1)\Delta\lambda_{r_1};$$

$$\Delta\mathbf{r}_3(t_3) = \mathbf{R}_{13}(t_3, t_0)\lambda_{r_0} + \mathbf{R}_{14}(t_3, t_0)\lambda_{v_0} + \mathbf{R}_{13}(t_2, t_1)\Delta\lambda_{r_1} + \mathbf{R}_{13}(t_3, t_2)\Delta\lambda_{r_2};$$

.....

$$\Delta\mathbf{r}_N(t_N) = \mathbf{R}_{13}(t_N, t_0)\lambda_{r_0} + \mathbf{R}_{14}(t_N, t_0)\lambda_{v_0} + \sum_{i=1}^{N-1} \mathbf{R}_{13}(t_N, t_i)\Delta\lambda_{r_i};$$

$$\Delta\lambda_{V_N}(t_N) = \mathbf{R}_{43}(t_N, t_0)\lambda_{r_0} + \mathbf{R}_{44}(t_N, t_0)\lambda_{v_0} + \sum_{i=1}^{N-1} \mathbf{R}_{43}(t_N, t_i)\Delta\lambda_{r_i} = 0,$$

где

$$\Delta\mathbf{r}_i(t_i) = \mathbf{r}_i(t_i) - [\mathbf{R}_{11}(t_i, t_0)\mathbf{r}_0 + \mathbf{R}_{12}(t_i, t_0)\mathbf{v}_0].$$

Векторы $\mathbf{r}_i(t_i)$ определяются путем интегрирования уравнений движения целевых объектов.

Эту систему можно разрешить путем последовательного исключения неизвестных.

Так, при обходе двух ЦО, т. е. при $N = 2$, необходимо решить систему

$$\Delta\mathbf{r}_1(t_1) = \mathbf{R}_{13}(t_1, t_0)\lambda_{r_0} + \mathbf{R}_{14}(t_1, t_0)\lambda_{v_0};$$

$$\Delta\mathbf{r}_2(t_2) = \mathbf{R}_{13}(t_2, t_0)\lambda_{r_0} + \mathbf{R}_{14}(t_2, t_0)\lambda_{v_0} + \mathbf{R}_{13}(t_2, t_1)\Delta\lambda_{r_1};$$

$$0 = \mathbf{R}_{43}(t_2, t_0)\lambda_{r_0} + \mathbf{R}_{44}(t_2, t_0)\lambda_{v_0} + \mathbf{R}_{43}(t_2, t_1)\Delta\lambda_{r_1}.$$

Из первого уравнения этой системы находим

$$\Delta\lambda_{r_0} = \mathbf{R}_{13}^{-1}(t_1, t_0)[\Delta\mathbf{r}_1(t_1) - \mathbf{R}_{14}(t_1, t_0)\lambda_{v_0}].$$

Подставляя это выражение во второе и третье уравнения, имеем

$$\Delta\mathbf{r}_2(t_2) = \mathbf{R}_{13}(t_2, t_0)\mathbf{R}_{13}^{-1}(t_1, t_0)[\Delta\mathbf{r}_1(t_1) - \mathbf{R}_{14}(t_1, t_0)\lambda_{v_0}] + \mathbf{R}_{14}(t_2, t_0)\lambda_{v_0} + \mathbf{R}_{13}(t_2, t_1)\Delta\lambda_{r_1};$$

$$0 = \mathbf{R}_{43}(t_2, t_0)\mathbf{R}_{13}^{-1}(t_1, t_0)[\Delta\mathbf{r}_1(t_1) - \mathbf{R}_{14}(t_1, t_0)\lambda_{v_0}] + \mathbf{R}_{44}(t_2, t_0)\lambda_{v_0} + \mathbf{R}_{43}(t_2, t_1)\Delta\lambda_{r_1}.$$

Эти уравнения представим в виде

$$\mathbf{R}_1\lambda_{v_0} + \mathbf{B}_1\Delta\lambda_{r_1} = \mathbf{m}_1; \quad \mathbf{R}_2\lambda_{v_0} + \mathbf{B}_2\Delta\lambda_{r_1} = \mathbf{m}_2,$$

где

$$\mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_{14}(t_2, t_0) - \mathbf{R}_{13}(t_2, t_0)\mathbf{R}_{13}^{-1}(t_1, t_0)\mathbf{R}_{14}(t_1, t_0);$$

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{R}_{13}(t_2, t_1);$$

$$\mathbf{m}_1 = \Delta\mathbf{r}_2(t_2) - \mathbf{R}_{13}(t_2, t_0)\mathbf{R}_{13}^{-1}(t_1, t_0)\Delta\mathbf{r}_1(t_1);$$

$$\mathbf{R}_2 = \mathbf{R}_{44}(t_2, t_0) - \mathbf{R}_{43}(t_2, t_0)\mathbf{R}_{13}^{-1}(t_1, t_0)\mathbf{R}_{14}(t_1, t_0);$$

$$\mathbf{B}_2 = \mathbf{R}_{43}(t_2, t_1)\Delta\lambda_{r_1};$$

$$\mathbf{m}_2 = -\mathbf{R}_{43}(t_2, t_0)\mathbf{R}_{13}^{-1}(t_1, t_0)\Delta\mathbf{r}_1(t_1).$$

Решая эти уравнения, находим

$$\lambda_{v_0} = \mathbf{R}_1^{-1}[\mathbf{m}_1 - \mathbf{B}_1(\mathbf{B}_2 - \mathbf{R}_2\mathbf{R}_1^{-1}\mathbf{B}_1)^{-1} \times (\mathbf{m}_2 - \mathbf{R}_2\mathbf{R}_1^{-1}\mathbf{m}_1)]; \quad (12)$$

$$\Delta\lambda_{r_1} = (\mathbf{B}_2 - \mathbf{R}_2\mathbf{R}_1^{-1}\mathbf{B}_1)^{-1}(\mathbf{m}_2 - \mathbf{R}_2\mathbf{R}_1^{-1}\mathbf{m}_1). \quad (13)$$

Формулы (12) и (13) дают аналитическое решение задачи при $N = 2$.

В общем случае при $N > 2$ для решения системы (11) введем расширенные векторы

$$\Delta^T = [\Delta\mathbf{r}_1(t_1), \Delta\mathbf{r}_2(t_2), \dots, \Delta\mathbf{r}_N(t_N), 0];$$

$$p_\lambda^T = [\lambda_{r_0}, \lambda_{v_0}, \Delta\lambda_{r_1}, \Delta\lambda_{r_2}, \dots, \Delta\lambda_{r_{N-1}}]$$

и матрицу

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{13}(t_1, t_0) & \mathbf{R}_{14}(t_1, t_0) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{R}_{13}(t_2, t_0) & \mathbf{R}_{14}(t_2, t_0) & \mathbf{R}_{13}(t_2, t_1) & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{R}_{13}(t_N, t_0) & \mathbf{R}_{14}(t_N, t_0) & \mathbf{R}_{13}(t_N, t_1) & \dots & \dots & \mathbf{R}_{13}(t_N, t_{N-1}) \\ \mathbf{R}_{43}(t_N, t_0) & \mathbf{R}_{44}(t_N, t_0) & \mathbf{R}_{43}(t_N, t_1) & \dots & \dots & \mathbf{R}_{43}(t_N, t_{N-1}) \end{bmatrix}.$$

С учетом введенных обозначений система (11) принимает вид

$$\mathbf{Q}p_\lambda = \Delta.$$

Следовательно,

$$p_\lambda = \mathbf{Q}^{-1}\Delta. \quad (14)$$

Оптимальное управление при $t \in [t_j, t_{j+1}]$ определится как

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{B}^T(t)\lambda(t), \quad (15)$$

где

$$\lambda(t) = [\lambda_r, \lambda_v]^T;$$

$$\lambda_r(t) = \mathbf{R}_{31}(t, t_0)\mathbf{x}_0 + \mathbf{R}_{32}(t, t_0)\mathbf{v}_0 + \mathbf{R}_{32}(t, t_0)\lambda_{r_0} + \mathbf{R}_{33}(t, t_0)\lambda_{v_0} + \sum_{i=1}^j \mathbf{R}_{32}(t, t_i)\Delta\lambda_{r_i};$$

$$\lambda_v(t) = \mathbf{R}_{43}(t, t_0)\lambda_{r_0} + \mathbf{R}_{44}(t, t_0)\lambda_{v_0} + \sum_{i=1}^j \mathbf{R}_{32}(t, t_i)\Delta\lambda_{r_i};$$

$$t \in [t_j, t_{j+1}]; j = \overline{0, N-1}.$$

Полученное аналитическое решение (15) может быть эффективно использовано в рамках комбинированного метода решения многоточечных задач оптимального управления последовательной встречей АО с системой подвижных ЦО при совместной

оптимизации как управляющих функций, так и временных параметров сближения объектов.

Список литературы

1. Величенко В. В. Условия оптимальности в задачах управления с промежуточными условиями значений координат // ДАН СССР. 1967. Т. 174. № 5. С. 1011–1013.
2. Жирнов В. А., Лидов М. Л. К задаче сближения с несколькими астероидами // Космические исследования. 1989. Т. XXVII. № 1. С. 3–8.
3. Жирнов В. А., Лидов М. Л. Решение задачи сближения с несколькими астероидами алгоритмом оптимальной коррекции // Космические исследования. 1988. Т. XXVI. № 4. С. 508–518.
4. Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М. Оптимизация управления в многоточечных задачах о встрече движений // Мехатроника, автоматизация, управление. № 11. 2009. С. 7–11.
5. Троицкий В. А. Вариационные задачи оптимизации процессов управления с функционалами, зависящими от промежуточных значений координат // ДАН СССР. Т.149. № 5. 1963. С. 268–271.
6. Федоренко Р. П. Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука, 1978. 488 с.

УДК 681.5.015: 681.5.033

Д. Н. Анисимов, канд. техн. наук, доц.,
AnisimovDN@mpei.ru

Д. А. Мьякинков, аспирант,
eddy_wind@mail.ru,

Московский энергетический институт
(технический университет)

Проблемы снижения погрешностей оценок параметров нелинейных динамических объектов при идентификации методом экспоненциальной модуляции

Рассмотрены вопросы идентификации нелинейных динамических объектов методом экспоненциальной модуляции. Проводится идентификация параметров линейной части объекта по переходной характеристике, искаженной как нелинейным элементом, так и случайной помехой. Обсуждается проблема выбора рабочего участка нелинейной характеристики (амплитуды и смещения входного сигнала), обеспечивающего наилучшие результаты идентификации, и целесообразность введения блока инверсии для компенсации влияния нелинейности. Предложен критерий, позволяющий судить о предпочтительном выборе рабочего участка статической характеристики.

Ключевые слова: идентификация, нелинейный динамический объект, статическая характеристика, рабочий участок

Введение

В данной статье рассматривается ряд аспектов, специфичных для идентификации нелинейных динамических объектов. В качестве основы предлагается использовать метод экспоненциальной мо-

дуляции. Он основан на умножении входного и выходного сигналов на специально формируемые модулирующие функции, представляющие собой затухающие экспоненты, и вычисления площадей под образованными кривыми. Этот метод, впервые описанный в статье [1] и получивший развитие в работах [2, 3], достаточно хорошо зарекомендовал себя при идентификации линейных динамических объектов. Однако поскольку практически все реальные объекты являются нелинейными, желательнее определить условия, при которых погрешности оценок параметров оставались бы приемлемыми. Выбор именно этого метода обусловлен тем, что оптимальным входным сигналом для него является ступенчатое воздействие [4], в то время как большинство наиболее распространенных методов (например, методы наименьших квадратов, максимального правдоподобия, инструментальной переменной) требуют входных сигналов с более богатым спектром [5], что создает дополнительные трудности при идентификации объектов с неоднозначными нелинейностями типа "люфт", "упор", "гистерезис" и др.

Ранее в работах [6, 7] была предложена методика идентификации параметров линейной части объекта по переходной характеристике, искаженной как нелинейным элементом, так и случайной помехой. Эти два фактора могут существенно влиять на погрешности оценивания. При этом актуальной является проблема выбора рабочего участка нелинейной характеристики (амплитуды и смещения входного сигнала), обеспечивающего наилучшие результаты идентификации. Для удобства аналитического решения данной проблемы целесообразно аппроксимировать статическую характеристику не-

линейного элемента некоторой достаточно простой монотонно возрастающей элементарной функцией, интегрируемой также в элементарных функциях (например, арктангенсом или затухающей экспонентой). При этом вид аппроксимирующей функции должен охватывать достаточно широкий класс реальных объектов, характеризующихся наличием более или менее выраженных участков "зоны нечувствительности" и "насыщения".

Рассматриваемый подход делает возможным формирование функции, обратной к аппроксимирующей, т. е. осуществление инверсии нелинейной характеристики в целях компенсации ее негативного влияния на оценки параметров. Однако в качестве аргумента обратной функции мы можем использовать только сигнал с выхода объекта. Этот сигнал является зашумленным, поэтому необходимо выяснить, к каким последствиям может привести преобразование сигнала помехи блоком инверсии.

Модель исследуемого объекта

При идентификации нелинейных систем их часто стремятся представить моделями Винера и Гаммерштейна. В модели Винера нелинейная часть системы расположена после линейной, в модели Гаммерштейна — наоборот. Поскольку в качестве входного используется ступенчатый сигнал, то присутствие нелинейности после линейной части системы вносит более существенные искажения в ее выходной сигнал. Поэтому модель Винера представляет больший интерес для исследования, и в данной статье ограничимся лишь рассмотрением этой модели (рис. 1).

Сигнал $x(t)$ подается на вход линейной части (ЛЧ) объекта с передаточной функцией

$$W_{\text{ЛЧ}}(s) = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + 1}, \quad (1)$$

после чего преобразуется нелинейным элементом, описываемым функцией $\varphi(h)$. Выходной сигнал нелинейного элемента $y(t)$ суммируется со случайной помехой $g(t)$, и получаемый в результате сигнал $z(t)$ регистрируется. Этот сигнал можно непосредственно использовать для идентификации параметров ЛЧ, а можно его подать на блок инверсии $\varphi^{-1}(z)$, и идентификацию проводить по преобразованному сигналу $u(t)$. Кроме того, на рис. 1 изображен сигнал $v(t)$, представляющий собой сумму сигналов на выходе линейной части $h(t)$ и случайной помехи $g(t)$. Этот сигнал мы не можем наблюдать на реальном объекте, однако он весьма полезен для исследований, поскольку позволяет судить о том, каковы были бы результаты идентификации в отсутствие нелинейности при прочих равных условиях.

Для аппроксимации нелинейной характеристики можно использовать различные функции. Так, в [6]

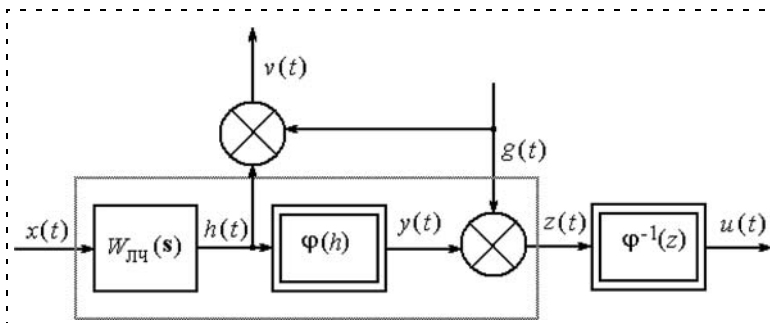


Рис. 1. Структурная схема исследуемого объекта

были представлены результаты исследования для объекта с насыщением без зоны нечувствительности. При этом рассматривали аппроксимирующую функцию

$$\varphi(h(t)) = \alpha + \beta \arctg(\gamma h(t) + \delta). \quad (2)$$

Ее обратная функция имеет вид

$$\varphi^{-1}(z(t)) = \frac{1}{\gamma} \left[\arctg\left(\frac{z(t) - \alpha}{\beta}\right) - \delta \right]. \quad (3)$$

Впоследствии аналогичные исследования были проведены для объекта с нелинейной характеристикой, описываемой затухающей экспонентой

$$\varphi(h(t)) = \alpha + \beta \text{sign}(h(t))(1 - \exp(-\gamma|h(t)|)), \quad (4)$$

имеющей обратную функцию

$$\varphi^{-1}(z(t)) = -\text{sign}\left(\frac{z(t) - \alpha}{\beta}\right) \frac{1}{\gamma} \ln \left[1 - \left| \frac{z(t) - \alpha}{\beta} \right| \right]. \quad (5)$$

В более общем случае модель нелинейной части объекта должна предусматривать также наличие зоны нечувствительности, поскольку она достаточно часто встречается на практике. Для описания нелинейной характеристики типа "зона нечувствительности + насыщение" можно предложить, например, функцию

$$\varphi(h(t)) = \beta \arctg(\gamma h(t))^3, \quad (6)$$

изображенную на рис. 2,

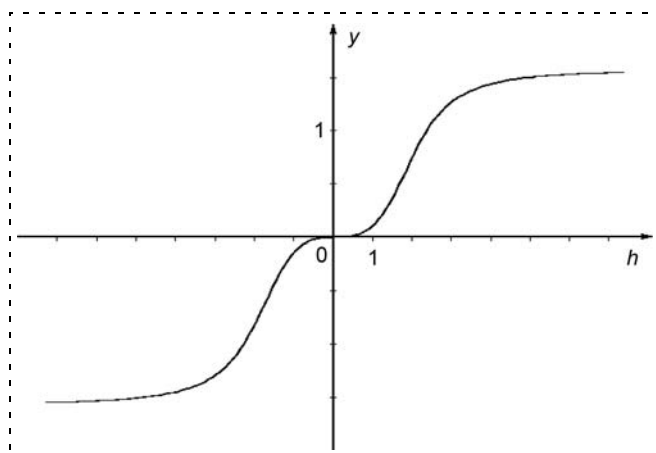


Рис. 2. Аппроксимация нелинейной характеристики "зона нечувствительности + насыщение" функцией (6)

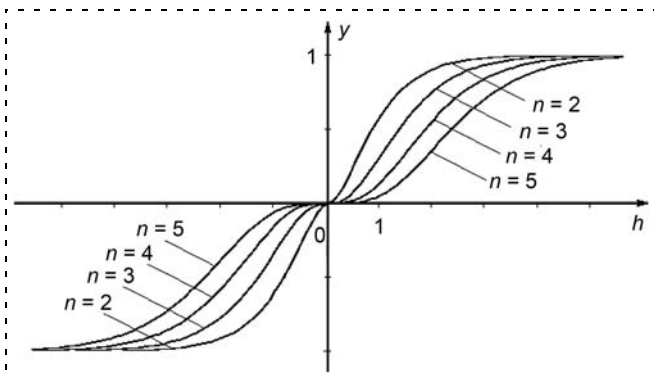


Рис. 3. Аппроксимация нелинейной характеристики "зона нечувствительности + насыщение" функцией (7) для разных значений n

или класс функций

$$\varphi(h(t)) = \beta \text{sign}(h(t)) \left[1 - \exp(-|\gamma h(t)|) \sum_{i=0}^n \frac{1}{i!} (\gamma h(t))^i \right], \quad n \in N, \quad (7)$$

изображенный на рис. 3 (в обоих случаях $\beta = 1, \gamma = 1$).

Заметим, что для функции, задаваемой выражением (6), легко можно найти обратную функцию:

$$\varphi^{-1}(z(t)) = \frac{1}{\gamma} \sqrt[3]{\frac{\text{tg} z(t)}{\beta}}. \quad (8)$$

Для класса функций (6) эту задачу нельзя решить аналитически, и для нахождения значений функции $\varphi^{-1}(z(t))$ приходится применять численные методы. Это, с одной стороны, несколько увеличивает время обработки сигналов, с другой стороны, показывает, что аппроксимация нелинейной характеристики при идентификации объекта является хотя и желательным, но необязательным этапом.

Показатели качества оценивания параметров

Для сравнения результатов идентификации объекта с передаточной функцией (1) в условиях помех обычно используют первые моменты распределений оценок параметров — математические ожидания

$M(\hat{a}_k), M(\hat{b}_i)$ и дисперсии $D(\hat{a}_k), D(\hat{b}_i)$. При этом, как показано в работах [3, 7, 9], целесообразно использовать безразмерный нормированный показатель качества (БНПК) Q , который позволяет учитывать смещения $|\Delta(\hat{a}_k)|, |\Delta(\hat{b}_i)|$ и дисперсии $D(\hat{a}_k),$

$D(\hat{b}_i)$ всех оценок:

$$Q = -\lg \left\{ \frac{1}{M(\hat{a}_1)} \sum_{k=1}^n [|\Delta(\hat{a}_k)| + \sqrt{D(\hat{a}_k)}]^{1/k} + \frac{1}{M(\hat{b}_1)} \times \sum_{i=1}^m \left[\left| \Delta\left(\frac{\hat{b}_i}{\hat{b}_0}\right) \right| + \sqrt{D\left(\frac{\hat{b}_i}{\hat{b}_0}\right)} \right]^{1/i} + \frac{\Delta(\hat{b}_0) + \sqrt{D(\hat{b}_0)}}{M(\hat{b}_0)} \right\}. \quad (9)$$

Чем больше значение этого показателя, тем выше считается качество идентификации. Этот показатель весьма удобен для исследования свойств того или иного метода.

В работе [6] был предложен критерий $J(h_1, h_2)$, позволяющий оценить погрешности оценок параметров при изменении амплитуды входного сигнала. Он представляет собой среднее отклонение нелинейной характеристики $\varphi(h)$, ограниченной точками (h_1, y_1) и (h_2, y_2) , от отрезка прямой $\varphi_1(h)$, проходящей через эти точки:

$$I(h_1, h_2) = \frac{1}{h_2 - h_1} \int_{h_1}^{h_2} [\varphi(h) - \varphi_1(h)] dh. \quad (10)$$

При этом предполагалось, что вторая производная нелинейной функции на рассматриваемом участке является знакопостоянной, поэтому в целях упрощения аналитического выражения критерия не учитывался знак отклонения. Однако для характеристик с зоной нечувствительности этот критерий не вполне подходит — как видно из рис. 2 и рис. 3, на всей области определения функций (6) и (7) вторая производная меняет знак три раза.

Поэтому предлагается модифицировать критерий (10) с учетом возможного изменения знака второй производной и того факта, что при проведении идентификации важную роль играет приращение полезного сигнала:

$$I(h_1, h_2) = -\lg \left\{ \frac{1}{[\varphi(h_2) - \varphi(h_1)]^2} \int_{h_1}^{h_2} [\varphi(h) - \varphi_1(h)]^2 dh \right\}. \quad (11)$$

Как следует из этого выражения, чем больше значение критерия $I(h_1, h_2)$, тем ближе статическая характеристика на рассматриваемом участке к линейной функции.

Заметим, что критерий (9) весьма удобен для сравнительного анализа свойств того или иного метода идентификации и исследования условий, влияющих на качество идентификации. Однако он требует, во-первых, знания истинных значений параметров объекта, во-вторых, достаточно большого объема статистических данных для определения смещений и дисперсий оценок. Это делает невозможным его использование непосредственно при идентификации реальных объектов. Что касается критерия (11), то для его использования достаточно получить статическую характеристику нелинейного элемента (причем, не обязательно в виде аналитического выражения). Таким образом, важно выяснить, можно ли на основании критерия (11) сделать суждение о выборе рабочего участка статической характеристики, обеспечивающего наилучшие оценки параметров линейной части объекта?

Проведение исследований

Очевидно, что $g(t) \equiv 0 \Leftrightarrow u(t) \equiv h(t)$, т. е. при отсутствии помехи удастся полностью компенсировать влияние нелинейной части. Однако при наличии помехи введение блока инверсии может по-разному сказаться на преобразовании измеряемого выходного сигнала объекта и, как следствие, точности идентификации параметров его линейной части. Поэтому необходимо оценить целесообразность введения блока инверсии на основании сравнения статистических характеристик оценок параметров линейной части объекта, получаемых по процессам $y(t)$, $z(t)$ и $u(t)$.

Рассмотрим поведение сигнала на выходе блока инверсии безотносительно к линейной части объекта. Для этого подадим на вход нелинейного элемента, описываемого выражением (6), линейно возрастающий сигнал $h(t) = h_0 + kt$, а к его выходу аддитивно приложим равномерно распределенный на интервале $[-A; A]$ белый шум $g(t)$. Процессы $u(h(t))$ и $v(h(t))$ изображены на рис. 4. На этом же рисунке для наглядности приведены статическая характеристика $\varphi(h)$ и ее первая производная $\varphi'(h) = \frac{d\varphi(h)}{dh}$.

Как видно на рис. 4, процесс $u(h(t))$ практически совпадает с процессом $v(h(t))$ на тех участках, где производная статической характеристики $\varphi'(h)$ максимальна. При малых значениях производной разброс значений $u(h(t))$ резко возрастает. Это связано с тем, что малые значения производной функции $\varphi(h)$ соответствуют большим значениям производной обратной функции $\varphi^{-1}(h)$, поэтому сигнал помехи на этих участках многократно усиливается. Функция плотности распределения сигнала $u(t)$ имеет следующий вид [8]:

$$f(u(t)) = \begin{cases} \frac{3\beta\gamma^3 u^2(t)}{2A(1+\gamma^6 u^6(t))} & \text{при } \frac{1}{\gamma} \operatorname{tg}\left(\frac{kt+h_0-A}{\beta}\right)^{1/3} \leq \\ \leq u(t) \leq \frac{1}{\gamma} \operatorname{tg}\left(\frac{kt+h_0+A}{\beta}\right)^{1/3}; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что введение блока инверсии дает положительный эффект для ограниченных амплитудах входного сигнала. Обоснуем теперь это утверждение с позиций оценивания параметров линейной части объекта.

Рассмотрим в качестве примера объект второго порядка с передаточной функцией линейной части $W_{\text{ЛЧ}}(s) = \frac{1}{a_2 s^2 + a_1 s + 1}$, $a_1 = 1$ с,

$a_2 = 1$ с² (колебательное звено с постоянной времени $T = 1$ с и декрементом затухания $\zeta = 0,5$).

Будем подавать на вход объекта ступенчатые сигналы вида $x(t) = X_0 + X_m \mathbf{1}_0(t)$. Рассмотрим изменение БНПК при варьировании смещения X_0 для значений амплитуды $X_m = 0,5$ (рис. 5) и $X_m = 2$ (рис. 6).

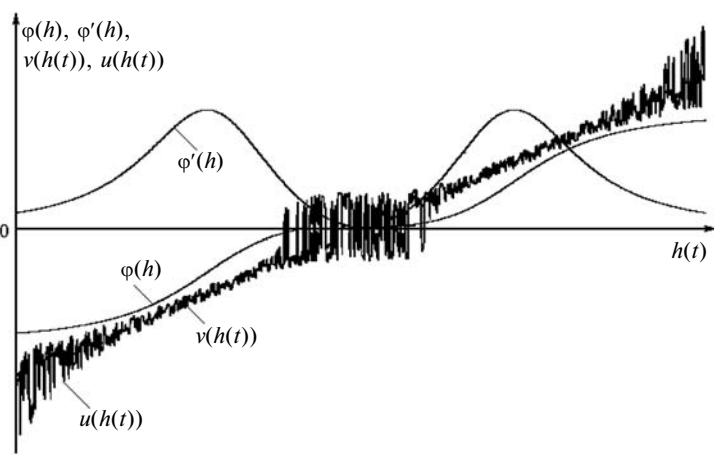


Рис. 4. Зашумленный процесс на выходе линейной части объекта $v(h(t))$, сигнал на выходе блока инверсии $u(h(t))$, статическая характеристика $\varphi(h)$ и ее первая производная $\varphi'(h)$

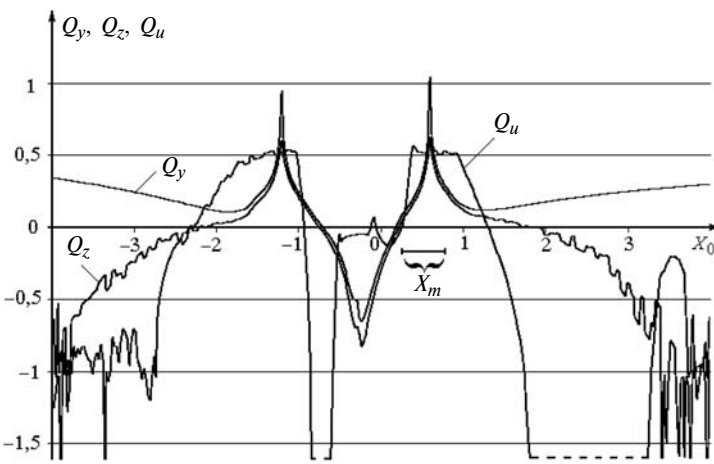


Рис. 5. Изменение БНПК Q_y , Q_z и Q_u при идентификации по процессам $y(t)$, $z(t)$ и $u(t)$. Амплитуда входного сигнала $X_m = 0,5$

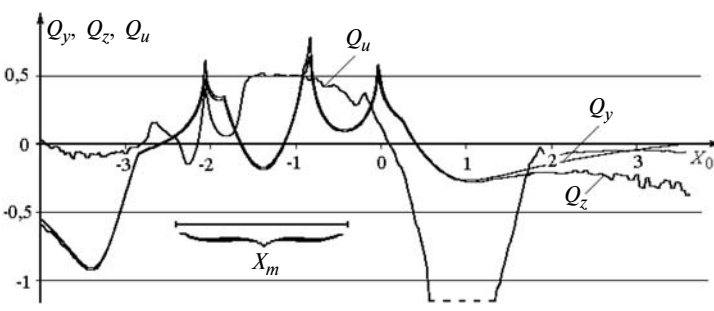


Рис. 6. Изменение БНПК Q_y , Q_z и Q_u при идентификации по процессам $y(t)$, $z(t)$ и $u(t)$. Амплитуда входного сигнала $X_m = 2$

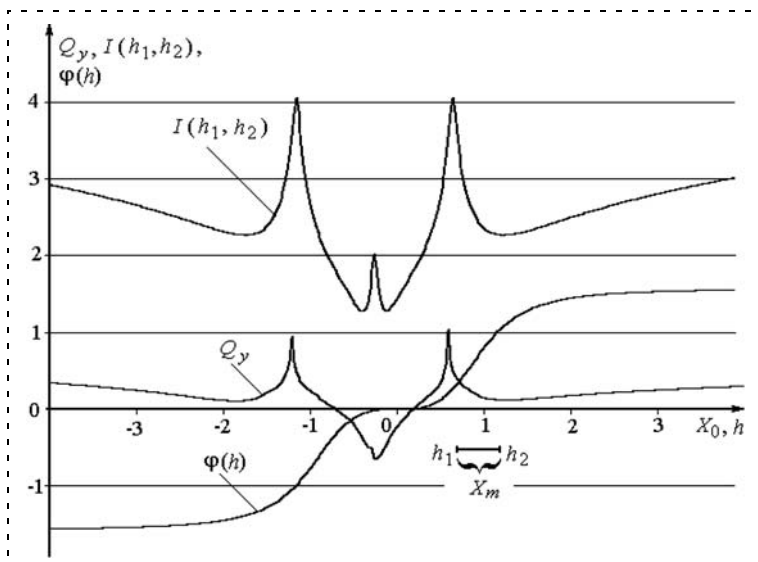


Рис. 7. Зависимости БНПК Q_y , получаемого при идентификации по процессу $y(t)$, критерия $I(h_1, h_2)$ и статическая характеристика $\varphi(h)$. Амплитуда входного сигнала $X_m = 0,5$

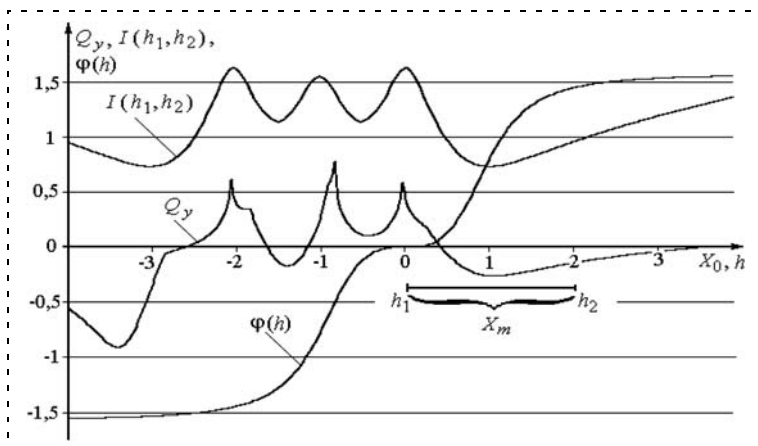


Рис. 8. Зависимости БНПК Q_y , получаемого при идентификации по процессу $y(t)$, критерия $I(h_1, h_2)$ и статическая характеристика $\varphi(h)$. Амплитуда входного сигнала $X_m = 2$

На рис. 7 и 8 приведены зависимости БНПК Q_y , получаемого при идентификации по незашумленному процессу $y(t)$, и критерия $I(h_1, h_2)$ от смещения входного сигнала X_0 для тех же значений амплитуды входного сигнала X_m . (Заметим, что если в передаточной функции (1) $b_0 = 1$, то $X_m = (h_2 - h_1)$) Для наглядности на этих рисунках изображены также статические характеристики $\varphi(h)$.

Выводы

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 5–8, позволяет сделать следующие выводы.

1. При малых значениях амплитуды входного сигнала, когда отношение шум/сигнал велико, погрешности оценок параметров линейной части объекта с использованием блока инверсии оказываются выше, чем без него практически для любого участка нелинейной статической характеристики.

Это обусловлено тем, что погрешности оценивания, вызванные нелинейным искажением выходного сигнала малы по сравнению с погрешностями, вызванными действием помехи. В этом случае введение блока инверсии нецелесообразно.

2. При средних значениях амплитуды входного сигнала существует участок статической характеристики, где введение блока инверсии дает ощутимый эффект. Это участок, соответствующий максимальному наклону статической характеристики.

3. При больших значениях амплитуды входного сигнала влияние помехи будет возрастать по мере приближения переходного процесса к установившемуся режиму, что также делает нецелесообразным введение блока инверсии.

4. Абсциссы экстремумов функций, характеризующих БНПК Q_y , получаемый при идентификации по процессу $y(t)$, и критерия $I(h_1, h_2)$ оказываются весьма близкими. Аналогичные исследования, проведенные для нелинейных элементов, описываемых выражениями (7), подтверждают этот факт. Таким образом, появляется возможность получить априорные сведения о предпочтительном выборе рабочего участка нелинейной характеристики.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-01-00049-а).

Список литературы

1. Анисимов Д. Н. Идентификация линейных динамических объектов методом экспоненциальной модуляции // Вестник МЭИ. 1994. № 2. С. 68–72.
2. Анисимов Д. Н., Хрипков А. В. Законы распределения оценок параметров динамических объектов при идентификации методом экспоненциальной модуляции // Проблемы управления. 2007. № 4. С. 14–18.
3. Хрипков А. В. Исследование и применение интегрально-модуляционных методов идентификации линейных динамических объектов // Дисс. ... канд. тех. наук. М.: МЭИ, 2009. 173 с.
4. Анисимов Д. Н. Некоторые аспекты применения метода экспоненциальной модуляции для идентификации динамических объектов // Тр. II междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO'03, Москва, 29–31 января 2003 г. С. 1602–1618.
5. Гроп Д. Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979. 302 с.
6. Анисимов Д. Н., Мякинков Д. А. Методика проведения эксперимента при идентификации нелинейных динамических объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 11. С. 5–9.
7. Анисимов Д. Н., Мякинков Д. А. Выбор рабочего участка при идентификации нелинейного динамического объекта // Тр. XVIII междунар. конф. "Информационные средства и технологии". Москва, 20–22 октября 2010. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. Т. 3. С. 226–232.
8. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1979. 496 с.
9. Анисимов Д. Н., Хрипков А. В. Разработка критерия качества оценивания параметров динамических объектов при идентификации различными методами // Тр. XVII междунар. науч.-тех. конф. "Информационные средства и технологии". Москва, 20–22 октября 2009. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. Т. 3. С. 163–168.

УДК 004.896

И. М. Макаров, акад. РАН, зав. каф.,
В. М. Лохин, д-р техн. наук, проф.,
С. В. Манько, д-р техн. наук, проф.,
М. П. Романов, д-р техн. наук, проф.,
cpd@mirea.ru,
МГТУ МИРЭА

Принципы построения и проблемы разработки мультиагентных робототехнических систем

Рассматриваются принципы построения, проблемы разработки и обобщенная функциональная структура мультиагентных робототехнических систем.

Ключевые слова: мультиагентная робототехническая система, интеллектуальный автономный робот, групповое управление роботами

Введение. Потенциальные преимущества и возможности применения мультиагентных робототехнических систем (МАРС) открывают широкие перспективы для развития множества различных прикладных областей. Исследованию проблем разработки таких систем, в которых выполнение требуемых задач обеспечивается силами интеллектуальных автономных роботов, взаимодействующих друг с другом, во всем мире уделяется приоритетное внимание.

Результаты работ, проводимых по данной тематике в США, Японии, странах Юго-Восточной Азии и Европы опережающими темпами, не только на практике подтверждают реальность и целесообразность создания МАРС, но и свидетельствуют о существовании ряда альтернативных подходов к их построению.

Специфика организации совместной работы автономных роботов в составе мультиагентной системы неизбежно будет накладывать определенные требования к их интеллектуальным, функциональным и коммуникативным возможностям.

Анализ этих требований, а также разработка соответствующих моделей и алгоритмов группового управления, формирования и распределения заданий, планирования поведения, обработки и обобщения разнородной сенсорной и командной информации представляет крайний интерес для создания перспективных образцов как интеллектуальных автономных роботов, так и мультиагентных систем, организуемых на их основе.

В связи с этим вопросы обоснования принципов построения и формирования обобщенной структуры МАРС, поднимаемые в данной статье, приобретают первостепенное значение.

Проблемы разработки, принципы построения и обобщенная функциональная структура мультиагентных робототехнических систем. Основные требования к функциональным возможностям МАРС связаны с необходимостью анализа поставленной прикладной задачи, ее декомпозиции на множество подзадач или составных технологических операций и их последующего выполнения в автономном режиме совместными усилиями отдельных исполнителей, координирующих свои действия. Создание таких систем, в полной мере отвечающих предъявляемым к ним требованиям, сопряжено с решением следующих ключевых проблем:

- организации развитого человеко-машинного интерфейса, позволяющего обеспечить оперативную постановку общей прикладной задачи;
- организации целесообразного взаимодействия между отдельными агентами в интересах выполнения общей прикладной задачи;
- обеспечения автономности агентов и системы в целом.

Каждая из перечисленных проблем является крайне сложной и многогранной, затрагивающей целый ряд взаимосвязанных вопросов.

Так, например, проблема организации целесообразных взаимодействий между активными элементами в составе МАРС охватывает две важнейшие составляющие:

- планирование координированных действий агентов (исходя из анализа поставленной прикладной задачи, хода ее выполнения и имеющихся ресурсов) с последующим формированием и выдачей соответствующих заданий;
- обеспечение информационно-логического взаимодействия и совместимости агентов (как на уровне использования единых форматов представления данных, систем сообщений, команд и целеуказаний, так и на уровне технических каналов их передачи).

Очевидно при этом, что унификация и стандартизация аппаратных средств и программного обеспечения бортовых систем управления роботами как активных элементов мультиагентной системы является тем важнейшим фактором, который будет определять возможность и эффективность обеспечения их информационно-логического взаимодействия и совместимости.

Кроме того, обеспечение и информационно-логического, и физического взаимодействия агентов,

так или иначе, сопряжено с необходимостью обобщения собираемых ими в процессе функционирования разнородных сенсорных данных, а также формирования единой модели внешней среды и рабочей обстановки. Только наличие таких моделей будет обуславливать возможность принятия решений, адекватных текущей ситуации.

Другая, не менее важная, проблема построения МАРС связана с организацией развитого человеко-машинного интерфейса, позволяющего обеспечить оперативную постановку общей прикладной задачи. Способ его построения должен, с одной стороны, полностью удовлетворять требованиям удобства и простоты работы оператора (который обеспечивает формирование формализованного описания задач функционирования МАРС, действуя нередко в условиях экстремальности полевой обстановки, при наличии дефицита времени, воздействии внешних возмущений, стресса и т. д.), а с другой стороны — отвечать особенностям закладываемых методов и алгоритмов планирования координированных действий агентов.

В свою очередь, обеспечение автономности робота (как самостоятельного элемента мультиагентной системы, априорно ориентируемого на работу в условиях неопределенности) предполагает наличие интеллектуальной бортовой системы управления, имеющей иерархическую структуру и реализующей весь спектр необходимых функций на основе комплексного применения современных технологий обработки знаний [1–3] (рис. 1, см. вторую сторону обложки). В общем случае в состав этой иерархии должны включаться следующие основные подсистемы:

- подсистема стратегического уровня, обеспечивающая решение задач планирования целесооб-

разного поведения с учетом особенностей текущей ситуации, прогноза развития событий и обучения системы;

- подсистема тактического уровня, обеспечивающая решение задач планирования перемещений и управления движением с учетом неопределенностей внешней среды;
- подсистема исполнительного уровня, обеспечивающая реализацию сформированных законов управления;
- подсистема сбора и обработки сенсорной, командной и других видов внешней информации, обеспечивающая построение модели рабочей обстановки и среды в целом с замыканием контуров управления всех уровней.

Подсистемы управления различных уровней строятся в соответствии с функциональной структурой (рис. 2), которая объединяет в своем составе базу знаний о сценариях выполнения целесообразных действий и правилах поведения, базу данных о состоянии и условиях функционирования объекта, механизм логического вывода и базу алгоритмов, выбираемых в зависимости от специфики решаемых задач и особенностей текущей ситуации.

Следует отметить, что проблема разработки автономных роботов, которая сама по себе также является крайне сложной (а особенно для образцов мини- и микроклассов), может во многом считаться практически разрешенной. Наглядным подтверждением этому факту служат результаты работ, успешно проводимых в МГТУ им. Н. Э. Баумана, МИЭТ, ЦНИИРТК, МИРЭА и других научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях по созданию экспериментальных образцов робототехнических систем и комплексов, дей-



Рис. 2. Общая функциональная структура подсистем различных уровней интеллектуального управления и методика формирования соответствующей базы знаний

ствующих в полуавтоматическом и автономном режимах.

Так, например, в рамках фундаментальных и прикладных исследований, выполняемых в МИРЭА, разработан не только ряд экспериментальных образцов, но и технологии создания автономных мини- и микророботов различных видов базирования на основе использования унифицированных аппаратных и программных средств, комплектуемых по блочно-модульному принципу. При этом в состав унифицированных технологических решений (прошедших успешную апробацию в составе автономных образцов мобильных мини-роботов на колесном и гусеничном шасси, микроподводного и микролетательного аппаратов) включаются универсальная многопроцессорная бортовая система управления [4] и интеллектуальная бортовая система навигации [5] (технические характеристики которых представлены в на рис. 3 (см. третью сторону обложки) и на рис. 4), программно-алгоритмические средства интеллектуального человеко-машинного интерфейса, комплексной обработки разнородной сенсорной информации и построения единых информационных полей, планирования целесообразного поведения и управления движением [6], а также локальной навигации на основе визуальной обратной связи.

Обеспечение автономности МАРС в целом является комплексной проблемой, существо которой связано с интеграцией и увязкой всей совокупности предлагаемых подходов и решений, регламентирующих построение человеко-машинного интерфейса, организацию целесообразного взаимодействия между отдельными агентами в процессе их совместного функционирования, обобщение разнородной сенсорной и командной информации для формирования единой модели внешней среды и рабочей обстановки, а также обеспечение собственно автономности самих агентов.

Анализ выявленных проблем (рис. 5) позволяет перейти к поиску путей их решения и сформулировать те концептуальные положения, которые будут регламентировать архитектуру МАРС. Так, к фунда-

ментальным основам построения МАРС необходимо отнести следующие ключевые принципы:

- единство целей функционирования агентов;
- адекватность интеллектуальных и функциональных возможностей агентов сложности решаемых задач;
- единство информационного пространства системы;
- детерминированность сетевой архитектуры, обеспечивающей поддержку единого информационного пространства системы;
- взаимная информационно-логическая совместимость агентов.

Обеспечение принципа единства целей функционирования агентов может и должно быть реализовано за счет выбора соответствующих методов и алгоритмов человеко-машинного интерфейса

	Состав
	<ul style="list-style-type: none"> • Трёхкоординатный акселерометр • Трёхкоординатный датчик угловой скорости • Трёхкоординатный датчик магнитного курса • Двухкоординатный инклинометр • GPS-приемник • Барометрический датчик высоты (глубины) • Четыре микропроцессора для предварительной обработки навигационной информации
	Основные технические характеристики
	<ul style="list-style-type: none"> • Габаритные размеры 50 x 70 x 20 мм • Масса 46 г • Измерение ускорения с точностью до четвертого знака • Температурная компенсация • Компенсация инструментальных погрешностей • Частота измеряемых ускорений до 400 Гц • Диапазоны измерения ускорений +/- 5g (+-2g) • Частота измеряемых угловых скоростей... до 400 Гц • Диапазон измерения угловой скорости 300 °/с • Диапазон измерения магнитного поля... +/- 1,9 Гс • Крутизна характеристики датчика магнитного курса 1 В/Гс • GPS • Диапазон измерения инклинометров... +/- 60° (+-10°) • Точность определения угла.....01° (0.001°)

Рис. 4. Интеллектуальная бортовая система навигации



Рис. 5. Ключевые проблемы разработки и внедрения мультиагентных робототехнических систем

для описания общей прикладной задачи, планирования действий и распределения заданий среди состава исполнителей с учетом имеющихся у них ресурсов.

Обеспечение адекватности интеллектуальных и функциональных возможностей агентов сложности решаемых задач реализуется как на этапе априорного выбора состава потенциальных исполнителей, так и на уровне разработки средств и методов планирования действий и последующего распределения индивидуальных заданий.

Обеспечение единства информационного пространства системы должно осуществляться за счет организации взаимного обмена всей совокупностью необходимых данных между агентами на основе комплексного применения современных сетевых технологий с использованием соответствующих аппаратных и программных средств.

Детерминированность сетевой архитектуры системы обуславливает необходимость априорного выбора одного из трех возможных вариантов обеспечения информационно-логического взаимодействия между агентами в соответствии с централизованной, децентрализованной или смешанной схемами (рис. 6).

Важно иметь в виду, что централизованная схема построения МАРС (рис. 6, а) предполагает наличие некоторого узлового элемента (в качестве которого может выступать и один из агентов), реализующего командные функции по анализу и контролю выполнения поставленной прикладной задачи, формированию и распределению заданий на основе ее декомпозиции, сбору и комплексиро-

ванию поступающей информации с последующей интерпретацией полученных моделей текущей ситуации, рабочей обстановки и т. д. Главный недостаток этой схемы заключается в ее уязвимости, поскольку выход из строя командного узла неизбежно приводит к нарушению работоспособности МАРС в целом. В свою очередь, очевидным достоинством централизованного построения МАРС является сравнительно малое (по отношению к другим вариантам) число информационных потоков, определяемое взаимосвязями узлового и периферийных элементов.

Вариант децентрализованного построения МАРС (рис. 6, б) предполагает равноправие ее активных элементов, самостоятельно принимающих решения о доле своего возможного участия в процессе достижения общих целей с учетом действий соисполнителей. При этом каждый из агентов должен обладать всей полнотой информации о ходе выполнения поставленной задачи, рабочей обстановке, внешней среде и т. д. Соответствующие требования к организации потоков передачи данных в системе обуславливают необходимость установления информационного взаимодействия каждого агента с каждым по сетевым каналам связи. Таким образом, при прочих равных условиях определенным недостатком данной схемы является повышенная интенсивность суммарного информационного обмена, что потенциально может ограничивать предельно допустимую численность состава МАРС при превышении характеристик пропускной способности сети. Главное достоинство децентрализованного варианта построения МАРС заключается в сохранении ее работоспособности при выходе из строя одного или нескольких элементов.

Смешанные схемы построения МАРС (рис. 6, в, г) являются компромиссными вариантами, при которых недостатки централизованной и децентрализованной архитектур проявляются в меньшей степени.

Обеспечение взаимной информационно-логической совместимости агентов должно осуществляться за счет использования единой системы команд и форматов передачи данных, а также унификации программно-алгоритмических средств их обработки и принятия решений.

Следует отметить, что построение МАРС на основе перечисленных принципов (согласно существу которых интеллектуальные агенты объединяются единством целей, функционируют в едином информационном пространстве в соответствии с априорно выбранной архитектурой и схемой взаимодействия на основе единого стандарта команд и форматов передачи данных) позволит обеспечить автономность ее работы при решении поставленных задач в условиях неопределенности.

Предложенная концепция построения МАРС фактически предопределяет ее функциональную

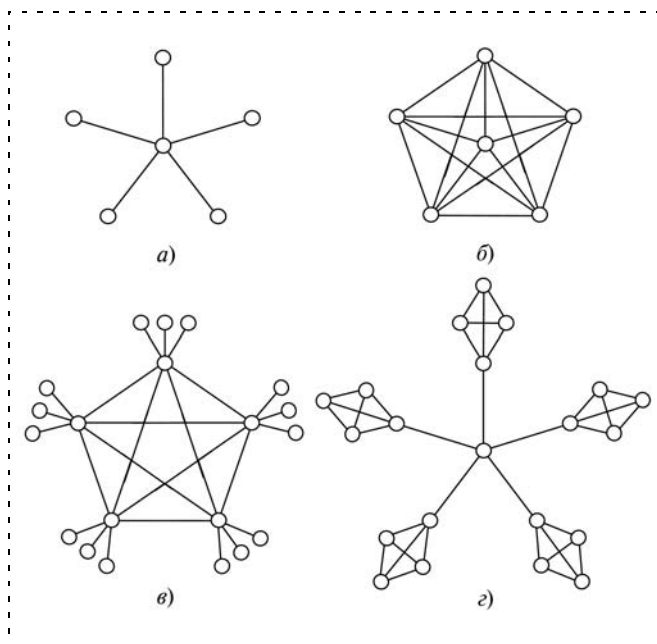


Рис. 6. Возможные варианты сетевой архитектуры МАРС: а — централизованная; б — децентрализованная; в, г — разновидности смешанной

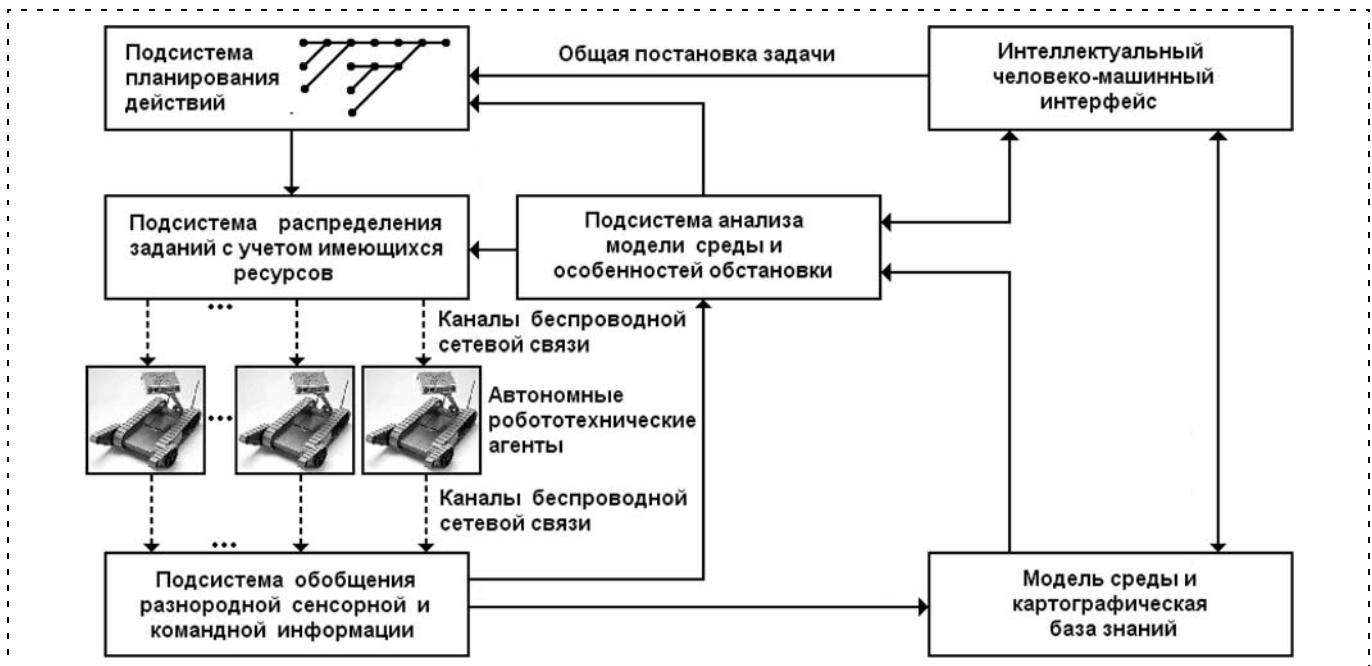


Рис. 7. Обобщенная функциональная структура МАРС

структуру (рис. 7), включающую в свой состав набор следующих основных модулей:

- интеллектуального человеко-машинного интерфейса, который должен обеспечивать возможность оперативного описания общей прикладной задачи, оценки корректности ее постановки в режиме моделирования, спецификации среды предполагаемого функционирования и действующих в ней ограничений (на уровне закладки картографической базы знаний), а также отображения телеметрических и сенсорных данных о работе отдельных агентов и их взаимодействии;
- планирования действий и формирования заданий на основе анализа поставленной прикладной задачи и текущих результатов ее выполнения отдельными агентами;
- распределения текущих заданий между исполнителями исходя из имеющихся у них ресурсов с учетом особенностей сложившейся обстановки и специфики среды функционирования;
- сбора и обобщения разнородной сенсорной и командной информации отдельных агентов для построения модели среды, адекватной сложившейся обстановке;
- построения модели среды на основе интерпретации обобщенной информации, поступающей от агентов;
- анализа модели среды для выявления особенностей текущей обстановки.

В МАРС с централизованной архитектурой совокупность функций по планированию действий и распределению заданий, обобщению и интерпретации разнородной информации, построению (или

уточнению) модели среды и анализу текущей обстановки осуществляется командным центром (или некоторым из агентов, взявшим на себя командно-координирующую роль) с последующей передачей каждого из принятых решений в адрес конкретного исполнителя по беспроводным каналам сетевой связи.

В МАРС с децентрализованной архитектурой реализация соответствующих функций должна осуществляться самостоятельно каждым из агентов с передачей принятого решения по беспроводным каналам связи всем оставшимся.

Оба варианта архитектурного решения представляют самостоятельный интерес и требуют детальной проработки как на теоретическом, так и на экспериментальном уровнях.

Заключение. Предложенная концепция построения МАРС имеет достаточно общий характер и определяет ключевые задачи их создания. Важно, что состав этих задач, связанных с планированием целесообразных действий и распределением заданий между исполнителями с учетом имеющихся у них ресурсов, обеспечением информационного сетевого взаимодействия и формированием модели внешней обстановки, а также с организацией человеко-машинного интерфейса, остается практически неизменным для МАРС различных типов и назначения.

Разработка соответствующих моделей, методов и алгоритмов группового управления позволит говорить о возможности унификации программного обеспечения, адаптируемого для перспективных образцов МАРС в интересах конкретных приложений.

Список литературы

1. **Интеллектуальные роботы:** учебное пособие для вузов / Под ред. Е. Ю. Юревича / И. А. Каляев, В. М. Лохин, И. М. Макаров и др. М.: Машиностроение, 2007.
2. **Интеллектуальные системы автоматического управления** / Под ред. И. М. Макарова, В. М. Лохина / И. М. Макаров, В. М. Лохин, С. В. Манько и др. М.: Наука, 2001.
3. **Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления** / И. М. Макаров, В. М. Лохин, С. В. Манько, М. П. Романов. М.: Наука, 2006.
4. **Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Александрова Р. И.** и др. Универсальная бортовая система управления

для автономных мобильных объектов ВВТ // Матер. III науч.-практ. конф. "Перспективные системы и задачи управления". Т. 1. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008.

5. **Романов М. П., Гарцев И. Б.** Интеллектуальная система навигации для малоразмерных подвижных объектов ВВТ // Матер. III науч.-практ. конф. "Перспективные системы и задачи управления". Т. 2. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008.

6. **Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П.** Технологии обработки командной информации и управления поведением в интеллектуальных робототехнических системах // Информационные технологии. Приложение. 2005. № 7. 32 с.

УДК 004.8

В. Ю. Осипов, д-р техн. наук, проф.,
osipov_vasily@mail.ru,

Учреждение Российской академии наук
Санкт-Петербургский институт информатики РАН

Стирание устаревшей информации в ассоциативных интеллектуальных системах

Предложен подход к стиранию устаревшей информации в ассоциативных интеллектуальных системах (АИС) на основе частичного отражения сигналов от слоев нейронных сетей. Разработана математическая модель нейронной сети с таким стиранием. Приведены результаты моделирования. Показано, что предлагаемый подход позволяет повысить устойчивость функционирования АИС.

Ключевые слова: ассоциативная интеллектуальная система, нейронная сеть, стирание информации

Введение

Поиск путей совершенствования ассоциативных интеллектуальных систем (АИС), создаваемых на основе искусственных нейронных сетей, в настоящее время представляет большой практический интерес. Повышенное внимание к АИС связано с возможностью решения ими трудноформализуемых творческих задач, с отсутствием необходимости программирования этих систем в традиционном смысле и с высоким параллелизмом процессов обработки информации.

Весь интеллект в АИС формируется через их постоянное обучение, восприятие закономерностей реального мира и реакций на него со стороны самих систем.

Постоянное обучение АИС и воздействие их на внешний мир предусматривает непрерывное обновление информации в памяти этих систем.

Объем памяти любой реальной АИС всегда конечен. В связи с этим при запоминании новой информации система должна освобождаться от устаревших данных, забывать их. В противном случае память ее будет перегружена и АИС потеряет свои

способности по интеллектуальной обработке информации.

Вопросам запоминания информации нейронными сетями, составляющими основу АИС, посвящена достаточно обширная литература [1–4]. Однако аспекты забывания (стирания) устаревшей информации в АИС оставлены без должного внимания. В основном авторы ограничиваются вопросами торможения при возбуждении нейронов в процессе распознавания сигналов [1–4].

В данной статье рассматривается подход к стиранию устаревшей информации в АИС на основе частичного отражения сигналов от слоев нейронных сетей, обеспечивающий устойчивую непрерывную интеллектуальную обработку данных.

Постановка задачи

Рассмотрим ассоциативную интеллектуальную систему, представляющую собой совокупность взаимосвязанных датчиков, нейронной сети — искусственного "мозга" и исполнительных устройств, предназначенных для обработки информации и взаимодействия с внешним миром в соответствии с воспринимаемыми закономерными связями между отдельными сигналами и их элементами [5, 6].

Пусть в качестве "мозга" АИС выступает рекуррентная нейронная сеть с управляемыми синапсами [7, 8], детализированная структура которой приведена на рис. 1, где $1.1, \dots, 1.n, 2.1, \dots, 2.n$ — нейроны соответственно первого и второго слоя; $C_{1.1}, \dots, C_{1.n}, C_{2.1}, \dots, C_{2.n}$ — входные емкости нейронов; n — число нейронов в каждом слое; $E3$ — единичная задержка. Синапсы нейронов на рис. 1 отображены в виде овалов. Особенность этой сети в следующем. За счет управления синапсами из этой двухслойной рекуррентной сети можно сформировать сеть практически с любой структурой, несомненно, в пределах имеющегося числа элементов. На вход сети последовательно подаются совокупности единичных образов, несущие всю информацию о сигналах, поступающих в АИС. Обратные связи сети замыкают контуры со временем задержки единичных образов, меньшим времени невосприимчивости

нейронов после возбуждения. Путем управления динамическими синапсами в сети реализуются пространственные сдвиги совокупностей единичных образов так, что эти совокупности продвигаются вдоль ее слоев. Исключается наложение обратных результатов распознавания на прямые совокупности, передаваемые от слоя к слою. При прохождении единичных образов через синапсы в прямом направлении они снимают с них информацию о предыдущих воздействиях и оставляют информацию о своем появлении через увеличение весов синапсов. Нейроны сети возбуждаются в случае, если они не в состояниях рефрактерности (невосприимчивости) и входные воздействия превышают заданный порог.

В интересах исключения перегрузки АИС предлагается частично отражать совокупности единичных образов от принимающих слоев ее нейронной сети к передающим слоям и частично стирать этими отраженными совокупностями запомненные результаты распознавания.

Требуется доказать, что такое решение позволяет обеспечить устойчивую непрерывную интеллектуальную обработку информации в АИС.

Математическая модель нейронной сети

Допустим, что количество заряда Q , переносимого от каждого элемента единичной задержки (на которые поступают единичные образы (импульсы)) к первому блоку динамических синапсов (рис. 1), постоянно, не зависит от того, как изменяются веса синапсов.

Тогда можно оперировать некоторой средней амплитудой тока \bar{I}_0 , переносящего заряд Q за некоторый средний промежуток времени $\overline{\Delta t}$, $Q = \bar{I}_0 \overline{\Delta t} = \text{const}$.

С учетом этого амплитуду импульсного тока, проходящего в прямом направлении через каждый синапс первого блока динамических синапсов относительно момента времени t , можно определить как

$$I_{ij}(t) = \bar{I}_0 \frac{w_{ij}(t)}{\sum_{j=1}^n w_{ij}(t)} \delta_i(t), \quad (1)$$

где $w_{ij}(t)$ — прямые веса (проводимости) синапсов, связывающих i -е нейроны первого слоя с j -ми нейронами второго слоя; $\delta_i(t)$ — функция, принимающая

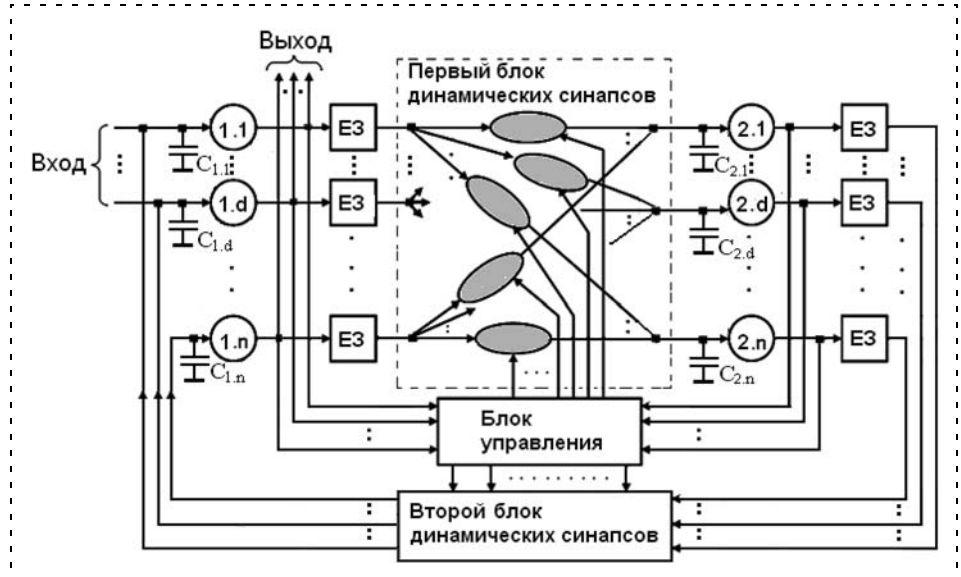


Рис. 1. Структура нейронной сети

значение 1, когда i -й нейрон возбужден, и 0 — в других случаях; n — число нейронов в каждом слое.

На вход каждого j -го нейрона второго слоя нейронов от возбужденных нейронов первого слоя поступает суммарный импульсный ток

$$I_{j\Sigma}(t) = \sum_{j=1}^n I_{ij}(t).$$

Поступающие на входы j -х нейронов единичные образы (импульсы) частично воспринимаются этими нейронами и частично отражаются к передающему слою с коэффициентом отражения

$$K_j(t) = \frac{I_{j\Sigma}^*(t)}{I_{j\Sigma}(t)} = \frac{z_{jH} - z_{jC}(t)}{z_{jH} + z_{jC}(t)},$$

где $I_{j\Sigma}^*(t)$ — суммарный ток отражения единичных образов от j -го нейрона; z_{jH} — комплексное входное сопротивление нейрона (в частном случае оно может быть равно активному сопротивлению R_{Bx}); $z_{jC}(t)$ — волновое сопротивление цепи, связывающей входное сопротивление j -го нейрона с нейронами передающего слоя. В общем виде оно равно

$$z_{jC}(t) = \sqrt{\frac{R_{j\Sigma}(t) + i \cdot 2\pi f L}{G_{j\Sigma}(t) + i \cdot 2\pi f C}},$$

где $R_{j\Sigma}(t)$ — суммарное сопротивление синапсов цепи, связывающей входное сопротивление R_{Bx} j -го нейрона с нейронами передающего слоя,

$R_{j\Sigma}(t) = 1 / \sum_{i=1}^n w_{ij}^*(t)$; $w_{ij}^*(t)$ — обратные веса (проводимости) синапсов; $G_{j\Sigma}$ — суммарная проводимость, характерная для этой цепи как длинной ли-

нии; L, C — индуктивность и емкость этой цепи как длинной линии; f — частота колебаний.

В частном случае, при $G_{\Sigma} = 0$ и $L = 0$

$$z_{jc}(t) = \sqrt{\frac{R_{j\Sigma}(t)\tau_{и}}{\pi C}},$$

$\tau_{и}$ — длительность единичного образа (импульса).

С учетом этого коэффициент отражения по току может быть равен

$$K_j(t) = 1 - \frac{2}{1 + \sqrt{\chi/R_{j\Sigma}(t)}},$$

где $\chi = \pi R_{\text{вх}}^2 C/\tau_{и} = \text{const}$. Видно, что изменение $K_j(t)$ во времени зависит только от изменения

$$R_{j\Sigma}(t) = 1/\sum_{i=1}^n w_{ij}^*(t).$$

Зная $K_j(t)$ и $I_{j\Sigma}(t)$, можно найти суммарный ток $I_{j\Sigma}^*(t)$ отражения единичных образов от j -го нейрона: $I_{j\Sigma}^*(t) = I_{j\Sigma}(t)K_j(t)$. Соответственно ток, протекающий через входное сопротивление j -го нейрона, равен $I_{\text{вх}}(t) = I_{j\Sigma}(t) - I_{j\Sigma}^*(t)$.

Токи, протекающие встречно через отдельные синапсы, можно определить как

$$I_{ij}^*(t) = I_{j\Sigma}^*(t) \frac{w_{ij}^*(t)}{\sum_{i=1}^n w_{ij}^*(t)}. \quad (2)$$

При протекании тока $I_{ij}^*(t)$ через синапсы в обратном направлении частично стираются запомненные на них результаты распознавания. Назовем $I_{ij}^*(t)$ током стирания.

Особенность динамических синапсов сети в следующем. Веса (с точки зрения электрической проводимости) $w_{ij}(t)$ синапсов определяются через произведение их весовых коэффициентов $k_{ij}(t)$ и функций ослабления $\beta(r_{ij}(t))$ [7]. При этом предлагается различать прямые

$$w_{ij}(t) = k_{ij}(t)\beta(r_{ij}(t)) \quad (3)$$

и обратные веса

$$w_{ij}^*(t) = k_{ij}^*(t)\beta(r_{ij}(t)) \quad (4)$$

синапсов.

Каждая из связей (синапсов) имеет свое значение функции ослабления $\beta(r_{ij})$ единичных образов, зависящее от r_{ij} — удаленности связываемых через синапсы нейронов (расстояний между ними на плоскости одного из слоев). Предполагается, что расстояние между взаимодействующими слоями нейронной сети стремится к нулю.

Функция $\beta(r_{ij})$ может определяться согласно известному выражению [6]:

$$\beta(r_{ij}) = \frac{1}{1 + \alpha h \sqrt{r_{ij}}},$$

где h — степень корня, чем она выше, тем шире ассоциативное пространственное взаимодействие в сети; α — положительный коэффициент.

Изменяя r_{ij} , можно осуществлять пространственные сдвиги совокупностей единичных образов вдоль слоев [6].

Весовые коэффициенты $k_{ij}(t)$ и $k_{ij}^*(t)$ в (3) и (4) зависят от воздействий на синапсы единичных образов и выступают в качестве элементов долговременной памяти сети. Для прямого веса (прямой проводимости) $w_{ij}(t)$ каждого синапса весовой коэффициент можно определить как

$$k_{ij}(t) = 1 - \exp(-\gamma g_{ij}(t)), \quad (5)$$

а для обратного веса (обратной проводимости) $w_{ij}^*(t)$, для случая $g_{ij}(t) \geq g_0$, в виде

$$k_{ij}^*(t) = 1 - \exp(-\gamma(g_{ij}(t) - g_0)), \quad (6)$$

где γ — постоянный коэффициент, а $g_0 = \text{const}$.

В других случаях при $g_{ij}(t) < g_0$ обратный вес (проводимость) $w_{ij}^*(t) = 0$.

Величину $g_{ij}(t)$ в (5) и (6) можно трактовать как число запомненных на синапсе единичных образов на момент времени t , а $(g_{ij}(t) - g_0)$ — как число запомненных единичных образов, которые могут быть стерты с синапса.

С учетом (5) и (6) прямые и обратные веса синапсов могут быть определены по формулам

$$w_{ij}(t) = \frac{1}{1 + \alpha h \sqrt{r_{ij}}} (1 - \exp(-\gamma g_{ij}(t))); \quad (7)$$

$$w_{ij}^*(t) = \frac{1}{1 + \alpha h \sqrt{r_{ij}}} (1 - \exp(-\gamma(g_{ij}(t) - g_0))). \quad (8)$$

Эти веса однозначно связаны друг с другом:

$$w_{ij}^*(t) = w_{ij}(t)\exp(\gamma g_0) - \frac{1}{1 + \alpha h \sqrt{r_{ij}}} (\exp(\gamma g_0) - 1).$$

По значению $w_{ij}(t)$ можно определить $w_{ij}^*(t)$ и, наоборот, по $w_{ij}^*(t)$ найти $w_{ij}(t)$.

Напомним, что при протекании тока от возбужденных нейронов через одни синапсы в прямом направлении на них запоминаются текущие результаты распознавания. Такому запоминанию соответствует увеличение прямой и обратной прово-

димости этих синапсов. В этом случае величину $g_{ij}(t)$, входящую в (5), (6), можно рассчитать как

$$g_{ij}(t) = g_{ij}(t - \Delta t) + B(I_{ij}(t)),$$

где $I_{ij}(t)$ — ток, протекающий через синапс в прямом направлении, определяемый согласно (1).

При прохождении тока встречно через другие синапсы уменьшаются их прямые и обратные веса (обратные и прямые проводимости). Величину $g_{ij}(t)$ в зависимости от этого тока $I_{ij}^*(t)$ стирания (2), при условии, что $g_{ij}(t - \Delta t) - g_0 \geq B^*(I_{ij}^*(t))$, можно определить как

$$g_{ij}(t) = g_{ij}(t - \Delta t) - B^*(I_{ij}^*(t)),$$

иначе $g_{ij}(t) = g_{ij}(t - \Delta t)$.

В частном случае $B(I_{ij}(t)) = AI_{ij}(t)$, а $B^*(I_{ij}^*(t)) = DI_{ij}^*(t)$, где A, D — константы, причем D должно быть больше A .

Чем больше ток от возбужденных нейронов через одни синапсы в прямом направлении, тем выше уровень частичного стирания ранее запомненных результатов распознавания с других синапсов частично отраженными токами, протекающими через них в обратном направлении. Уровень частичного стирания результатов распознавания зависит также от входной проводимости $w_{вх} = 1/R_{вх}$ возбуждаемых нейронов.

В случаях, когда ток $I_{вх}(t)$, протекающий через входное сопротивление j -го нейрона второго слоя, больше порогового значения $I_{пор}$, нейрон возбуждается. На его выходе формируется единичный образ (импульс), и нейрон переходит в состояние невосприимчивости (рефрактерности). В состоянии невосприимчивости каждый нейрон находится одинаковое время, которое больше, чем время задержки единичных образов в двухслойных контурах сети, структурная схема которой приведена на рис. 1.

Все эти положения справедливы и для передачи совокупностей единичных образов от второго слоя к первому.

Заметим, что при обработке сигналов в сети постоянно осуществляется смена одних возбужденных нейронов на другие, и, соответственно происходит смена запоминания на частичное стирание с синапсов сети результатов распознавания.

При непрерывной обработке информации в нейронной сети, начиная с некоторого момента, число запоминаемых текущих единичных образов становится равным числу стираемых ранее запомненных единичных образов. После запоминания текущей информации на одних элементах сети частично стира-

ются запомненные результаты распознавания с других синапсов. Освобождается память для запоминания последующей информации. Так достигается устойчивое непрерывное функционирование сети, причем за счет предлагаемого частичного стирания ранее запомненных результатов распознавания полностью стираются в первую очередь более отдаленные результаты. Кроме этого, частичное стирание ранее запомненных результатов стимулирует поиск недостающей информации, чтобы сбалансировать уровень запоминания с уровнем ее стирания. Это, наряду с повышением устойчивости, повышает уровень интеллектуальности обработки информации в нейронной сети.

За счет приоритетности коротких связей в нейронной сети между входом и выходом сети легко устанавливается однозначное соответствие между составляющими входных и выходных сигналов.

Результаты моделирования

Была разработана программная модель нейронной сети, реализующей предлагаемый подход. Для разработки этой модели использовалась среда MATLAB. Каждый слой нейронной сети состоял из 2100 нейронов. За счет пространственных сдвигов передаваемых совокупностей единичных образов от слоя к слою каждый слой разбивался на 50 логических полей по 42 нейрона в каждом. Последовательные совокупности единичных образов вводились в сеть через первое логическое поле, а снимались с последнего поля (рис. 2). На рис. 2 стрелками показаны направления продвижения совокупностей вдоль слоев. Последовательность этих совокупностей содержала строчки из романа А. С. Пушкина "Евгений Онегин": "Мой дядя самых честных правил, когда не в шутку занемог, он уважать себя заставил и лучше выдумать не мог.....". Всего в сеть последовательно вводилось 150 совокупностей единичных образов, включая пустые совокупности, соответствующие пробелам между словами. Ввод в сеть совокупностей осуществлялся с периодом четыре такта. На каждом временном такте оценивался суммарный вес $W_{\Sigma}(t)$ синапсов сети:

$$W_{\Sigma}(t) = \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n w_{kij}(t),$$

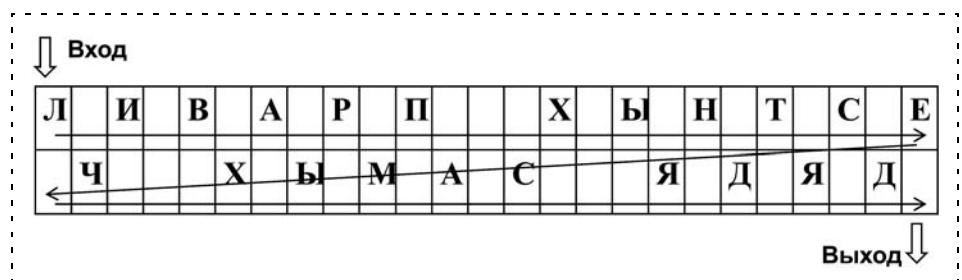


Рис. 2. Логическая структура первого слоя сети

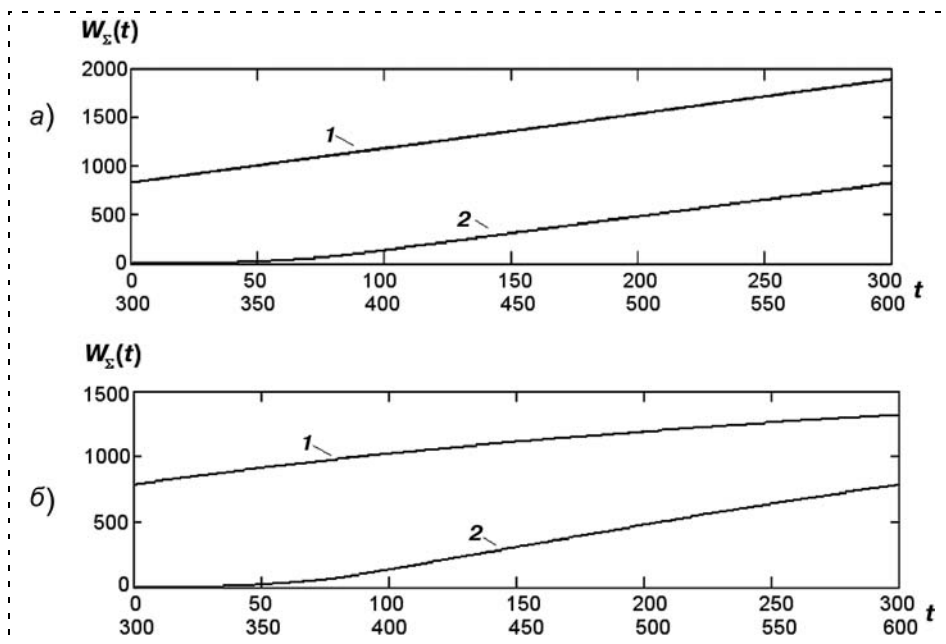


Рис. 3. Изменение суммарного веса синапсов сети во времени:
a — без частичного стирания запомненных результатов распознавания; *б* — при наличии такого стирания (кривые 1 — для $t = 300 \dots 600$; 2 — для $t = 0 \dots 300$)

где $w_{kij}(t)$ — прямой вес ij -го синапса в k -блоке динамических синапсов сети (см. рис. 1); n — число нейронов в каждом слое сети.

Результаты оценки $W_{\Sigma}(t)$ приведены на рис. 3, *a*, *б*, где кривые 1 соответствуют интервалу времени $t = 300 \dots 600$, а кривые 2 — $t = 0 \dots 300$ условных тактов. Из анализа рис. 3, *a* видно, что при отсутствии частичного стирания с синапсов запомненных результатов распознавания частично отраженными от принимающих слоев совокупностями единичных образов суммарный вес синапсов непрерывно растет. Он стремится к предельному суммарному весу

$$W_{\Sigma\text{пред}} = \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \beta_{kij}$$

при котором все весовые коэффициенты $k_{kij}(t) \rightarrow 1$, где β_{kij} — функция ослабления для ij -го синапса в k -м блоке динамических синапсов сети. В этом предельном случае невозможно запоминание и извлечение информации из сети. Сеть перегружена.

Согласно предлагаемому подходу, предусматривающему частичное стирание запомненных результатов распознавания частично отраженными от принимающих слоев совокупностями единичных образов, суммарный вес $W_{\Sigma}(t)$ синапсов с течением времени стабилизируется на уровне, обеспечивающем непрерывную устойчивую интеллектуальную обработку информации в нейронной сети. Из рис. 3, *б* видно, что прирост суммарного веса $W_{\Sigma}(t)$ синапсов с течением времени замедляется, в отли-

чие от предыдущего случая (рис. 3, *a*). Целесообразно этот вес выводить на уровень $W_{\Sigma\text{пред}}(t)/2$, обеспечивающий наибольшую емкость памяти на синапсах. Это осуществимо, например, предварительным заданием соответствующего значения входной проводимости нейронов.

Анализ смены состояний слоев сети, реализующей предлагаемый подход, также подтвердил повышение устойчивости и интеллектуальности обработки информации.

Выводы

1. За счет частичного стирания запомненных результатов распознавания в АИС достижимо расширение функциональных возможностей этих систем.

2. Предложенный подход к стиранию устаревшей информации в АИС на основе частичного отражения сигналов от слоев их нейронных сетей позволяет обеспечить устойчивую непрерывную интеллектуальную обработку входных сигналов.

3. Нейронная сеть, составляющая основу АИС, может быть реализована с применением известной элементной базы или путем эмулирования на современных вычислительных системах.

4. Полученные решения могут найти применение при построении перспективных интеллектуальных систем и машин.

Список литературы

1. **Галушкин А. И.** Теория нейронных сетей. Кн. 1: Учебное пособие для вузов / Под общей ред. А. И. Галушкина. М.: ИПРЖР, 2000. 416 с.
2. **Осовский С.** Нейронные сети для обработки информации / Пер. с английского И. Д. Рудницкого. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
3. **Хайкин С.** Нейронные сети: полный курс, 2-е издание / Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. 1103 с.
4. **Remme M. W. H., Wadman W. J.** Control of a local neural network by feedforward and feedback inhibition // Neurocomputing. 2004. 58–60. P. 683–689.
5. **Осипов В. Ю.** Прямое и обратное преобразование сигналов в ассоциативных интеллектуальных машинах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 7. С. 27–32.
6. **Осипов В. Ю.** Оптимизация ассоциативных интеллектуальных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 3. С. 35–39.
7. **Осипов В. Ю.** Рекуррентная нейронная сеть с управляемыми синапсами // Информационные технологии. № 7. 2010. С. 43–47.
8. **Осипов В. Ю.** Устойчивость рекуррентных нейронных сетей с управляемыми синапсами // Информационные технологии. 2011. № 9. С. 69–73.

УДК 519.6

С. В. Волкоморов, аспирант,
А. П. Карпенко, д-р физ.-мат. наук, проф.,
 arkarpenko@mail.ru,
 МГТУ им. Н. Э. Баумана

Оптимизация геометрии многосекционного манипулятора типа "хобот"

Рассматривается задача оптимизации формы и размеров секций многосекционного робота-манипулятора типа "хобот" по различным критериям оптимальности. Приводится постановка задачи, методы ее решения, результаты оптимизации

Ключевые слова: робототехника, манипуляторы, оптимизация геометрии, решение некорректных задач

Введение

В настоящее время в машиностроении актуальной является задача разработки технологических машин для выполнения механической обработки внутренних поверхностей полостей сложной формы, например, внутренних каналов охлаждаемых лопаток турбин для авиационной и космической техники. В технологиях преодоления последствий катастроф необходимы машины для организации доступа к внутренним объемам разрушенных зданий и сооружений. Аналогичные задачи возникают также при проведении ремонтных и восстановительных работ в трубопроводах, при проведении ряда хирургических операций и т. д. Обычно для решения перечисленных задач используются многозвенные рычажные либо гибкие манипуляторы.

Серьезным недостатком указанных манипуляторов является их недостаточная жесткость, усложняющая управление ими и затрудняющая использование высокоэнергетического обрабатывающего инструмента и достижение высокой точности обработки.

В значительной мере преодолеть указанные недостатки могут манипуляторы типа "хобот", построенные на основе многосекционных механизмов с параллельной структурой [1]. Варианты структуры секций такого манипулятора рассмотрены в работах [2, 3].

Одними из первых при конструировании многосекционного манипулятора типа "хобот" возникают следующие задачи: 1) найти оптимальную форму секций манипулятора; 2) найти их оптимальные размеры. Отметим, что если исходить только из экономических критериев, то оптимальным может

быть манипулятор, все секции которого одинаковы. Например, известный манипуляционный робот LX-4 компании Logabex [4] состоит из четырех идентичных механизмов параллельной кинематики типа "гексапод" (платформа Стюарта).

Данная статья обобщает и развивает результаты работ [5, 6] и построена следующим образом. В первом разделе приводится постановка задачи. Следующие пять разделов посвящены оптимизации формы продольного сечения робота-манипулятора, рассматриваемого как балка равного сопротивления изгибу, нагруженная сосредоточенным моментом, сосредоточенной силой, распределенным весом балки и т. д. В седьмом разделе рассмотрена задача оптимизации длин секций манипулятора. В заключении сформулированы основные результаты работы.

1. Постановка задачи

"Хобот" манипулятора представим в виде консольной балки сплошного круглого сечения, плотность материала которой постоянна и равна ρ . Вообще говоря, в зависимости от вида нагружения и сечения балки наряду с нормальными напряжениями существенными могут быть и касательные напряжения. Для балки сплошного сечения последними напряжениями можно пренебречь [7]. Поэтому рассмотрим консольную балку, которая функционирует в условиях изгиба и в которой имеют место только нормальные напряжения.

В сделанных предположениях максимальное напряжение σ в сечении X "хобота" при изгибе в плоскости Oxy равно

$$\sigma(X) = \frac{M_{\xi}(X)}{W_{\zeta}(X)} = \sigma \leq [\sigma], \quad (1)$$

где $M_{\xi}(X)$ — изгибающий момент в этом сечении, $W_{\zeta}(Z)$ — момент сопротивления сечения, $[\sigma]$ — максимально допустимое напряжение (рис. 1).

Из выражения (1) следует, что у "хобота" равного сопротивления изгибу момент сопротивления сечения должен быть прямо пропорционален изгибающему моменту в этом сечении:

$$W_{\zeta}(X) = \frac{M(X)}{\sigma}.$$

Для сплошного "хобота" круглого сечения это выражение можно записать в виде

$$r(X) = \sqrt[3]{\frac{4M_{\xi}(X)}{\pi\sigma}}, \quad (2)$$

где $r(X)$ — радиус "хобота" в сечении X .

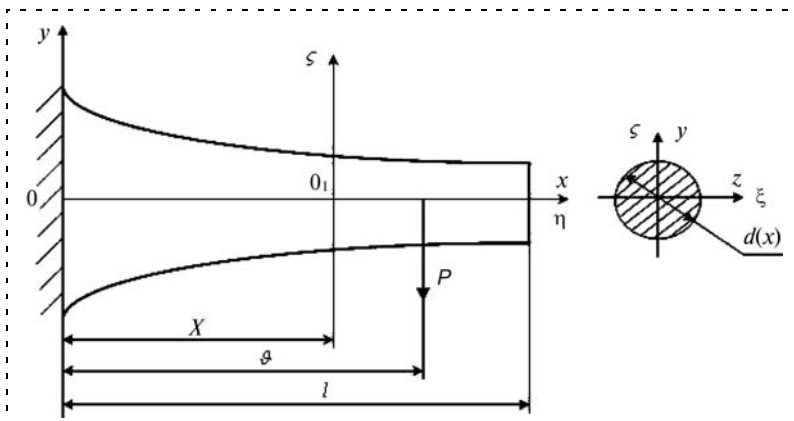


Рис. 1. К определению консольной балки равного сопротивления изгибу

Выражение (2) показывает, что в "хоботе" равного сопротивления изгибу закон изменения радиуса $r(x)$ определяется законом изменения момента $M_x(X)$, который, в свою очередь, определяется видом нагружения "хобота".

Последовательно рассмотрим следующие виды нагружения "хобота": нагружение внешним сосредоточенным моментом; внешней сосредоточенной силой; распределенным весом "хобота"; силой, обусловленной ускоренным движением частей "хобота"; силой лобового сопротивления внешней среды.

2. Нагружение сосредоточенным моментом

Из выражения (2) следует, что "хобот", нагруженный на своем свободном конце сосредоточенным моментом $M = \text{const}$ (рис. 2, а), будет "хоботом" равного сопротивления изгибу, если его сечение постоянно и радиус определяется формулой

$$r = \sqrt[3]{\frac{4M}{\pi\sigma}} = \text{const.}$$

3. Нагружение сосредоточенной силой

Если "хобот" равного сопротивления изгибу нагружен сосредоточенной силой P (рис. 2, б), то из выражения (2) следует, что его радиус определяется формулой

$$r(X) = \sqrt[3]{\frac{4P(l-X)}{\pi\sigma}}. \quad (3)$$

Зависимость (3) иллюстрирует рис. 3.

4. Нагружение весом "хобота"

Закон изменения радиуса "хобота" по его длине, который обеспечивает равные напряжения во всех сечениях "хобота" при учете распределенной нагрузки на "хобот", обусловленной его весом (рис. 2, в), определяется интегральным уравнением [5, 6]

$$\frac{r^3(X)}{4} \sigma = \int_X^l xr^2(x)dx - g\rho X \int r^2(x)dx. \quad (4)$$

В работах [5, 6] показано, что задача (4) является некорректно поставленной, так что для ее решения необходимо использовать тот или иной способ регуляризации [8].

Поскольку аналитическое решение уравнения (4) не удастся, рассмотрим один из возможных численных методов решения этого уравнения. Преобразуем уравнение к задаче вариационного исчисления

$$\min_{r(X)} \Phi(r) = 0, r(X) \in C^1[0; l], \quad (5)$$

где $C^1[0; l]$ — пространство неотрицательных функций, непрерывных на интервале $[0; l]$ вместе со своей первой производной;

$$\Phi(r) = \int_0^l \left(\int_X^l xr^2(x)dx - \rho X \int r^2(x)dx - \frac{r^3(X)}{4} a_1 \right)^2 dX.$$

Рассмотрим равномерную сетку с n узлами, покрывающую интервал $[0; l]$. Значения функции $r(X)$ в узлах этой сетки обозначим r_1, r_2, \dots, r_n и введем в рассмотрение $(n \times 1)$ -вектор $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_n)$. В результате задача (5) запишется в виде

$$\min_{\mathbf{r}} \Phi(\mathbf{r}) = 0, \mathbf{r} \in D_r, \quad (6)$$

где $D_r = \{\mathbf{r} | r_i \geq 0, i \in [1:n]\}$ — множество допустимых значений вектора варьируемых параметров \mathbf{r} .

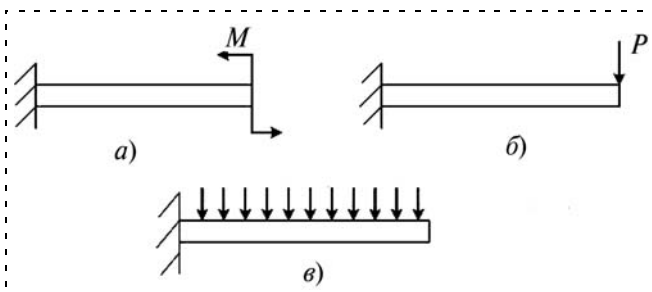


Рис. 2. Виды нагружения "хобота":

а — сосредоточенный момент; б — сосредоточенная сила; в — распределенная сила

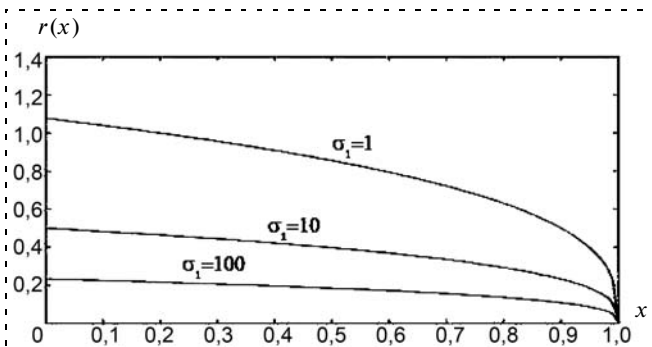


Рис. 3. Форма образующей "хобота" равного сопротивления изгибу при нагружении сосредоточенной силой: $l = 1; P = 1$

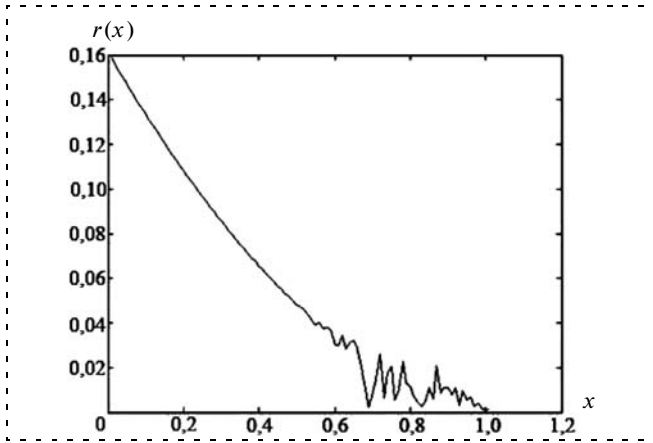


Рис. 4. Иллюстрация некорректности задач (4)–(6): $l = 1$; $g\rho = 1$; $\sigma = 10$

Задача (6) представляет собой задачу многомерной глобальной условной оптимизации, приближенное решение которой может быть найдено многими методами. Используем сведение этой задачи к задаче многомерной глобальной безусловной оптимизации с помощью метода штрафных функций. Для решения последней задачи, а также последующих аналогичных задач используем метод Нелдера—Мида в комбинации с методом мултистарта [9].

Некорректность задач (4)–(6) иллюстрирует рис. 4, полученный по изложенной выше схеме. Рисунку соответствует невязка решения, равная $\sim 1,4 \cdot 10^{-12}$.

Рис. 4 получен при использовании штрафной функции

$$U(\Lambda, \mathbf{r}) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{r}_i^2,$$

где $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$, $\lambda_i > 0$ — вектор коэффициентов штрафа;

$$\bar{r}_i = \begin{cases} 0, & r_i \geq 0, \\ r_i, & r_i < 0. \end{cases}$$

4.1. Регуляризация с помощью стабилизирующего функционала. В соответствии с методикой решения некорректных задач [8] заменим критерий оптимальности $\Phi(r)$ критерием вида

$$\tilde{\Phi}(r) = \Phi(r) + \gamma\Omega(r),$$

где $\Omega(r)$ — стабилизирующий функционал; γ — положительная константа (весовой множитель). Логичным является построение стабилизирующих функционалов на основе требования гладкости решения задачи (4). С этой точки зрения рассмотрим функционалы вида

$$\Omega_1(r) = \int_0^l (r'(x))^2 dx, \quad \Omega_2(r) = \int_0^l (r''(x))^2 dx.$$

Некоторые результаты численного решения задачи (6) с критерием оптимальности $\tilde{\Phi}(\mathbf{r})$ при ис-

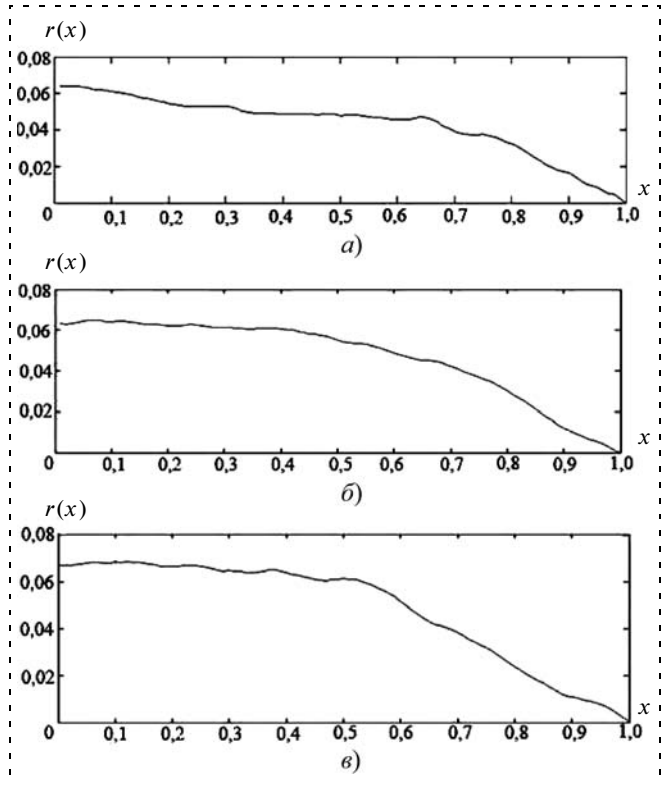


Рис. 5. Решение задачи (4) — регуляризация с помощью стабилизирующего функционала $\Omega_1(r)$ ($l = 1$; $g\rho = 1$; $\sigma = 10$):

$a - \gamma = 2 \cdot 10^{-6}$, $\tilde{\Phi}^* = 4,49 \cdot 10^{-7}$, $\Omega_1^* = 0,001$; $б - \gamma = 4 \cdot 10^{-6}$, $\tilde{\Phi}^* = 4,61 \cdot 10^{-8}$, $\Omega_1^* = 0,008$; $в - \gamma = 8 \cdot 10^{-6}$, $\tilde{\Phi}^* = 8,16 \cdot 10^{-8}$, $\Omega_1^* = 0,009$

пользовании стабилизирующего функционала $\Omega(r)$ и начального приближения $r^0(x) = 0,1(1 - x)$ приведены на рис. 5. Здесь $\tilde{\Phi}^*$ — достигнутое значение функционала $\tilde{\Phi}(r)$ (невязка), Ω_1^* — соответствующее значение стабилизирующего функционала.

Рис. 5 показывает, что использование стабилизирующего функционала $\Omega_1(r)$ позволяет подобрать такие значения весового множителя γ , которые обеспечивают квазигладкое решение, значительно отличающееся от начального приближения $r^0(x)$. В то же время, с точки зрения практического применения, полученные решения являются явно недостаточно гладкими и могут служить лишь основой для аппроксимации подходящими гладкими функциями.

Аналогичные результаты дает использование стабилизирующего функционала $\Omega_2(r)$.

4.2. Регуляризация с помощью кубической аппроксимации решения. Будем искать функцию $r(x)$ в виде кубического полинома

$$r(x) = r_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3,$$

где c_1, c_2, c_3 — неизвестные константы, а $r_0 = r(0)$ — заданная константа. Введем в рассмотрение трех-

мерный вектор $\mathbf{C} = (c_1, c_2, c_3)$. Задача (6) в результате преобразуется в трехмерную задачу глобальной безусловной оптимизации

$$\min_{\mathbf{C}} \Phi(\mathbf{C}) = \Phi(\mathbf{C}^*) = 0, \mathbf{C} \in R^3, \quad (7)$$

решение которой при некоторых значениях величины r_0 иллюстрирует рис. 6.

Рис. 6 показывает, что кубические параболы обеспечивают требуемую гладкость и достаточно малую невязку решения (от $\tilde{\Phi}^* = 1,6 \cdot 10^{-16}$ при $r_0 = 0,1$ до $\tilde{\Phi}^* = 7,2 \cdot 10^{-4}$ при $r_0 = 1,0$).

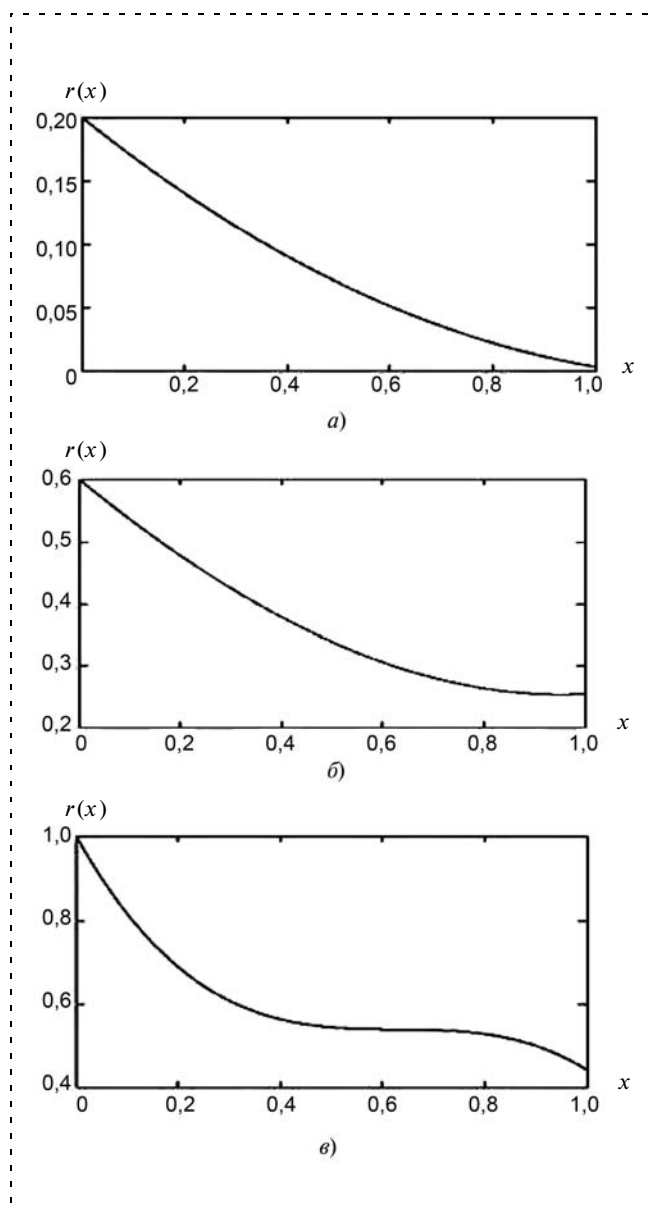


Рис. 6. Решение задачи (4) — регуляризация с помощью кубической аппроксимации ($l = 1$; $g_p = 1$; $\sigma = 10$):

$a - r_0 = 0,2$; $\tilde{\Phi}^* = 7,2 \cdot 10^{-4}$; $\delta - r_0 = 0,6$; $\tilde{\Phi}^* = 5,02 \cdot 10^{-6}$; $\epsilon - r_0 = 1,0$; $\tilde{\Phi}^* = 7,2 \cdot 10^{-4}$

5. Нагружение силой, обусловленной моментом инерции

Положим, что при любом $X \in [0; l)$ часть "хобота", расположенная правее его сечения X , совершает вращательное движение с угловым ускорением $\dot{\omega}$, оставаясь прямолинейной, т. е. будем вести речь о малых угловых перемещениях "хобота" (см. рис. 1). Интегральное уравнение для определения $r(x)$ в этом случае имеет вид [5, 6]

$$\frac{\pi r^3(X)}{4} \sigma = 4g_p \dot{\omega} \int_X^l \left((x - X)^2 r(x) + \frac{1}{3} r^2(x) \right) dx. \quad (8)$$

Выполним регуляризацию этого уравнения с помощью кубических сплайнов — будем искать функцию $r(x)$ в виде

$$r(x) = \begin{cases} r_0 + c_1^1 x + c_2^1 x^2 + c_3^1 x^3, & x \in [0; 0,5], \\ c_0^2 + c_1^2 x + c_2^2 x^2 + c_3^2 x^3, & x \in [0,5; 1,0], \end{cases} \quad (9)$$

где $c_0^i, c_1^i, c_2^i, c_3^i$ — неизвестные константы; $i = 1, 2$.

Потребуем в точке $x = 0,5$ непрерывности функции $r(x)$ и ее первой производной. Из этих условий имеем

$$\begin{aligned} r_0 + 0,5c_1^1 + 0,5^2c_2^1 + 0,5^3c_3^1 &= \\ &= c_0^2 + 0,5c_1^2 + 0,5^2c_2^2 + 0,5^3c_3^2; \end{aligned}$$

$$c_1^1 + c_2^1 + 0,75c_3^1 = 2c_1^2 + c_2^2 + 0,75^2c_3^2.$$

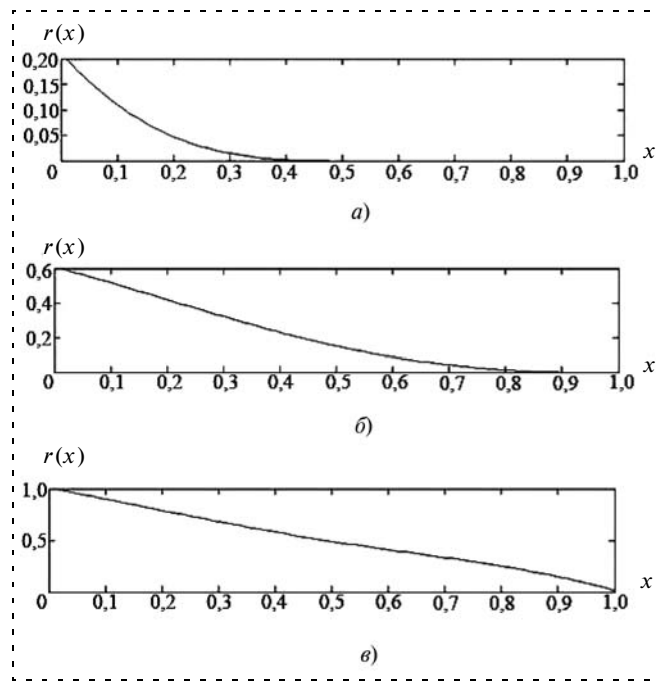


Рис. 7. Решение уравнения (8) — регуляризация с помощью кубических сплайнов (9) ($l = 1$; $g_p = 1$; $\sigma = 10$; $\dot{\omega} = 1$):

$a - r_0 = 0,2$; $\tilde{\Phi}^* = 1,9 \cdot 10^{-8}$; $\delta - r_0 = 0,6$; $\tilde{\Phi}^* = 1,5 \cdot 10^{-6}$; $\epsilon - r_0 = 1,0$; $\tilde{\Phi}^* = 1,7 \cdot 10^{-5}$

Таким образом, свободными оказываются шесть параметров, и размерность вектора \mathbf{C} в данном случае равна шести.

Численное решение уравнения (8), используя этот способ регуляризации, выполнено по схеме раздела 4. Некоторые результаты исследования иллюстрирует рис. 7.

6. Нагружение силой лобового сопротивления

Рассмотрим движение прямолинейной части "хобота", расположенной правее сечения X (см. рис. 1), с постоянной угловой скоростью ω вокруг оси $0_1\xi$. Условие равного сопротивления изгибу в данном случае сводится к интегральному уравнению

$$\frac{\pi r^3(X)}{4} \sigma = C_Q \omega^2 \int_X^l (x - X)^3 r(x) dx, \quad (10)$$

где C_Q — коэффициент сопротивления среды [5, 6].

Результаты численного решения уравнения (10), выполненного по схеме раздела 4, иллюстрирует рис. 8. Здесь, как и в предыдущем случае, для регуляризации решения использована его аппроксимация кубическими сплайнами вида (9).

7. Оптимизация размера секций "хобота"

Покроем интервал $[0; l]$ сеткой с узлами $x_0 = 0, x_1, \dots, x_N = l$, где $(N + 1)$ — число узлов сетки. Разобьем "хобот" сечениями, проходящими через узлы указанной сетки и перпендикулярными оси $0x$, на N секций. Обозначим l_i длину i -й секции, левая граница которой проходит через узел x_{i-1} , а правая — через узел x_i (рис. 9). Легко видеть, что при этом для x -координаты начала i -й секции имеет место равенство

$$x_{i-1} = \sum_{j=1}^{i-1} l_j, \quad i \in [1:N]; \quad l_0 = 0; \quad \sum_{i=1}^N l_i = l. \quad (11)$$

Положим, что упругие свойства материала каждой из секций одинаковы и что податливость ζ (величина, обратная жесткости) пропорциональна длине этой секции и обратно пропорциональна площади ее левого поперечного сечения [7]. Потребуем, чтобы так определенная податливость всех секций была одинакова, т. е. потребуем выполнения равенств

$$\frac{l_1}{\pi r^2(x_0)} = \frac{l_2}{\pi r^2(x_1)} = \dots = \frac{l_N}{\pi r^2(x_{N-1})} = \pi \zeta, \quad (12)$$

где координаты узлов $x_i = x_i(l_1, l_2, \dots, l_{i-1})$, $i \in [1:N]$ определяются выражением (11).

Система равенств (12) представляет собой систему N нелинейных уравнений относительно неизвестных l_i . Аналитическое решение этой задачи не удастся. Можно предложить несколько подходов к ее численному решению. Рассмотрим подход, ос-

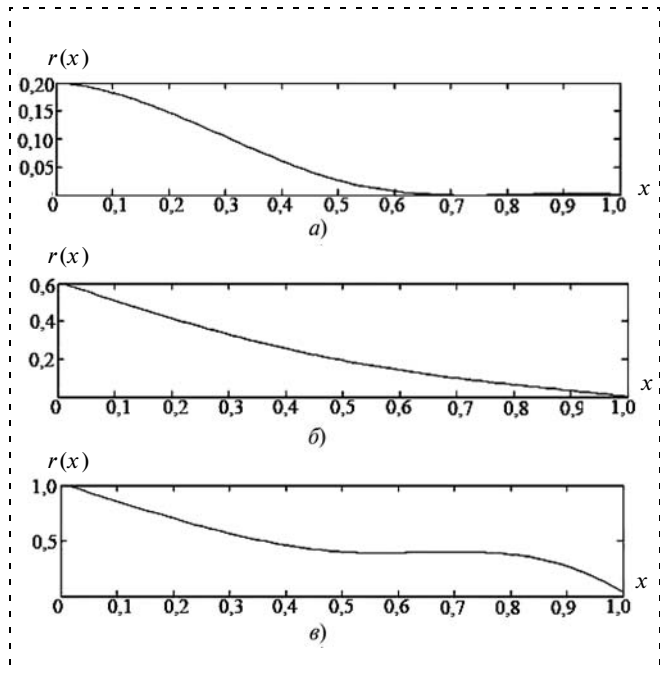


Рис. 8. Решение уравнения (10) — регуляризация с помощью кубического сплайна ($l = 1; \sigma = 0,1; \omega = 1; C_Q = 1$):

$a - r_0 = 0,2; \tilde{\Phi}^* = 3,0 \cdot 10^{-8}; \delta - r_0 = 0,6; \tilde{\Phi}^* = 4,7 \cdot 10^{-10}; \epsilon - r_0 = 1,0; \tilde{\Phi}^* = 7,6 \cdot 10^{-6}$

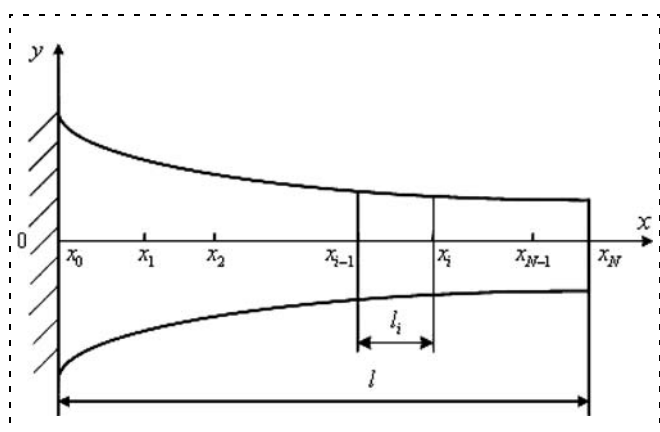


Рис. 9. К определению оптимальных размеров секций "хобота"

нованный на сведениях задачи (12) к задаче многопараметрической оптимизации.

Введем критерий оптимальности

$$F(\mathbf{L}) = \sum_{i=2}^N \left(\frac{l_i}{r^2(l_1, l_2, \dots, l_{i-1})} - \frac{l_{i-1}}{r^2(l_1, l_2, \dots, l_{i-2})} \right)^2,$$

где \mathbf{L} — $(N \times 1)$ -вектор с компонентами l_1, l_2, \dots, l_N . Поставим задачу многомерной глобальной условной оптимизации

$$\min_{\mathbf{L}} F(\mathbf{L}) = 0, \quad \mathbf{L} \in D_L, \quad (13)$$

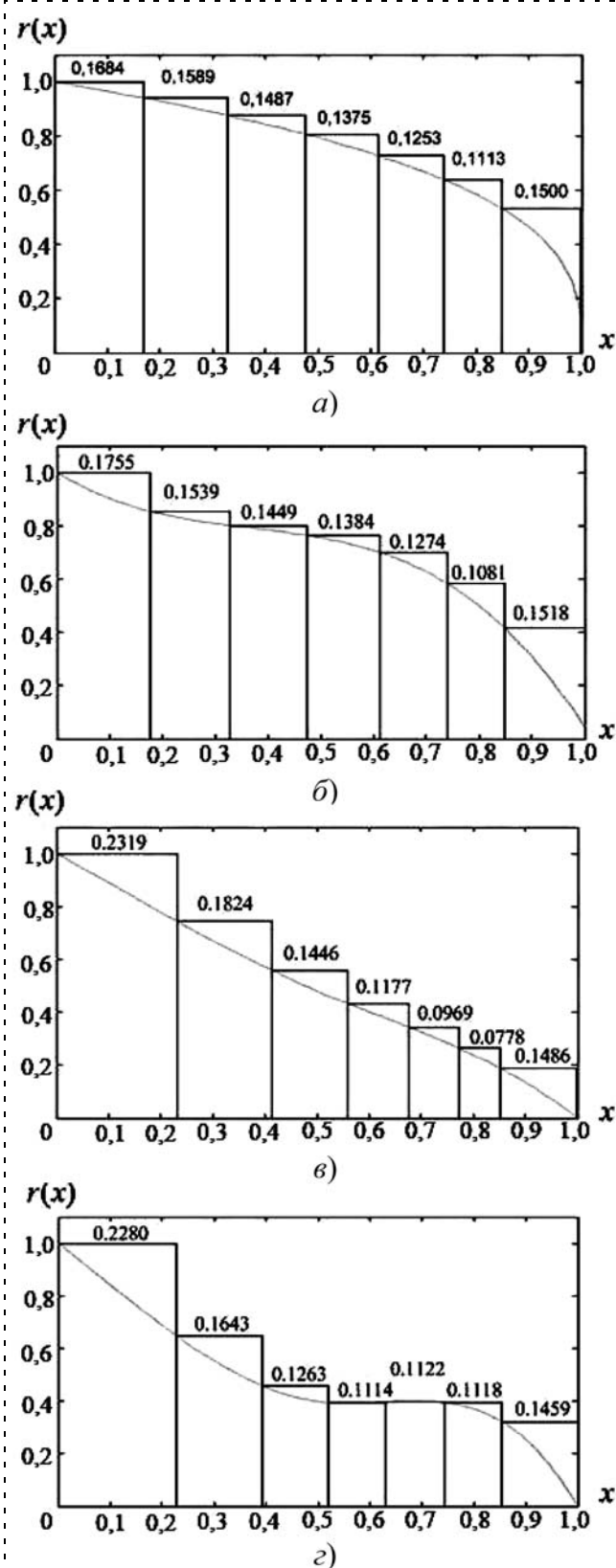


Рис. 10. Оптимальные размеры секций "хобота" ($l = 1$; $N = 7$):
 а — нагружение сосредоточенной силой; $P = 1$; $F^* = 2,78 \cdot 10^{-13}$;
 б — нагружение весом "хобота"; $\rho = 1$; $F^* = 4,61 \cdot 10^{-13}$; в — нагружение моментом инерции "хобота"; $\rho = 1$; $\dot{\omega} = 1$; $F^* = 3,36 \cdot 10^{-13}$; г — нагружение силой лобового сопротивления; $C_Q = 1$; $\omega = 1$; $F^* = 3,76 \cdot 10^{-13}$

где

$$D_L = \left\{ \mathbf{L} | l_i > 0, i \in [1:N]; \sum_{i=1}^N l_i = l \right\}.$$

Задача (13) может быть решена по схеме, рассмотренной в разделе 4. Функция штрафа при этом имеет вид

$$U(\Lambda, \mu, L) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \bar{l}_i^2 + \mu \left(\sum_{i=1}^N l_i - l \right)^2,$$

где $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$ — вектор неотрицательных коэффициентов штрафа, отвечающих за выполнение условий $l_i > 0$; μ — также неотрицательный коэффициент штрафа, призванный обеспечить выполнение условия $\sum_{i=1}^N l_i = l$;

$$\bar{l}_i = \begin{cases} 0, & l_i > 0; \\ l_i, & l_i < 0. \end{cases}$$

Результаты оптимизации размера секций семи-секционного манипулятора ($N = 7$), полученные рассмотренным методом, иллюстрирует рис. 10. В качестве формы образующей манипулятора здесь взяты решения, полученные в предыдущих разделах.

Заключение

Рассмотрена задача определения оптимальной геометрии манипулятора типа "хобот" исходя из его представления в виде консольной балки сплошного круглого сечения. Под геометрией манипулятора понимается 1) форма его продольного сечения, задаваемая законом изменения радиуса "хобота" по длине, 2) закон изменения длин секций "хобота".

Задача определения оптимальной формы продольного сечения "хобота" поставлена с использованием критерия равного сопротивления "хобота" изгибу. Рассмотрены различные виды нагружения "хобота". Для каждого из этих видов нагружения получены уравнения, определяющие оптимальную форму "хобота". Уравнения представляют собой, преимущественно, некорректные интегральные уравнения относительно радиуса "хобота" как функции его длины. Рассмотрен один из возможных численных методов приближенного решения указанных уравнений, основанный на их сведении к задаче многомерной глобальной условной оптимизации. Реализованы различные методы регуляризации решения и выполнена оценка их эффективности. Показана целесообразность использования регуляризации с помощью кубических сплайнов.

Задача определения оптимального размера секций "хобота" поставлена на основе критерия равной жесткости этих секций. Предложен численный метод решения этой задачи, основанный на сведении

ее к задаче многомерной глобальной условной оптимизации.

Результаты работы позволяют поставить множество задач определения оптимальной формы "хобота" по векторному критерию оптимальности, построенному на основе рассмотренных частных критериев.

Авторы благодарят Ю. Т. Каганова за конструктивные обсуждения результатов.

Список литературы

1. Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. М.: Наука, 1991. 94 с.

2. Каганов Ю.Т., Карпенко А.П. Математическое моделирование кинематики и динамики робота-манипулятора типа "хобот". 1. Математические модели секции манипулятора как механизма параллельной кинематики типа "трипод" // Наука и об-

разование: электронное научно-техническое издание. 2009. № 10. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/133262.html>.

3. Каганов Ю.Т., Карпенко А.П. Математическое моделирование кинематики и динамики робота-манипулятора типа "хобот". 2. Математические модели секции манипулятора как механизма параллельной кинематики типа "гексапод" // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2009. № 11. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/133731.html>.

4. Merlet J.P. Parallel Robots. Solid mechanics and its applications. Merlet-Kluwer Academic Publishers, 2000. 394 p.

5. Геометрия многосекционного манипулятора типа хобот // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2010. № 12. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/163391.html>.

6. Волкоморов С.В., Каганов Ю.Т., Карпенко А.П. Моделирование и оптимизация некоторых параллельных механизмов // Информационные технологии. Приложение. 2010. № 5. С. 1—32.

7. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 591 с.

8. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.

9. Табак Д., Куо Б. Оптимальное управление и математическое программирование. М.: Наука, 1975. 280 с.

УДК 681.2-027.31; 537.533.3-027.31; 537.534-027.31

К. В. Татмышевский, д-р техн. наук, проф.,
tatmysh@mail.ru,

Д. Д. Павлов, ассистент,
Владимирский государственный университет
имени А. Г. и Н. Г. Столетовых

Механолюминесцентные сенсоры для тактильного очувствления роботов

Рассматриваются различные по типу исполнения механолюминесцентные сенсорные элементы для систем регистрации и измерения импульсного давления. Описываются конструкции таких датчиков и варианты регистрации излучения. Приводятся примеры использования данного типа датчиков.

Ключевые слова: механолюминесцентный сенсор, тактильность, очувствление

В ранних публикациях [1—4] уже были рассмотрены математическая модель, основы расчета и проектирования механолюминесцентных сенсорных элементов, предназначенных для регистрации импульсных воздействий на различные электронные средства, работающие также в экстремальных условиях. Однако не меньший интерес представляют конкретные конструкции как разработанных, так и перспективных механолюминесцентных сенсоров.

Наибольший интерес представляют механолюминесцентные сенсоры (МЛС), позволяющие реализовать функцию тактильной чувствительности. Разработке тактильных датчиков (устройств механического ошупывания рабочей зоны и объекта) в робототехнике придается столь же большое значение, как и созданию моделей человеческого зрения. Это

направление очувствления роботов многие специалисты считают весьма перспективным. Промышленные роботы выполняют повторяющиеся задачи, такие как машинная погрузка, сборка компонентов изделий и т. п. Без способности осязательного восприятия робот не может эффективно схватывать предметы [5—8].

В первую очередь это касается робототехнических систем, работающих в недетерминированной среде, когда: а) объекты манипулирования отличаются по параметрам (масса, геометрические размеры, шероховатость поверхности, материал); б) априорно не известно местоположение объектов манипулирования в рабочей зоне робота; в) случайным является характер очередности поступления различных объектов манипулирования в рабочую зону робота; г) параметры объектов манипулирования изменяются в процессе выполнения роботом манипуляционных операций [9].

Для успешного решения поставленных задач электронная схема управления робота должна уметь распознавать объекты и ситуации с помощью тактильных датчиков. Под наиболее актуальной ситуацией следует понимать проскальзывание объекта между губками схвата робота. Регистрация проскальзывания связана с необходимостью создания роботом сжимающего усилия, соответствующего весу объекта. Это особенно важно для роботов, работающих с объектами разного веса, или с объектами, вес которых меняется во время манипуляций. Создание оптимального сжимающего усилия, соответствующего весу и жесткости объекта, позволяет исключить его деформацию и повреждение, а также решить ряд задач, связанных с повышением точности позиционирования или реализации заданной траектории, с распознаванием объектов и

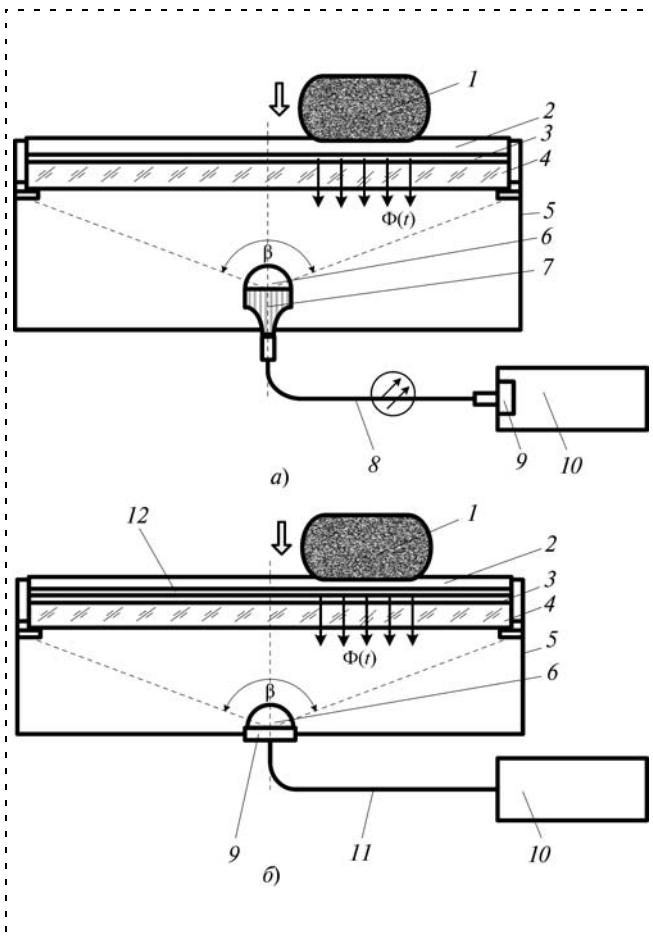


Рис. 1. Варианты конструкций тактильных механолюминесцентных сенсоров:

a — с оптическим каналом передачи; *б* — с электрическим каналом передачи (*1* — контактирующий объект; *2* — защитное покрытие; *3* — слой механолюминофора; *4* — прозрачное покрытие; *5* — светозащитный корпус; *6* — широкоформатный объектив (линза) с углом поля зрения β ; *7* — фокус; *8* — ВОЖ; *9* — матричный фотоприемник; *10* — устройство управления; *11* — электрический кабель; *12* — концентратор напряжений с регулярным рельефом поверхности; $\Phi(t)$ — пространственно модулированный световой поток)

сцен, с возможностью выполнения сборочных операций в адаптивном режиме [5, 7, 9]. Варианты конструкций тактильных МЛС показаны на рис. 1.

Здесь при воздействии объекта *1* на поверхность *2* в зоне контакта возникает излучение механолюминофора *3*. Световое пятно $\Phi(t)$ соответствует форме объекта *1* и воспроизводит даже мелкие особенности рельефа поверхности объекта. Предельная пространственная разрешающая способность сенсоров находится на уровне среднего размера зерна люминофора и составляет 10...20 мкм. Далее пространственно промодулированный световой поток $\Phi(t)$ регистрируется матричным фотоприемником *9* и подается на устройство управления *10*. В конструкции по варианту, показанному на рис. 1, *а*, используется полностью оптический канал связи, в который входят: широкоформатный объектив *6*, фокус *7* и волоконно-оптический жгут (ВОЖ) *8* с регулярной укладкой оптических волокон. Такая

конструкция обеспечивает лучшую помехоустойчивость в канале передачи, но она более сложна в изготовлении и требует применения дорогостоящих волоконно-оптических компонентов.

В конструкции по варианту, показанному на рис. 1, *б*, световой сигнал $\Phi(t)$ регистрируется непосредственно матричным фотоприемником *9* с большим углом поля зрения β . Далее электрический сигнал подается на устройство управления *10* по электрическому кабелю *11*. Техническая реализации этого варианта проще и дешевле, однако помехоустойчивость — ниже. Здесь же показано возможное применение концентратора напряжений *12* для повышения чувствительности и формирования в сенсоре менее высокого пространственного разрешения. Для этого концентратор выполняется в виде упругой и гибкой пленки, на одной из сторон которой сформированы регулярные неровности, обращенные в сторону механолюминесцентного слоя. Неровности могут быть сформированы в виде выступов концентрических окружностей, а также одинарной или двойной перекрестной насечки.

Матричные фотоприемники применяются здесь для регистрации световых полей, распределенных по площади (пространственно-модулированных), и могут входить в состав сенсоров с распределенным по площади чувствительным элементом. Осуществляя постоянное сканирование поверхности механолюминесцентного чувствительного элемента, такой фотоприемник может зарегистрировать размер и положение светящегося участка, а также яркость его свечения и последовательность высвечивания отдельных участков распределенного чувствительного элемента [10, 11]. Общим недостатком конструкций тактильных сенсоров, показанных на рис. 1, является их относительно большая высота, необходимая для обеспечения достаточного угла поля зрения β матричного фотоприемника. Для применения тактильных сенсоров в схватах роботов предпочтительно иметь планарные конструкции датчиков, толщина которых не превышала бы нескольких миллиметров.

Вариант тактильного механолюминесцентного сенсора планарной конструкции показан на рис. 2, где представлена конструкция собственно сенсора, состоящего из защитного слоя *2*, механолюминесцентного покрытия *3* и прозрачной подложки *4*, а основное отличие от конструкций, показанных на рис. 1, состоит в системе ввода-вывода оптического сигнала. Для этого использованы два уложенных рядами слоя взаимно перпендикулярных оптических волокон *5* и *7*, размещенных в непосредственном оптическом контакте с чувствительным элементом. Волокна *5* в верхнем ряду укладываются с некоторым шагом, чтобы через зазор между ними излучение $\Phi(t)$ попадало в волокна *7* нижнего слоя. Волокна *5* являются элементами столбцов, а волокна *7* — элементами строк. Участки волокон в пределах площади основания *8* лишены защитной оболочки и зафиксированы неподвижно с помощью

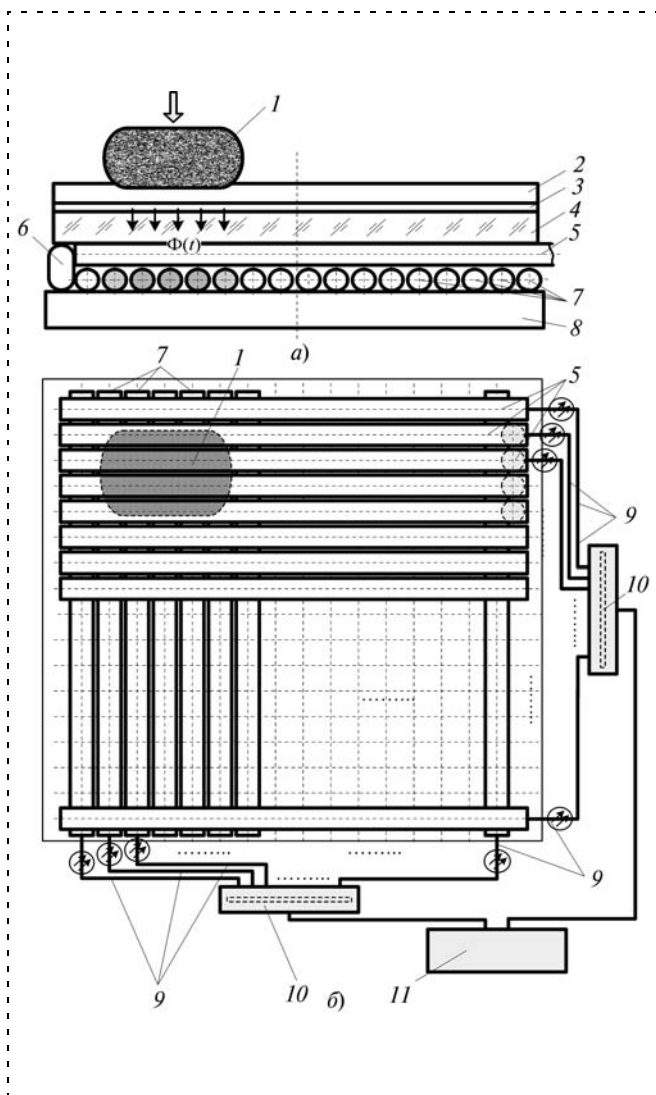


Рис. 2. Тактильный механоломлюминесцентный сенсор планарной конструкции с боковым вводом излучения в световоды:
a — вид сбоку; *b* — вид сверху (*1* — контактирующий объект; *2* — защитное покрытие; *3* — слой механоломлюинофора; *4* — прозрачная подложка; *5* — жесткие участки оптических волокон (световодов) столбцов; *6* — ребро жесткости; *7* — жесткие участки оптических волокон (световодов) строк; *8* — основание; *9* — гибкие участки оптических волокон; *10* — многоэлементный линейный фотоприемник; *11* — блок обработки сигналов)

оптического клея. За пределами основания 8 волокна остаются гибкими, могут иметь защитную оболочку и объединяться в жгуты с сохранением регулярной укладки по строкам и столбцам.

На нерабочие торцы оптических волокон нанесено зеркальное покрытие, а рабочие торцы гибкой части волокон 9 стыкуются с многоэлементными линейными фотоприемниками 10. Число фотоэлементов в линейке должно быть не менее числа световодов в соответствующем слое. В качестве световодов могут применяться как кварцевые, так и пластиковые оптические волокна. Излучение $\Phi(t)$ вводится в волокна 5 и 7 не через торцевую, а через боковую поверхность волокон [12, 13]. Такой

принцип передачи оптического сигнала часто используется в неразъемных оптических ответвителях и разветвителях [13].

После сканирования сигналов строк и столбцов линейными фотоприемниками 10 в блоке обработки 11 происходит формирование тактильного образа, сформированного воздействием объекта 1 на поверхность 2 тактильного сенсора. Для обеспечения более высокой контрастности и разрешающей способности изображения в качестве подложки 4 может использоваться волоконно-оптическая пластина [13].

Распределенные МЛС также могут использоваться в электронных устройствах регистрации внешних ударных воздействий на мобильные роботы наземного и воздушного базирования. Сильные механические удары могут привести к выводу робота из строя, поэтому их своевременная регистрация и оценка степени опасности является важной задачей. Схема применения МЛД на мобильном роботе-разведчике показана на рис. 3.

Здесь передняя и задняя видеокамеры предназначены для регистрации полей излучения от МЛС 3, нанесенных соответственно на переднюю и заднюю части защитного корпуса 2. На основе анализа интенсивности и пространственного распределения световых сигналов Φ_1 и Φ_2 устройство управления 5 определяет, насколько опасны были воздействия 1, 6, и формирует команды управления движением робота.

Для таких роботов можно предложить вариант очувствления колеса с помощью распределенного сенсора путем нанесения механоломлюинофора на внутреннюю поверхность шины или обода колеса (рис. 3). Остающийся неподвижным фотоприемник 4 будет регистрировать световые поля Φ_3 , вызванные давлением на шину как при контакте с грунтом во время движения по пересеченной местности, так и при наезде на препятствие 7. Обработка сигналы от всех очувствленных таким способом колес, устройство управления формирует тактильный образ маршрута движения, что позволяет реализовать функцию движения на ощупь. Такой принцип управления движением был реализован в мобильном роботе "Octopus" [14].

Одним из перспективных направлений развития мехатронных и робототехнических систем является использование в конструкциях деталей и узлов, изготовленных из керамических и композиционных материалов. Это в перспективе позволит создавать агрегаты с адаптивно-деформируемым корпусом, допускающим их функционирование в труднодоступных местах, а также при других неблагоприятных условиях. Одной из особенностей таких изделий будет наличие искусственной нервной системы, объединяющей в единое целое микросенсорные элементы с информационной системой, позволяющей регулировать как основные рабочие процессы, так и аварийные ситуации, обусловленные внезапными помехами и препятствиями [15].

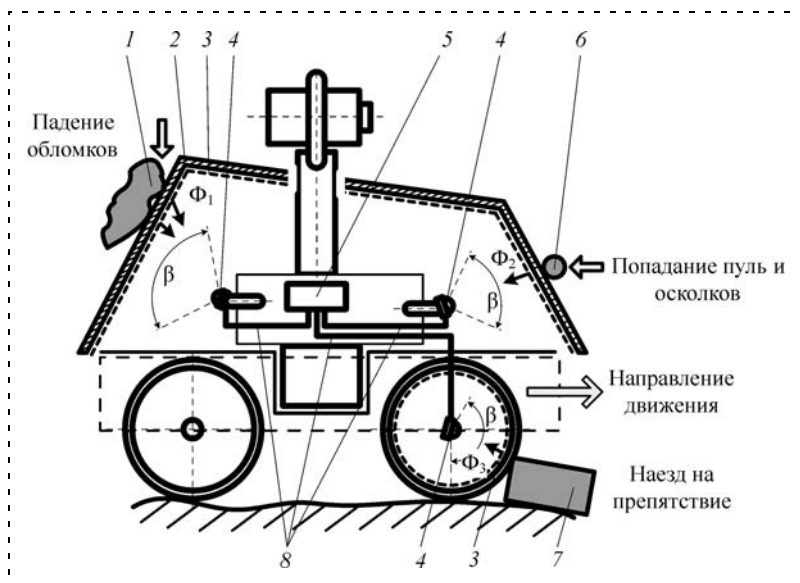


Рис. 3. Схема возможного применения тактильных механолюминесцентных сенсоров на мобильном роботе-разведчике:

1 — падающий обломок; 2 — защитный корпус; 3 — механолюминесцентное покрытие; 4 — матричное фотоприемное устройство (видеокамера) с углом поля зрения β ; 5 — устройство управления; 6 — скоростной индентор (пуля, осколок); 7 — препятствие движению; 8 — электрические кабели

Одной из составляющих такой искусственной нервной системы могут стать миниатюрные механолюминесцентные сенсоры, нанесенные на торцевые или боковые поверхности оптических волокон.

Данная работа выполнена при проведении НИР по Государственному контракту № П2475 в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 год.

Список литературы

1. Татмышевский К. В., Макарова Н. Ю. Механолюминесцентный сенсорный элемент: математическая модель и расчет выходных оптических сигналов // Проектирование и технология электронных средств. 2004. № 1. С. 2—8.

2. Татмышевский К. В. Механолюминесцентные датчики давления: классификация, характеристики и основы проектирования // Проектирование и технология электронных средств. 2004. № 3. С. 10—19.

3. Татмышевский К. В. Информационные свойства механолюминесцентных сенсоров // Проектирование и технология электронных средств. 2004. № 4. С. 16—21.

4. Макарова Н. Ю., Татмышевский К. В. Механолюминесцентные сенсоры импульсного давления: результаты экспериментального исследования // Проектирование и технология электронных средств. 2005. № 2. С. 2—8.

5. Макаров И. М. Управление робототехническими системами и их очувствление. М.: Наука, 1983. 240 с.

6. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Управление роботами. М.: Изд во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 400 с.

7. Охоцимский Д. Е. Системы очувствления и адаптивные роботы. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.

8. Воротников С. А. Информационные устройства робототехнических систем. М.: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 384 с.

9. Кондратенко Ю. П., Кондратенко В. Ю., Швец Э. А., Шишкин А. С. Адаптивные захватные устройства робототехнических систем // Мат-лы междунар. НТК "Мехатроника и робототехника (МиР 2007)". 2—5 окт. 2007 г. СПб. URL: <http://www.mr.rtc.ru/doc/report/doc01>.

10. Казанцев Г. Д., Курягин М. И., Пустынский И. Н. Измерительное телевидение. М.: Высшая школа, 1994. 288 с.

11. Системы технического зрения: Справочник / Под ред. В. И. Сырякина, В. С. Титова. Томск: МГП "РАСКО", 1992. 376 с.

12. Витрик О. Б. Проблема "чувствительной кожи" и волоконно-оптические измерительные системы // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7. № 1. С. 108—115.

13. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника. М.: Радио и связь, 1989. 360 с.

14. Lauria M., Piguet Y., Siegwart R. Octopus an autonomous wheeled climbing robot. // Proc. of 5 th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots CLAWAR'2002, France, September 2002. Paris. 2002. P. 315—322.

15. Патент РФ № 2305847 МПК G01P 15/093 "Механолюминесцентный датчик удара"/ Татмышевский К. В., Рахманов З. Т., Макарова Н. Ю., Спажакин А. Г. / Приоритет от 20.02. 2006 г. Опул. 10.09.2007 г. Булл. № 25.

ИНФОРМАЦИЯ

5—8 июня 2012 г. в Москве в ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН состоится

XII международная конференция

«Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (конференция Пятницкого)

Тематические направления:

- Общие вопросы теории устойчивости и стабилизации движения.
- Общие вопросы и методы теории нелинейных колебаний.
- Методы функций Ляпунова для нелинейных систем управления и метод Гамильтона-Якоби-Ляпунова-Беллмана в теории оптимального управления и в игровых задачах управления.
- Гладкая и негладкая динамика.
- Проблемы управляемости и наблюдаемости систем управления.
- Проблемы робастного управления.
- Управление механическими системами.
- Устойчивость и управление гибридными системами и системами с переключениями.
- Прикладные задачи управления и компьютерные методы.

Подробную информацию о конференции см. на сайте:
<http://www.stab12.ru>

Е. В. Красильникъянц, канд. техн. наук, директор,
А. А. Варков, инженер-программист,
В. В. Тютиков, д-р техн. наук, проф.,
 artem.varkov@gmail.com,
 НТЦ "ИНЭЛСИ"

Программное обеспечение системы управления IntNCR манипуляционным роботом

Рассмотрены особенности архитектуры программного обеспечения системы управления манипуляционным роботом IntNCR. Определены подходы к реализации системного ПО СУ МР. Описаны возможности языка программирования, разработанного для использования с СУ IntNCR.

Ключевые слова: манипуляторы, система управления, программное обеспечение, программирование роботов

Управление манипуляционными роботами (МР) имеет ряд отличий от других систем управления движением (СУД), которые заключаются в наличии большого числа раздельно управляемых механических осей, существовании между ними кинематических и динамических связей, нелинейности кинематической схемы.

Для эффективного управления оси манипулятора объединяются в координатные системы. Тип координатной системы (КС) определяется кинематическими соотношениями между отдельными осями [1]. Это может быть декартова, цилиндрическая, сферическая или вращательная система координат.



Рис. 1. Структура программного обеспечения СУ МР

Использование различных координатных систем для управления МР и написания управляющей программы (УП) требует наличия в составе программного обеспечения средств преобразования между ними.

Указанные отличия определяют специфику построения системы управления (СУ) манипуляционного робота. Для применения робототехнического комплекса в составе гибкой производственной системы принципы построения СУ МР следует выбрать аналогичными используемым при разработке систем управления движением [2].

Основными компонентами аппаратной части являются контроллер движения (КД), используемый в качестве блока управления, и промышленный компьютер (ПК), на котором реализовано терминальное устройство [3]. Такое решение позволяет эффективно разделить системные и прикладные задачи и обеспечить возможность модификации отдельных компонентов СУ МР при необходимости использования с различными видами и типами МР.

В связи с предложенным разделением аппаратной части следует выделить отдельные уровни и в составе программного обеспечения (ПО) (рис. 1):

- ПО контроллера движения;
- ПО терминального устройства.

ПО контроллера движения предназначено для решения основных системных задач и задач управления движением МР. Оно должно обеспечивать выполнение следующих функций:

- поддержка аппаратных средств;
- управление электроприводом;
- расчет траектории движения;
- наблюдение за состоянием системы;
- взаимодействие с терминальным устройством;
- выполнение системных подпрограмм;
- выполнение управляющих программ пользователя.

Под *поддержкой аппаратных средств* понимается набор подпрограмм, обеспечивающих взаимодействие системного ПО с электрооборудованием СУ и периферийными устройствами. Данные подпрограммы предназначены для реализации таких задач, как опрос датчиков, организация работы интерфейсов передачи данных, получение информации о переменных состоянии МР и других компонентах СУ. Кроме того, на рассматриваемом уровне ПО решается задача синхронизации расчетных процессов, выполняемых КД, согласно разработанной таблице приоритетов.

Процесс разработки данного уровня ПО заключается в создании модулей, работающих непосредственно в ядре системного ПО или, если структура КД не позволяет этого, в виде задачи с наивысшим приоритетом. Взаимодействие с задачами более низкого уровня осуществляется посредством встроенных буферов данных для накапливаемой информации, таких как ввод/вывод через информацион-

ный интерфейс или специальных областей памяти для информации о состоянии системы.

Реализация указанных задач зависит, прежде всего, от аппаратных особенностей СУ МР. Используемый при разработке СУ IntNCR КД поддерживает различные виды датчиков, форматов данных и информационных протоколов на уровне встроенного ПО, что позволяет избежать необходимости написания собственных модулей для решения этих задач.

Таким образом, основное внимание при создании СУ МР IntNC было уделено разработке средств синхронизации различных процессов и взаимодействия с дополнительными платами расширения, разработанными непосредственно для СУ. Для организации передачи и обмена данными использованы выделенные области памяти, предназначенные для хранения текущих значений определенных системных переменных. Доступ к ним осуществляется посредством стандартных средств КД.

Управление электроприводом включает в себя опрос каналов обратной связи, реализацию координатных преобразований, расчет регуляторов, формирование управляющих сигналов, коммутацию силовых ключей. Поскольку разрабатываемая СУ ориентирована на работу с манипуляционными роботами разных производителей, то актуальной является возможность управления различными типами двигателей. К основным типам двигателей, используемых в настоящее время в МР, следует отнести: шаговые, постоянного тока, вентильные. В перспективе возможно использование асинхронных двигателей как наиболее дешевых и надежных.

Современные КД поддерживают алгоритмы управления указанными типами двигателя. Информация о переменных состояния двигателей и электромеханической системы в целом присутствует в системной памяти КД. Для минимизации вычислительных ошибок в качестве формата представления данных выбраны целочисленные значения и числа с фиксированной точкой.

Работа алгоритма управления электроприводом заключается в формировании управляющего сигнала на основании данных о переменных состояния двигателя. Последние могут быть получены непосредственно через каналы обратной связи с электродвигателем (ток, скорость, положение) или вычислены в соответствующей подпрограмме (момент).

Для обеспечения стабильной работы СУ и требуемого качества управления требуется выполнение алгоритмов управления электроприводом синхронно с прочими задачами, выполняемыми на КД, поэтому СУ МР должна работать в режиме реального времени. Для этого при разработке СУ МР IntNCR был выбран КД, позволяющий разделить задачи по приоритетам и задать частоты их выполнения. Современные высокопроизводительные КД позволяют проводить вычисления и выполнять подпрограммы, требуемые для управления электродвигателем, с частотой порядка 9...10 кГц без значительного

снижения производительности при выполнении прочих задач.

Для решения большинства задач управления электроприводом оказывается достаточно ПИД-регулятора. В СУ IntNCR используется модифицированный регулятор, позволяющий не только задавать координаты перемещения, но и компенсировать изменение динамических параметров с учетом требуемых физических характеристик движения, таких как скорость, ускорение и создаваемый момент. Для решения более сложных задач используются возможности КД по созданию регуляторов, позволяющих учесть особенности работы МР, которые не могут быть учтены в ПИД-регуляторе. Прежде всего, это относится к упругим системам, а также системам, обладающим нелинейностями перемещений. Для управления ими требуются более сложные типы регуляторов, такие как модальные регуляторы [4].

В связи с тем, что на работу МР значительное влияние оказывают существующие в нем кинематические и динамические связи, для обеспечения требуемых характеристик может потребоваться создание адаптивной системы управления. Для ее реализации на КД используются встроенные средства написания пользовательских регуляторов и осуществления взаимодействия и обмена информацией с МР в реальном масштабе времени.

В зависимости от используемого КД подходы к реализации регулятора могут отличаться. Основными являются его написание на языке ассемблера и на языке, предназначенном для написания системных компонентов КД. Первый подход обеспечивает более высокую производительность, но требует от разработчика знания особенностей процессора, используемого в КД, и средств взаимодействия с системными областями памяти. Второй подход позволяет использовать специально предназначенные команды получения требуемых переменных из системной памяти КД. При использовании современного высокопроизводительного КД применение языка высокого уровня оказывается более оптимальным, чем ассемблера, так как это позволяет проводить разработку с помощью отладочного и диагностического программного обеспечения. По этой причине при разработке СУ IntNCR был использован встроенный в КД BASIC-подобный язык программирования [5].

Расчет регулятора должен быть синхронизирован с другими процессами, в первую очередь, с формированием управляющего сигнала и планированием траектории. Поэтому расчет контура тока должен выполняться с частотой порядка 9...10 кГц, как и модуль управления электроприводом. Расчет контура положения ввиду особенностей управления МР (использование различных КС, влияние пространственной конфигурации) и необходимости согласования с планировщиком траектории ограничен по быстродействию, поэтому в СУ IntNCR он вычисляется с частотой 2...2,5 кГц.

В состав *средств расчета траектории движения* должны входить такие компоненты, как модуль исполнения кадра управляющей программы, планировщик траектории, программы расчета прямой и обратной кинематики, подпрограммы расчета динамических характеристик МР.

Модуль исполнения кадра управляющей программы осуществляет выполнение представленного в виде набора команд КД текущего кадра управляющей программы и синхронизацию состояния системных и пользовательских переменных, а также различных флагов, определяющих состояние СУ. Обработанные команды движения передаются для дальнейшего выполнения в планировщик траектории.

Модуль исполнения кадра можно рассматривать как компонент виртуальной машины, работающей на КД и занимающейся преобразованием сформированного из управляющей программы псевдокода в набор инструкций контроллера движения. Набор команд и их семантическое и функциональное значение определяются базовым ПО КД. В системе управления IntNCR КД предоставляет разработчику набор команд, предназначенных для указания типа, координат и характеристик перемещения, проведения математических вычислений, выполнения операций с системной и пользовательской памятью. Указанного набора команд достаточно для реализации основных операций, требуемых при управлении МР.

Основной задачей *планировщика траектории* является преобразование заданных в управляющей программе движений в последовательность управляющих сигналов. Он поддерживает набор алгоритмов, обеспечивающий расчет основных видов траекторий, используемых в работе МР: линейных, круговых, сплайновых. В связи с необходимостью преобразования координат между различными видами КС для их реализации используются интерполяторы, взаимодействующие с программами расчета кинематики МР.

При разработке СУ была предусмотрена возможность расширения алгоритмов интерполяции разработчиком за счет введения в них дополнительных операций и ограничений, предназначенных для обеспечения работы СУ МР в производственных условиях. В частности, разработчик может включить проверки на положение манипулятора в рабочей зоне, ввести ограничения по переменным состояния (скорость, ускорение, момент), что позволит включить в состав СУ МР средства обеспечения безопасности при выполнении технологических операций.

Использование *программ расчета кинематики* необходимо для перевода заданных движений из координатной системы, применяемой в управляющей программе, в координатную систему, используемую в манипуляторе, и обратно. При этом кинематические характеристики определяются конфигурацией МР. Решение задач прямой и обратной кинематики в многосвязных манипуляторах требует

проведения ряда пространственных преобразований, основанных на матричных вычислениях. Большинство используемых МР обладают пятью и более осями, что определяет высокий порядок матричных уравнений и требует от КД значительных вычислительных ресурсов. Чтобы повысить производительность вычислений при разработке СУ, была решена задача оптимизации вычислений электро-механической модели МР [6].

В зависимости от пространственной конфигурации МР в текущий момент времени изменяются его динамические характеристики. Для оценки их влияния на поведение МР требуется решение уравнений динамики манипуляционного робота. Существует ряд методов их решения [1, 7]. Исходя из вычислительных возможностей КД был выбран подход, минимизирующий затраты вычислительных и временных ресурсов [6]. Поскольку КД, как правило, не имеют программных средств для выполнения операций с матрицами высокого порядка, для решения задач кинематики и динамики был выбран путь замены матричных операций вычислениями с использованием отдельных элементов. Такой подход позволил оптимизировать вычисления путем удаления элементов с малыми весовыми коэффициентами в итоговом значении.

Для использования СУ с различными видами МР, отличающихся своими характеристиками, на этапе проектирования при расчетах уравнений кинематики и динамики реализована возможность конфигурирования основных параметров, для чего обеспечена возможность выделения области памяти, предназначенной для хранения информации о числе осей, кинематических и динамических параметрах МР.

Средства наблюдения предназначены для осуществления обмена информацией о состоянии отдельных компонентов СУ, а также для защиты от возможных сбоев в работе аппаратного и программного обеспечения. К средствам наблюдения относятся сторожевые таймеры, внешние датчики и измерители физических величин, позволяющие определить возникновение различных проблемных ситуаций, а также программные счетчики и параметры, необходимые для первичной оценки поведения МР и выполнения задач движения. Данный модуль программного обеспечения реализован в виде отдельной системной подпрограммы, выполняемой в реальном времени, но с более низким приоритетом, чем задачи управления движением.

Средства взаимодействия с терминальным устройством предназначены для обмена данными и управляющей информацией с пользователем посредством терминального устройства. К ним относятся различные буферы для передачи информации, средства интерфейса с переменными состояниями системы.

Для выполнения *системных подпрограмм* существует уровень программного обеспечения, выполняемый на КД в фоновом режиме и осуществляющий

обновление различных данных, наблюдение за характеристиками СУ, а также синхронизацию процессов в пользовательских программах. Критические задачи, требующие немедленной реакции, такие как обработка ошибок, выполняются с более высоким уровнем приоритета.

Управляющие программы (УП) пользователя, передаваемые для выполнения в КД, представляются в виде макрокоманд, которые должны быть преобразованы в систему команд КД для их выполнения при достижении соответствующего кадра. Набор макрокоманд определяется средствами ПО терминального устройства, в первую очередь, языком описания УП.

В связи с тем, что для работы СУ МР необходимо обеспечивать выполнение различных задач в режиме реального времени, возникает вопрос о рациональном распределении между ними временного ресурса. На рис. 2 показано распределение выполняемых процессов в IntNCR по уровням приоритетов и примерное соотношение частот их обновления в рамках одного приоритета. Основные задачи взаимодействия с оборудованием СУ и коммутации управляемых двигателей относятся к наиболее высокому приоритету. Такое решение гарантирует, что СУ находится в рабочем состоянии независимо от времени, которое будут занимать задачи более низких уровней.

Задачи следующего уровня отвечают за формирование траектории движения и обновление состояния СУ через системные программы. Предоставление им данного приоритета позволяет гарантировать, что они будут выполняться с определенной частотой.

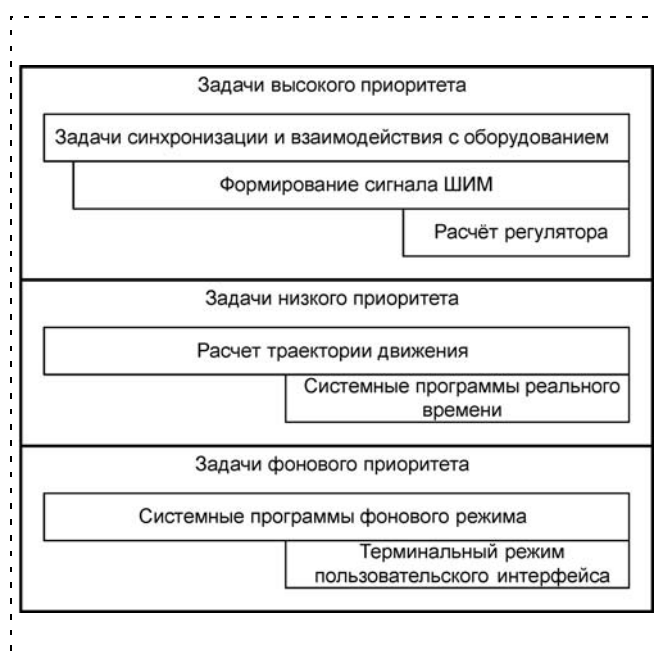


Рис. 2. Распределение задач ПО КД по уровням приоритетов

Задачи фонового приоритета выполняются в свободное от выполнения других задач время. Это позволяет избежать блокировки выполнения важных задач в случае возникновения сбоев в работе системных программ и при обмене данными с терминальным устройством.

Важной особенностью СУ МР, отличающей ее от других СУД, является наличие языка программирования высокого уровня, предназначенного для написания УП пользователя. В отличие, например, от систем ЧПУ для СУ МР не существует единого стандарта, описывающего особенности языка. В результате в различных СУ МР реализуются собственные подходы к его разработке и созданию.

К основным принципам, использованным при разработке языка программирования IntLANG для СУ МР, следует отнести модульность и открытость.

Модульность позволяет разработчику и пользователю СУ создавать собственные библиотеки подпрограмм и компонентов, включающие наиболее часто используемые алгоритмы.

Открытость предоставляет пользователю возможность написания собственных программ и доступа к основным конфигурационным параметрам для создания алгоритмов, взаимодействующих с системными компонентами СУ.

УП, составленная на разработанном языке, должна передаваться в блок управления, где она преобразуется в его внутреннее представление. Набор средств языка определяет перечень макрокоманд, анализируемых КД при вводе программы для ее перевода в команды КД. С учетом особенности управления МР к языку описания УП предъявляется ряд требований, связанных с использованием в составе программы различных координатных систем и управлением движением как отдельных осей, так и манипулятора в целом. К этим требованиям следует отнести:

- задание перемещений по требуемой траектории с выбранными параметрами (скорость, ускорение);
- преобразование координат точек траектории перемещения между различными видами координатных систем;
- взаимодействие с аппаратным обеспечением БУ и периферийными устройствами;
- организация сложных УП с элементами алгоритмического программирования;
- взаимодействие с библиотекой подпрограмм.

Как и в большинстве языков программирования высокого уровня, для хранения данных предполагается использование переменных определенного типа. Основными типами данных при написании УП МР являются следующие: координата, целое число, число с точкой, булево значение, текстовая строка. Для хранения данных и выполнения различных алгоритмов переменные могут быть представлены не только в виде отдельных значений, но и в виде массивов.

Рассмотрим реализацию отдельных функциональных возможностей языка.

Для задания перемещений используются следующие команды:

- произвольное перемещение между двумя точками (*point, ptp*);
- перемещение между двумя точками по линейной траектории (*linear*);
- перемещение по окружности с заданием определенного набора точек (начальной координаты, центра окружности, конечной координаты или радиуса) (*circle*);
- перемещение между точками по сплайну (*spline*);
- задание скорости перемещения (*speed*);
- задание максимального ускорения при перемещении (*accel*).

Указанные команды позволяют разработчику или пользователю задать желаемую траекторию перемещения МР в рабочей области с указанием ее характеристик, таких как скорость и ускорение. Следует отметить, что они работают с учетом ограничений, накладываемых планировщиком траектории, при нарушении которых СУ автоматически прерывает выполнение программы.

С учетом того, что МР может работать не в одной системе координат, в язык программирования включен набор средств, предназначенных для их преобразования. Наиболее удобным с точки зрения пользователя является задание координат в виде структур, включающих элементы как рабочей, так и собственной КС МР. Данное представление позволяет использовать в одной УП координаты различных КС без необходимости пользователю следить за текущим режимом.

Представление структур основано на стандартах, существующих в языках высокого уровня общего назначения. Например, для обращения к координате в переменной, определяющей точку, разработчик должен использовать оператор обращения к компоненту структуры, за которым следует имя координаты. Такое решение позволит сделать программу удобной для написания и анализа, по сравнению с альтернативными вариантами, такими как применение массивов элементов. Тем не менее, при использовании СУ МР с РТК, оснащенным дополнительными осями перемещения, может потребоваться введение дополнительных компонентов структуры, предназначенных для обращения к координатам дополнительных осей. В данном случае для них следует использовать массив, обращение к элементу которого удобнее сделать по номеру дополнительной оси.

Следует отметить, что при задании координат в рабочей КС может возникнуть неоднозначность при формировании траектории в связи с тем, что одному набору координат соответствуют несколько конфигураций МР в собственной КС. Для решения этой проблемы в состав средств языка введены команды, указывающие на требуемую конфигурацию МР в пространстве. Поскольку различные манипуляторы могут различаться по своей конфигурации, данные команды должны иметь не жестко

определенные значения, а учитывать особенности кинематической структуры МР. Таким образом, значение их параметров должно определяться не описанием языка, а конкретной реализацией системного ПО СУ МР, предназначенной для использования с манипулятором.

Для организации взаимодействия УП с системными переменными и периферийными устройствами наиболее эффективным является определение массивов данных, отображающих в УП их состояние. Для удобства пользователя используется введение псевдонимов основных характеристик и параметров в описании языка и предоставление пользователю возможности создания собственных псевдонимов и мнемонимов для других переменных, а также входов и выходов аппаратных средств. Такое решение добавляет уровень абстрактности к взаимодействию УП и СУ, что позволяет разделить программную и физическую реализацию взаимодействия с устройствами.

Для создания сложных программ язык программирования поддерживает набор средств алгоритмического программирования, позволяющих оптимизировать процесс разработки и выполнения программы. По аналогии с языками высокого уровня к ним относятся подпрограммы, циклы, ветвления.

Подпрограммы предназначены для выделения отдельных блоков кода для многократного их использования в теле программы. Они могут использоваться как для простого выполнения команд, так и для проведения вычислений либо иных операций, приводящих к получению результата (проверка значения системных переменных, чтение состояния системных устройств).

Циклы предназначены для организации повторяющихся операций. Следует учитывать, что в программе могут быть использованы циклы нескольких типов:

- безусловный цикл *loop* (цикл без условия выхода);
- параметрический цикл *for* (цикл с изменением значения переменной);
- цикл с предусловием *while* (цикл с предварительным условием).

Кроме самих циклов в языке предусмотрены команды для их досрочного прерывания и повторения (*break* и *continue* соответственно).

Команды ветвления предназначены для организации сложных программ, управляемых условными операторами. В коде программы они могут быть представлены в виде блоков условий *if-else-endif*, сопровождающихся наборами команд, предназначенных для отработки при выполнении/невыполнении условия.

Для создания библиотек алгоритмов разработчик или пользователь могут воспользоваться модульным принципом построения языка программирования. Отдельные модули загружаются в исполняемую управляющую программу посредством команд и директив.

Примененные подходы к созданию и разработке программного обеспечения позволили создать СУ МР IntNCR, основанную на двухпроцессорной архитектуре с использованием КД, отвечающую современным технологическим требованиям. Такое решение позволило наиболее эффективно использовать возможности КД и обеспечить гибкость и возможность адаптации СУ для использования с различными видами МР при решении производственных задач.

Разработанный язык программирования IntLANG соответствует по предлагаемым возможностям существующим в настоящее время промышленным решениям и позволяет разработчику создавать сложные управляющие программы.

Список литературы

1. **Фу К., Гонсалес Р., Ли К.** Робототехника. М.: Мир, 1989.
2. **Красильникьянц Е. В., Бурков А. П., Иванков В. А.** Применение контроллеров движения для систем управления электромеханическими объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 2. С. 45—50.
3. **Варков А. А., Красильникьянц Е. В., Тютиков В. В.** Система управления манипуляционным роботом // Автоматизация в промышленности. 2011. Вып. 5.
4. **Тарарькин С. В., Тютиков В. В.** Системы координирующего управления взаимосвязанными электроприводами. Иваново: Изд-во Ивановского государственного энергетического университета, 2000. 212 с.
5. **Варков А. А., Бурков А. П.** Универсальный язык программирования для разработки систем управления // Радиоэлектроника, электроника и энергетика: Тринадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Тез. докл.: В 3-х т. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. Т. 1.
6. **Tararykin S. V., Krasilnikyants E. V., Varkov A.** Electromechanical model of manipulator robot // Proc. 8th International Symposium "Topical problems in the Field of Electrical and Power Engineering", Pärnu . 2010. P. 291—295.
7. **Armstrong B., Khatib O., Burdick J.** The Explicit Dynamic Model and Inertial Parameters of the PUMA 560 Arm // Proc. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1986.



Памяти

**Главного редактора журнала
"Мехатроника, автоматизация, управление",
член-корреспондента РАН,
д-ра техн. наук, профессора**

Евгения Дмитриевича Теряева

10 февраля 2012 г. на 78 году жизни после продолжительной болезни скончался видный ученый и крупный организатор в области автоматического и автоматизированного управления техническими системами, мехатроники и авионики.

В научной деятельности Е. Д. Теряева органично сочетались широта научных интересов и глубина проникновения в изучаемые проблемы, приверженность классическим традициям в науке и активная поддержка современных тенденций ее развития. Многочисленные труды Е. Д. Теряева охватывают различные направления фундаментальных исследований, где им получены оригинальные и основополагающие результаты. Весьма существенным является вклад Евгения Дмитриевича в теорию и практику проектирования систем управления летательными аппаратами, в становление и развитие отечественной мехатроники, исследования перспектив применения современных компьютерных технологий в задачах цифровой обработки информации

Во многом благодаря Евгению Дмитриевичу руководимый им журнал "Мехатроника, автоматизация управление" получил признание в научных и педагогических кругах и стал поистине всероссийской трибуной для освещения и пропаганды научных достижений. В последние годы по его инициативе и под научным руководством успешно проводились международные научно-технические конференции по профилю журнала.

В жизни Евгений Дмитриевич был человеком скромным, исключительно доброжелательным и пользовался большим уважением сотрудников и коллег.

Вся многогранная деятельность Е. Д. Теряева является ярким примером служения Родине, отечественной науке и высшей школе, образцом высокого долга ученого и гражданина. Скорбим в связи с кончиной Теряева Е. Д. и выражаем глубокие соболезнования родным и близким.

***Светлая память о Евгении Дмитриевиче Теряеве
навсегда сохранится в наших сердцах.***

УДК 681.5

Ж. Ш. Шаршеналиев, д-р техн. наук, директор,
avtomatika_nankr@mail.ru,

Институт автоматизации и информационных технологий
НАН КР (Кыргызстан),

Е. Л. Миркин, д-р техн. наук, зав. каф.,
eugene_mirkin@mail.ru,

Международный университет Кыргызстана

Синтез модифицированных алгоритмов адаптивного управления процессом роста монокристаллов кремния

Обоснована концепция адаптивного подхода для решения задачи управления установкой "Редмет-30", предназначенной для выращивания монокристаллов кремния. Получена линеаризованная математическая модель с входным запаздыванием установки как объекта управления. Поставлена и решена задача синтеза модифицированных алгоритмов адаптивного управления установкой. Анализ функционирования установки показал эффективность предложенных алгоритмов адаптивного управления. Полученные в результате опытных плавов образцы монокристаллов кремния полностью соответствуют заданной геометрии изделия.

Ключевые слова: адаптивные алгоритмы управления, системы с запаздыванием, САУ процессом роста кристаллов

Монокристаллический кремний является основой для производства элементов солнечных батарей и твердотельной электроники. Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии в электрическую с использованием солнечных батарей в настоящее время рассматривается как один из перспективных методов производства электроэнергии, чему способствует экологическая чистота этого источника электроэнергии и неистощимость энергии солнечного света. В работе представлены результаты исследований по разработке адаптивных алгоритмов управления установками "Редмет-30".

Особенности технологического процесса. Выращивание монокристаллов кремния из расплава поликремния в промышленных условиях может осуществляться разнообразными способами [1], среди которых наиболее популярными являются метод бесстигельной зонной плавки и метод Чохральского. Метод Чохральского, используемый на установках "Редмет-30", является основным при производстве монокристаллов кремния. Суть метода Чохральского заключается в вытягивании кристаллизующегося кремния из расплава, температура которого составляет около 1420 °С, при этом расплав, находящийся в тигле, и слиток, подвешенный на гибком тросе, вращаются в противоположных направлениях. Диаметр слитка регулируется изменением скорости выращивания слитка и температурой расплава, определяемой температурой нагревателя.

Технология процесса. Затравочный монокристалл высокого качества опускается в расплав кремния и одновременно вращается. Получение расплавленного поликремния происходит в тигле в инертной атмосфере при температуре, незначительно превосходящей точку плавления кремния $T = 1415$ °С. Тигель вращается в направлении, противоположном вращению монокристалла, для осуществления перемешивания расплава и сведения к минимуму неоднородности распределения температуры.

В начале процесса роста монокристалла часть затравочного монокристалла расплавляется для устранения в нем участков с повышенной плотностью механических напряжений и дефектами. Затем происходит постепенное вытягивание монокристалла из расплава (рис. 1). Нагрев кремния осуществляют резистивным способом. При этом графитовый нагреватель соединяют с источником постоянного напряжения.

В процессе выращивания слиток проходит четыре основные технологические стадии:

1) стадия выращивания шейки, которая характеризуется поддержанием диаметра слитка, равным 4 мм с допуском 1,5 мм;

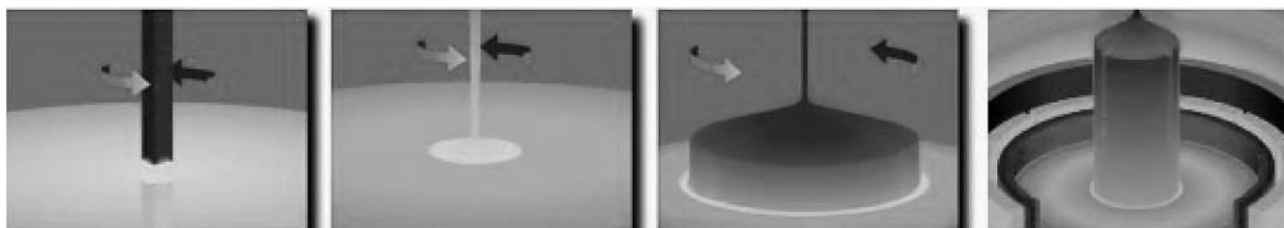


Рис. 1. Фазы роста монокристаллического кремния

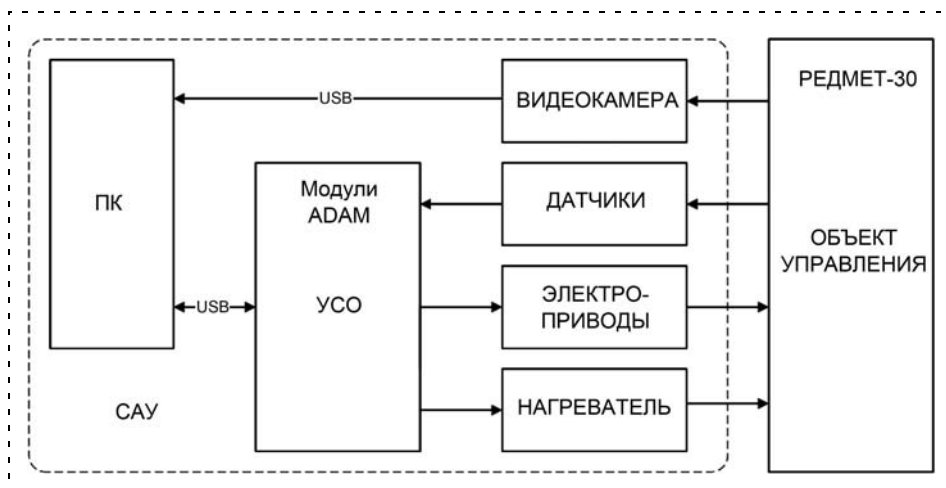


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического управления (САУ) (ПК — персональный компьютер; УСО — устройства сопряжения с объектом)

2) стадия разращивания прямого конуса, которая характеризуется постепенным увеличением диаметра слитка до заданного размера согласно технологическому регламенту;

3) стадия выращивания цилиндрической части слитка, в течение которой поддерживается заданный диаметр слитка;

4) стадия разращивания обратного конуса, которая характеризуется постепенным уменьшением диаметра слитка до заданного размера согласно технологическому регламенту.

Разработка структурной схемы САУ и ее аппаратная реализация. Имеется большое число работ, посвященных проблеме управления технологическим процессом выращивания монокристалла кремния [2—5, 7, 12]. Большинство авторов предлагают традиционные схемы ПИД-регулирования основных каналов воздействия на процесс. Однако, как показывает ряд исследователей [6, 8, 12, 13], существует необходимость использовать адаптивный подход для управления процессом роста монокристалла кремния. Необходимость адаптивного подхода обосновывается постоянным присутствием квазистационарных возмущений в системе и индивидуальными особенностями каждой установки, предназначенной для роста монокристалла кремния.

С учетом особенностей технологического процесса выращивания монокристаллов кремния на установках "Редмет-30" была предложена конфигурация САУ, структурная схема которой изображена на рис. 2.

Построение математической модели объекта и постановка задачи синтеза системы адаптивного управления. Главный показатель качества работы САУ при росте кристалла — это его диаметр, значение которого необходимо поддерживать как можно ближе к заданной величине. Кроме этого, необходимо в соответствии с технологической картой процесса выращивания монокристалла кремния обеспечить скорость перемещения затравки, как можно более близкую к заданной, зависящей от фазы роста

кристалла. Обеспечение приемлемой скорости роста кристалла и его заданной геометрии влияет в конечном итоге на качество изделия и эффективность производства.

Для управления ростом монокристалла кремния, в соответствии с технологическим процессом, задействованы следующие контуры управления, влияющие на качество изделия (контуры управления упорядочены по степени влияния на процесс):

1) контур регулирования температуры T в зоне плавки сырья (объект управления — нагревательный элемент);

2) контур регулирования скорости подачи затравки V_z (объект управления — привод подачи затравки);

3) контур регулирования скорости подачи тигля V_t (объект управления — привод подачи тигля);

4) контур регулирования скорости вращения тигля W_t (объект управления — привод вращения тигля);

5) контур регулирования скорости вращения затравки W_z (объект управления — привод вращения затравки).

При этом первые два контура (T , V_z) в списке являются наиболее важными и в соответствии с традиционной схемой управления должны работать взаимосвязанно, компенсируя влияние помех для обеспечения заданного диаметра монокристалла кремния. Третий контур (V_t) должен обеспечить синхронно с затравкой подъем тигля в "нулевую точку" (нулевой уровень расплава в тигле) максимальной эффективности нагрева расплава кремния. Четвертый и пятый контуры управления должны, в соответствии с технологической картой, поддерживать заданную скорость вращения тигля и затравки, программно изменяя ее в зависимости от длины выращенного кристалла. Детализированная структурная схема системы управления, отражающая перечисленные выше контуры регулирования, представлена на рис. 3.

В соответствии с традиционной схемой регулирования наиболее значимыми для управления являются каналы скорости подачи затравки и температуры нагревателя, которые с разным временным темпом ("медленно" в канале температуры и "быстро" в канале скорости подачи затравки) обеспечивают компенсацию помех, вызывающих отклонение диаметра кристалла от заданного значения.

Концепция использования каналов управления разрабатываемой САУ заключается в том, что в соответствии с технологической картой, учитывающей физико-химические особенности процесса управления, в перечисленные выше каналы подаются программные управления как функции от длины

выращенного кристалла. При этом для коррекции управления используются два канала — "медленный" температурный канал и "быстрый" скоростной канал перемещения затравки. Внутренние и внешние возмущения в замкнутой системе, влияющие на отклонение диаметра от заданного, интерпретируются САУ как внешние "медленные" возмущения, которые должны парироваться "быстрым" и "медленным" каналами регулирования. Таким образом, введя следующие обозначения:

- d — измеренный диаметр кристалла; d^* — заданный диаметр кристалла;
- V_z — измеренная скорость перемещения затравки; V_z^* — программная скорость перемещения затравки;
- U_T^* — программное управление в канал температуры; f — внешнее квазистационарное возмущение, учитывающее смещение рабочей точки линеаризованной системы;
- u_v — управление в канал скорости затравки; u_T — управление в температурный канал;
- $e_v = V_z - V_z^*$ — ошибка по скорости; $e_d = d - d^*$ — ошибка по диаметру, структурную схему объекта управления можно представить в виде системы, изображенной на рис. 4.

Далее, для получения математического описания объекта управления сделаем следующие допущения:

1) в малой окрестности программной траектории модель объекта управления можно считать линейной;

2) модель возмущения $f(t)$ считается квазистационарной: $f(t) \approx \text{const}$, т. е. величина $f(t)$ медленно изменяется в зависимости от длины выращенного кристалла;

3) предполагается, что основная нестабильность диаметра растущего кристалла обуславливается неравномерностью температурного поля в зоне плавления кристалла.

В соответствии со сделанными предположениями структурную схему линеаризованного объекта уп-

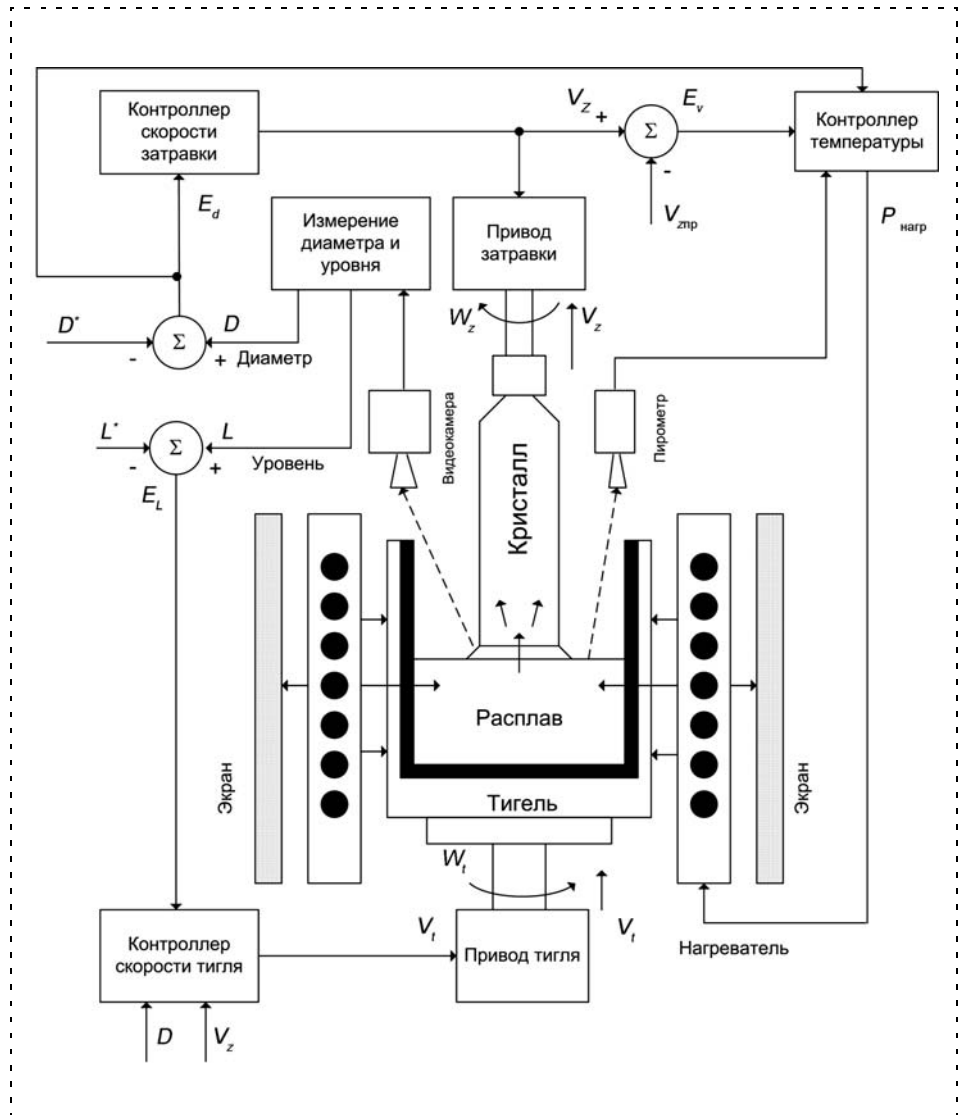


Рис. 3. Детализированная структурная схема системы управления (D и D^* — измеренный и заданный диаметры кристалла; E_d — ошибка по диаметру; L и L^* — измеренный и заданный уровни расплава в тигле; E_L — ошибка по уровню расплава; $V_{zпр}$ — программное значение линейной скорости затравки; $P_{нагр}$ — мощность нагревателя)

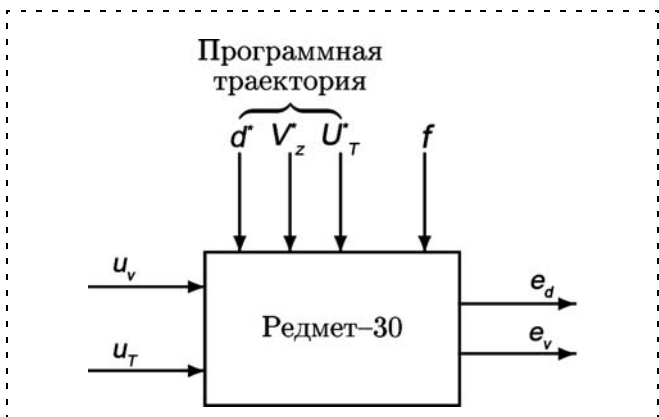


Рис. 4. Структурная схема объекта управления

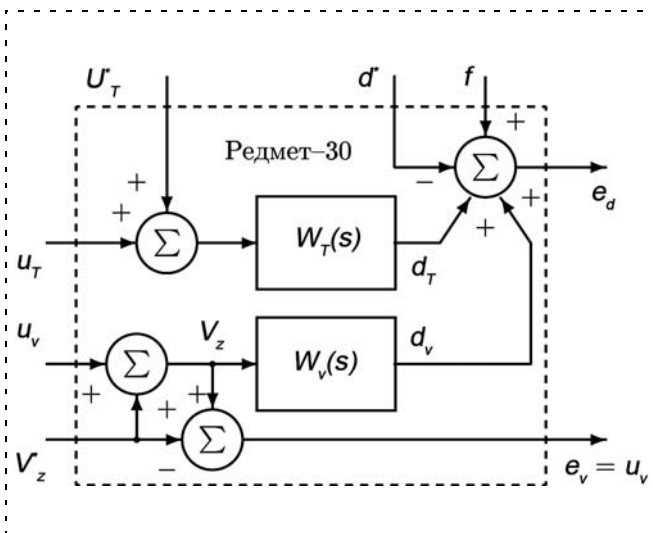


Рис. 5. Структурная схема линейризованного объекта управления ($W_T(s)$ — передаточная функция изменения диаметра кристалла по температурному каналу; $W_v(s)$ — передаточная функция изменения диаметра кристалла по скоростному каналу; d_T — доля изменения диаметра кристалла от температурного воздействия; d_v — доля изменения диаметра кристалла от скоростного воздействия)

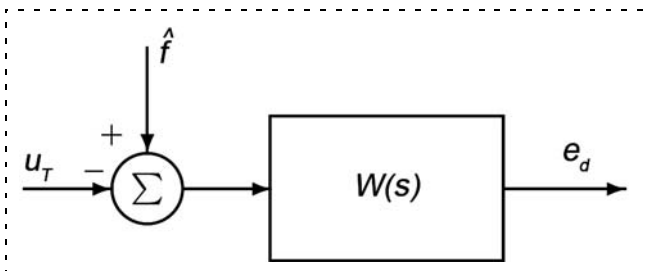


Рис. 6. Итоговая схема линейризованного объекта управления

равления можно изобразить в виде, представленном на рис. 5.

Очевидно, что в соответствии с нашими предположениями при $f = 0$ и отключенных управляющих входах ($u_v = 0$, $u_T = 0$) ошибки по диаметру и по скорости будут равны нулю ($e_d = 0$, $e_v = 0$). Это означает что при отсутствии возмущений программные управления в температурном (U_T^*) и скоростном (V_z^*) каналах обеспечивают желаемый диаметр кристалла и требуемый скоростной режим его роста.

Также очевидно, что если в скоростной канал подавать только программную составляющую управления (V_z^*), то ошибка по скорости будет равна нулю ($e_v = 0$). Однако при этом будет потерян канал быстрого парирования возмущений в замкнутой системе. Следовательно, для канала управления скоростью затравки можно предложить "быструю" обратную связь по ошибке в виде пропорционального

(П) или пропорционально-дифференциального (ПД) регулятора по ошибке e_d , например:

$$u_v = W_{cv}(s)e_d, \quad (1)$$

где $W_{cv}(s)$ — передаточная функция регулятора для скоростного канала.

Далее, выполнив небольшие структурные преобразования схемы, изображенной на рис. 5, получим итоговую структурную схему линейризованного объекта управления (рис. 6).

На схеме, представленной на рис. 6, введены следующие обозначения:

$$W(s) = \frac{W_T(s)}{1 + W_v(s)W_{cv}(s)},$$

$$\hat{f} = u_T^* + \frac{1}{W_T(s)}(f - d^*) + \frac{W_v(s)}{W_T(s)}V_z^*. \quad (2)$$

Таким образом, мы имеем систему "один вход (температурный канал) — один выход" (ошибка по диаметру кристалла) с приведенным ко входу неизвестным квазистационарным возмущением f . Далее для получения математической модели объекта управления необходимо получить структуру и приблизительные параметры передаточных функций $W_T(s)$ и $W_v(s)$, а также выбрать закон регулирования по скоростному каналу $W_{cv}(s)$.

С учетом особенностей физико-химических процессов, протекающих в установке "Редмет-30", и экспериментальных наблюдений за ней в процессе роста монокристалла кремния, а также особенностей компьютерной системы наблюдения за диаметром, выражающихся в фильтрации измеренного диаметра, структуры передаточных функций $W_v(s)$, $W_T(s)$ были выбраны в виде

$$W_v(s) = \frac{k_v}{T_v s + 1}, \quad W_T(s) = \frac{k_T e^{-\tau s}}{T_T^2 s^2 + 2 T_T \zeta s + 1}, \quad (3)$$

где k_v , T_v — коэффициент усиления и постоянная времени скоростного канала; k_T , T_T , ζ и τ — коэффициент усиления, постоянная времени, коэффициент демпфирования и время запаздывания температурного канала соответственно. Наличие временного запаздывания τ в температурном канале обуславливается инерционностью нагревательного элемента установки, т. е. тем фактом, что с момента скачкообразного изменения воздействия в температурном канале до его проявления на диаметре растущего кристалла проходит достаточно длинный период времени, равный приблизительно пяти минутам.

Закон регулирования по скоростному каналу, определяемый передаточной функцией $W_{cv}(s)$, зададим в виде ПД-закона:

$$W_{cv}(s) = k_p + k_D s, \quad (4)$$

где $k_p > 0$ и $k_D > 0$ — пропорциональный и дифференциальный коэффициенты ПД-регулятора. ПД-регулятор скоростного канала обеспечит быструю реакцию системы управления на номинальные возмущения (П-канал) с элементом упреждения (Д-канал).

В соответствии с нашими допущениями (3) и с учетом (2) и (4) передаточная функция линеаризованного объекта $W(s)$ принимает вид

$$W(s) = \frac{k_T(T_v s + 1)e^{-\tau s}}{(T_T^2 s^2 + 2T_T \zeta s + 1)((T_v + k_v k_D)s + k_v k_p + 1)}. \quad (5)$$

Передаточную функцию $W(s)$ можно представить в общем виде:

$$W(s) = \frac{k_p(s + b_0)e^{-\tau s}}{s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (6)$$

где k_p, b_0, a_2, a_1, a_0 — коэффициенты, однозначно определяемые через исходные параметры системы.

Для подтверждения достоверности структуры математической модели в пакете MATLAB (Toolbox Identification) была проведена идентификационная процедура оценки параметров передаточной функции (6). На рис. 7 изображены экспериментально измеренные входной сигнал u_T (температурный канал) и выходной сигнал e_d (ошибка определения диаметра кристалла) для временного интервала, определяющего режим выращивания цилиндра с диаметром $d^* = 156$ мм.

Результаты идентификации модели приведены ниже:

$$\begin{aligned} k_p &= 5,14 \cdot 10^{-6}, \\ b_0 &= 0,3125, \\ a_2 &= 0,005, \\ a_1 &= 0,0024, \\ a_0 &= 9,62 \cdot 10^{-6}, \\ \tau &= 300. \end{aligned}$$

На рис. 8 представлены измеренный выходной сигнал системы и выходной сигнал модели (6), полученный в результате компьютерного эксперимента. До-

стоверность структуры и параметров модели составляет 96 %. Необходимо отметить, что наиболее консервативный параметр, который не меняется в процессе роста монокристалла кремния — это временное запаздывание в температурном канале τ , обусловленное инерционностью нагревательного элемента, в то время как все параметры модели (6) могут медленно изменяться на протяжении технологического процесса роста кристалла.

На основе вышеизложенного задача создания системы автоматического управления установкой "Редмет-30" может быть сведена к задаче синтеза адаптивного алгоритма управления, поступающего в температурный канал u_T , для стабилизации ошибки диаметра. Математически цель управления можно записать в виде

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [e_d(t) = d(t) - d^*(t)] = 0. \quad (7)$$

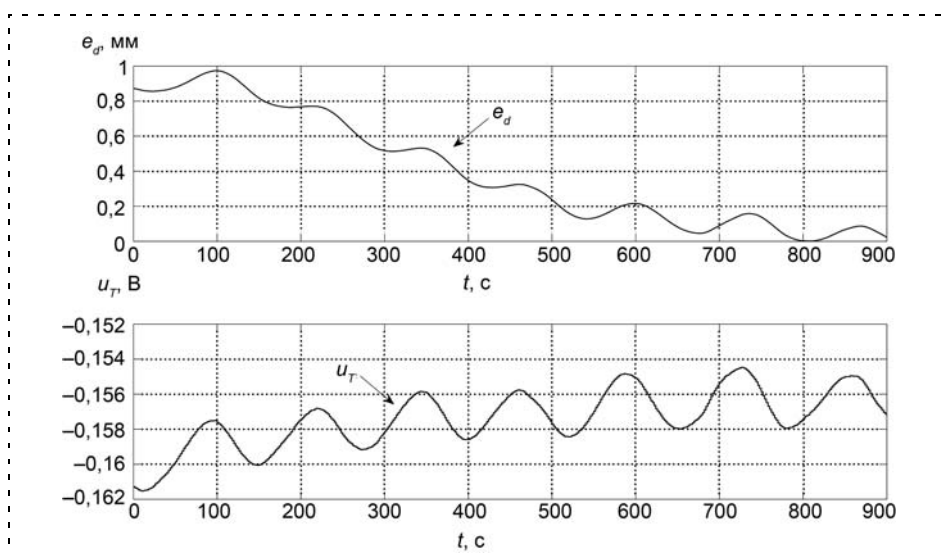


Рис. 7. Результаты измерения входов и выхода объекта управления

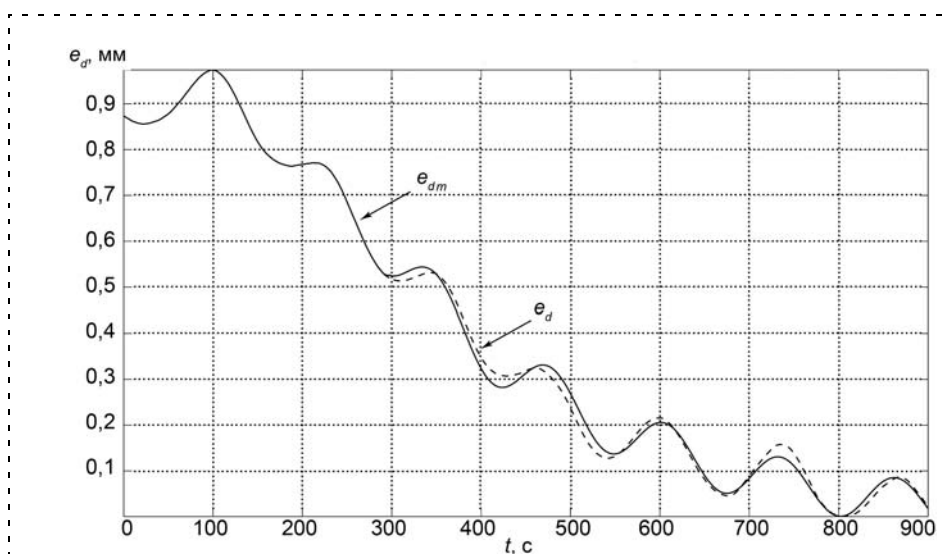


Рис. 8. Измеренный выход объекта и выход, полученный в результате компьютерного эксперимента (e_{dm})

Постановка задачи и синтез адаптивного регулятора. Линеаризованный объект управления описывается в соответствии с (6) следующим уравнением (здесь приняты стандартные обозначения):

$$y(t) = [W(s)](u(t) + f);$$

$$W(s) = \frac{k_p(s + b_0)e^{-\tau s}}{s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}, \quad (8)$$

где y — измеренный диаметр кристалла; u — управление в температурном канале; $f = \text{const}$ — квазистационарное возмущение, учитывающее наряду с внешними возмущениями также смещение в точке линеаризации; k_p, b_0, a_2, a_1, a_0 — постоянные неизвестные константы ($\text{sign}k_p > 0$), $\tau = 300$ — известное время запаздывания в температурном канале.

Цель управления задается выражением (7) ($e_d(t) = e(t)$, $d(t) = y(t)$), где сигнал $d^*(t) = y_m(t)$ определяет выход эталонной модели, формирующей желаемую траекторию изменения диаметра кристалла во времени. Динамику эталонной модели определим следующей передаточной функцией:

$$y_m(t) = [W_m(s)]r(t);$$

$$W_m(s) = \frac{e^{-300s}}{(50s + 1)(100s + 1)} = \frac{e^{-300s}}{5000s^2 + 150s + 1}, \quad (9)$$

где y_m — выход эталонной модели; r — задающее воздействие. Выбор больших постоянных времени эталонной модели объясняется медленным протеканием процесса.

Поставленная задача решена с использованием методики, предложенной в работах [9—11, 13]. В соответствии с этой методикой зададим вспомогательную модель в виде

$$y_a(t) = \left[\frac{k_1 T}{T s + 1} \right] u_a(t),$$

$$k_1 = 1; T = 200; \lambda_1 = 0,45; \delta_1 = 0,09, \quad (10)$$

и полиномы $F(s)$, $L(s)$ и $R(s)$, определяющие структуру фильтров, в виде

$$F(s) = s + 0,45; L(s) = s + 0,09;$$

$$R(s) = \frac{1}{200} (200s + 1)L(s) = \left(s + \frac{1}{200} \right) (s + 0,09).$$

Представим эталонную модель (9) в эквивалентном виде

$$y_m(t) = \left[\frac{200e^{-300s}}{(200s + 1)(s + 0,09)} \right] u_r(t);$$

$$u_r(t) = \left[\frac{\left(s + \frac{1}{200} \right) (s + 0,09)}{5000s^2 + 150s + 1} \right] r(t). \quad (11)$$

Определим регрессионные переменные, полученные с использованием заданной выше схемы фильтрации пониженной сложности, выражениями

$$y_{mpr}(t) = \left[\frac{1}{(50s + 1)(100s + 1)} \right] r(t);$$

$$\omega_{y_{mpr}}(t) = \left[\frac{1}{s + 0,45} \right] y_{mpr}(t), \quad \omega_u(t) = \left[\frac{1}{s + 0,45} \right] u(t);$$

$$\omega_r(t) = \left[\frac{1}{s + 0,09} \right] u_{rf}(t), \quad \omega_{\lambda y_a}(t) = \left[\frac{1}{s + 0,45} \right] y_a(t); \quad (12)$$

$$\omega_{\delta y_a}(t) = \left[\frac{1}{s + 0,09} \right] y_a(t), \quad u_{rf}(t) = \left[\frac{200}{200s + 1} \right] u_r(t).$$

Алгоритм адаптивного управления в соответствии с работой [10] определим в виде

$$u(t) = \Theta^T(t)\Omega_{mpr}(t), \quad u_a(t) = \psi(t)\xi(t) + ke_a(t)m^2(t),$$

$$e_a = e(t) + y_a(t), \quad (13)$$

где $\Theta \in R^6$, $\psi \in R^1$ — настраиваемые параметры, $k = 200$,

$$\Omega_{mpr}^T(t) = [\omega_{y_{mpr}}^T(t), \omega_u^T(t), \omega_r^T(t), u_{rf}(t), u_r, 1],$$

$$\xi(t) = \left[\frac{1}{L(s)} \right] \Theta^T(t - \tau)\Omega_{mpr}(t - \tau) - \Theta^T(t)\Omega_{Lmpr}(t), \quad (14)$$

$$\Omega_{Lmpr}(t) = \left[\frac{1}{L(s)} \right] \Omega_{mpr}(t - \tau) +$$

$$+ \left[\left[\frac{1}{L(s)} \right] \omega_{\lambda y_a}^T(t) \quad 0 \quad \omega_{\delta y_a}^T(t) \quad y_a(t) \quad 0 \right]^T,$$

$$m(t) = \sqrt{\Omega_{Lmpr}^T(t)\Omega_{Lmpr}(t) + \xi^2(t)}.$$

Модифицированные алгоритмы настройки параметров $\Theta(t)$ и $\psi(t)$ определим выражениями

$$\dot{\Theta}(t) = -\Lambda_\Theta(t) - k_{p\Omega}\dot{\Lambda}_\Theta(t);$$

$$\Lambda_\Theta(t) = \text{sign}(k_p)\Phi e_a(t)\Omega_{Lmpr}(t); \quad (15)$$

$$\dot{\psi}(t) = -\Lambda_\xi(t) - k_{p\xi}\dot{\Lambda}_\xi(t);$$

$$\Lambda_\xi(t) = \Phi_\psi e_a(t)\xi(t),$$

где коэффициенты адаптивного закона управления заданы в виде

$$\Phi \in R^{6 \times 6} = \text{diag}\{5\}; \Theta(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T;$$

$$k_{p\Omega} = k_{p\xi} = \Phi_\psi = 1; \psi(0) = 0.$$

Анализ функционирования установки. Синтезированные алгоритмы адаптивного управления (13)—(15) были реализованы в программном комплексе системы автоматического управления установкой "Редмет-30".

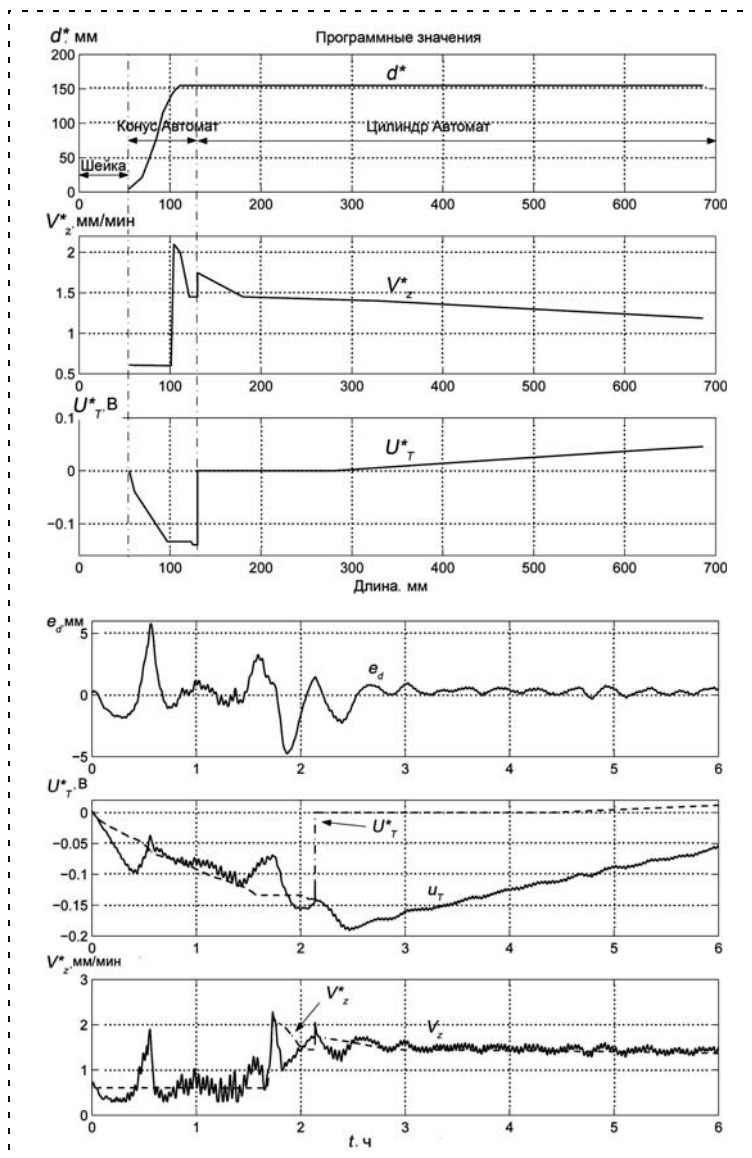


Рис. 9. Зависимость программных траекторий изменения диаметра кристалла (d^*), скорости перемещения затравки (V_z^*) и управления в температурный канал (U_T^*) от длины выращенного кристалла. Изменение во времени ошибки диаметра в системе (e_d), а также управления в температурный (u_T) и скоростной каналы (V_z)



Рис. 10. Слиток монокристалла кремния, полученный в результате опытной плавки

Рис. 9 представляет результаты функционирования замкнутой адаптивной системы управления. Слиток монокристалла кремния, полученный в результате опытной плавки, приведен на рис. 10. Переходные процессы в замкнутой системе адаптивного управления подтверждают эффективность предложенной схемы для объектов с входным запаздыванием.

Результат опытной эксплуатации САУ установками "Редмет-30" выявил обоснованность использования адаптивного подхода в условиях квазистационарной неопределенности. Разработанная система успешно прошла эксплуатацию на опытной установке и была тиражирована на ряд установок.

Список литературы

1. **Технология** полупроводникового кремния / Фалькевич Э. С., Пульнер Э. О., Червоный И. Ф. и др. М.: Металлургия, 1992.
2. **Gevelber M. A.** Dynamics and control of the Czochralski process III // Journal of Crystal Growth. 1994. V. 139. P. 271–285.
3. **Gevelber M. A.** Dynamics and control of the Czochralski process IV // Journal of Crystal Growth. 1994. V. 139. P. 286–301.
4. **Gevelber M. A., Stephanopoulos G.** Dynamics and control of the Czochralski process I // Journal of Crystal Growth. 1987. V. 84. P. 647–668.
5. **Gevelber M. A., Stephanopoulos G., Wargo M.** Dynamics and control of the Czochralski process II // Journal of Crystal Growth. 1987. V. 91. P. 199–217.
6. **Gevelber M. A., Wilson D., Duanmu N.** Modelling requirements for development of an advanced Czochralski control system // Journal of Crystal Growth. 2001. V. 230. P. 217–223.
7. **Looze D. P., Farzin A., Bernstein B.** Modelling and identification of the liquid encapsulated Czochralski GaAs process for control // Journal of Crystal Growth. 1995. V. 148. P. 79–95.
8. **Satunkin G. A.** Mathematical modelling and control system design of Czochralski and liquid encapsulated Czochralski processes: the basic low order mathematical model // Journal of Crystal Growth. 1995. V. 154. P. 172–188.
9. **Миркин Е. Л.** Новая схема разомкнутого адаптивного управления с эталонной моделью для линейных устойчивых одномерных систем // Проблемы автоматизации и управления. Бишкек: Илим, 2006. С. 36–46.
10. **Миркин Е. Л., Шаршеналиев Ж. Ш.** Синтез адаптивных систем управления с вспомогательной моделью для объектов с запаздыванием по управлению // Автоматика и телемеханика. 2010. № 11. С. 159–171.
11. **Mirkin B. M., Mirkin E. L., Per-Olof Gutman.** State-feedback adaptive tracking of linear systems with input and state delays // International journal of adaptive control and signal processing, 2009. V. 23. № 6. P. 567–580.
12. **Миркин Е. Л.** Разработка адаптивной системы управления процессом роста монокристалла кремния // Проблемы автоматизации и управления. Бишкек: Илим, 2009. № 2. С. 11–20.
13. **Миркин Е. Л.** Адаптивное управление динамическими системами с запаздыванием. Бишкек: Изд. Кыргызско-российск. славянск. университета, 2010.

П. Д. Гиндин, д-р техн. наук, доц.,
nyu2000@mail.ru,

В. С. Кондратенко, д-р техн. наук, зав. каф.,
vsk1950@mail.ru,

Московский государственный университет
приборостроения и информатики,

А. В. Сорокин, канд. техн. наук, инженер,
sorokkin@mail.ru,
ОАО "МЗ "Сапфир",

В. А. Хлызов, инженер,
vlkhlyzov@gmail.com
ООО "ЭксДиБиАй",

Программа управления для промышленных установок лазерного управляемого термораскалывания

Рассмотрены установки лазерной резки хрупких неметаллических материалов РТ-350, РТ-500. Описаны основные элементы установок РТ-350, РТ-500, приведена схема установки. На базе технологического маршрута лазерной резки приборных пластин и стекла составлен и предложен алгоритм работы программы управления установками. Описаны основные проблемы при создании системы управления и методы их решения. Разработана и предложена система управления установками лазерной резки — программный продукт Laser Cut v3.0. Описан основной принцип работы с программным обеспечением Laser Cut v3.0 на установках лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ). Описаны основные параметры и их значения, необходимые для резки хрупких материалов на установках ЛУТ.

Ключевые слова: лазерное управляемое термораскалывание, лазер, кремний, программное обеспечение, система управления, интерфейсные окна, лазерная резка приборных пластин, установка лазерной резки

Технология лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ), разработанная академиком В. С. Кондратенко [1], лежит в основе прецизионных установок ЛУТ серии РТ-500 [2], РТ-350 [3], спроектированных и выпущенных ОАО "Московский завод "Сапфир". Установки с технологией ЛУТ выполняют принципиально новый технологический процесс прецизионной резки широкого класса анизотропных материалов и, в первую очередь, выполняют такие задачи, как резка приборных пластин на кристаллы на подложках из сапфира, кварца, кремния и других полупроводниковых материалов [4], а также резка стекла для плоских дисплейных панелей. Использование данной технологии послужило предпосылкой для создания программного обеспечения для управления технологическими процессами на установках. В свою очередь, совершенствование технологии стимулировало использование новых технологических модулей на установках, а именно: видеомикроскопа (камеры, ИК камеры 2 на рис. 1), высокопрецизионных приводов переме-

щения (3, 5 на рис. 1) с контроллером управления LSMC-5 (20 на рис. 2), устройства нанесения дефекта (УНД) (4 на рис. 1), произведенных ООО "Рухсервмотор".

Управление установкой может осуществляться как из окна терминала контроллера управления, так и из отдельной системы управления, которая выполняет контроль и отправку команд в контроллер управления. Преимущество отдельной системы в том, что она является удобной в использовании, обладает графическим интерфейсом, а также большим числом удобных функций и настроек, необходимых для проведения технологической резки и исследований на лазерных установках. К этим функциям можно отнести: работу с видеоизображением с камер, позиционирование предметного столика в окне изображения с камер, удобный ввод и автоматический расчет параметров лазерной резки, работу с циклами лазерных резов, графический интерфейс управления усилием прижима УНД и мощностью лазерного излучения, сохранение/загрузка параметров лазерной резки. Рассмотрению такой системы посвящена данная статья.

Ниже представлена полная схема установок серии РТ-350, РТ-500, состоящая из 20 компонентов. Отличие лазерной установки РТ-350 от РТ-500 в том, что на РТ-350 установлен полупроводниковый лазер с выходной мощностью 450 Вт с собственным блоком питания, а на установке РТ-500 — СО₂-лазер с выходной мощностью 100 Вт с отдельным блоком питания.

В процессе создания алгоритма для системы управления установки РТ-350 — был рассмотрен весь технологический процесс лазерной резки приборных пластин на чипы, а для установки РТ-500 технологический процесс лазерной резки стекла. Технологи-

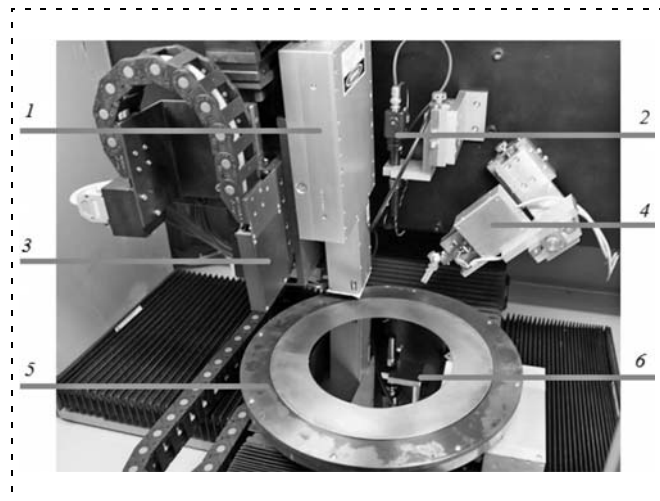


Рис. 1. Лазер, приводы перемещения и устройство нанесения дефекта на установке РТ-350:

1 — полупроводниковый лазер мощностью 450 Ватт; 2 — видеомикроскоп; 3 — привод перемещения лазера с объективом; 4 — устройство нанесения дефекта; 5 — трехкоординатный привод перемещения; 6 — заготовка — кремневый диск

ческий маршрут процесса ЛУТ состоит из следующих операций:

- 1) установка заготовки на предметный столик;
- 2) ввод параметров резки: геометрических размеров заготовки, скорости резки, длины реза, координат точек нанесения первоначального дефекта, длины дефекта, числа резов;
- 3) прижим заготовки, фиксация;
- 4) ручная настройка положения заготовки или поиск реперных меток;
- 5) выход столика в зону ориентации (выравнивая по линии реза);
- 6) расчет параметров данного реза;
- 7) выход столика в зону резки;
- 8) резка заготовки по заданным параметрам;
- 9) выход столика в исходное положение или поворот столика для последующей резки;

Программное обеспечение, система управления должны реализовывать автоматическое выполнение операций 5)–9). В том случае, если заготовка имеет нанесенные реперные метки, автоматическое выполнение будет проводиться сразу после прижима заготовки (операции 4)–9)), если резов несколько, тогда цикл 6)–9) повторяется определенное число раз, указанное в пункте 2) как параметр "число резов".

На базе данного маршрута был составлен алгоритм (рис. 3) для программного обеспечения. Система управления Laser Cut v3.0 была реализована на языке программирования Borland Delphi 7 с использованием технологии и компонентами Threads, а также с использованием динамических библиотек DLL MILImage для работы с видеоизображением. Разработанная система управления Laser Cut v3.0 разделена на основную программу и главную программу контроллера управления (ГПКУ). Основная программа имеет графический интерфейс управления и оснащена необходимым функционалом. ГПКУ является передатчиком команд от основной программы к приводам перемещения, осуществляет контроль положения и выполняет лазерную резку по заданным параметрам на установках. Данная система разработана для серии установок ЛУТ, выполняющих однотипные задачи и оснащенных контроллером управления серии LSMC-5, произведенным ООО "Рухсервмотор".

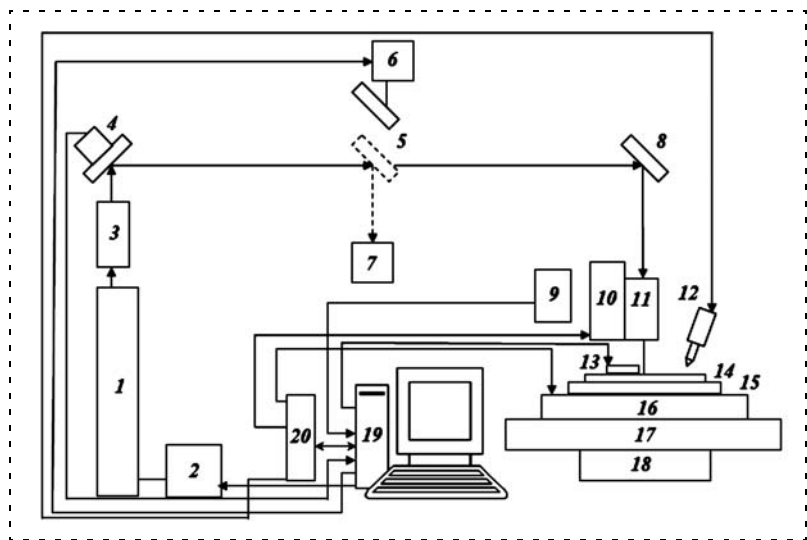


Рис. 2. Схема установок РТ-350, РТ-500:

1 — CO₂- или полупроводниковый лазер; 2 — блок питания; 3 — оптический преобразователь; 4 — поворотное зеркало с контролем мощности; 5 — заслонка; 6 — пневмоцилиндр; 7 — поглотитель; 8 — поворотное зеркало; 9 — видеокамера; 10 — Z-привод; 11 — объектив; 12 — койл-мотор (привод В); 13 — форсунка; 14 — подложка; 15 — вакуумный столик; 16 — координатный стол, C-привод; 17 — координатный стол, X-привод; 18 — координатный стол, Y-привод; 19 — компьютер с платами управления; 20 — контроллер X-, Y-, Z-, B-, C-приводов

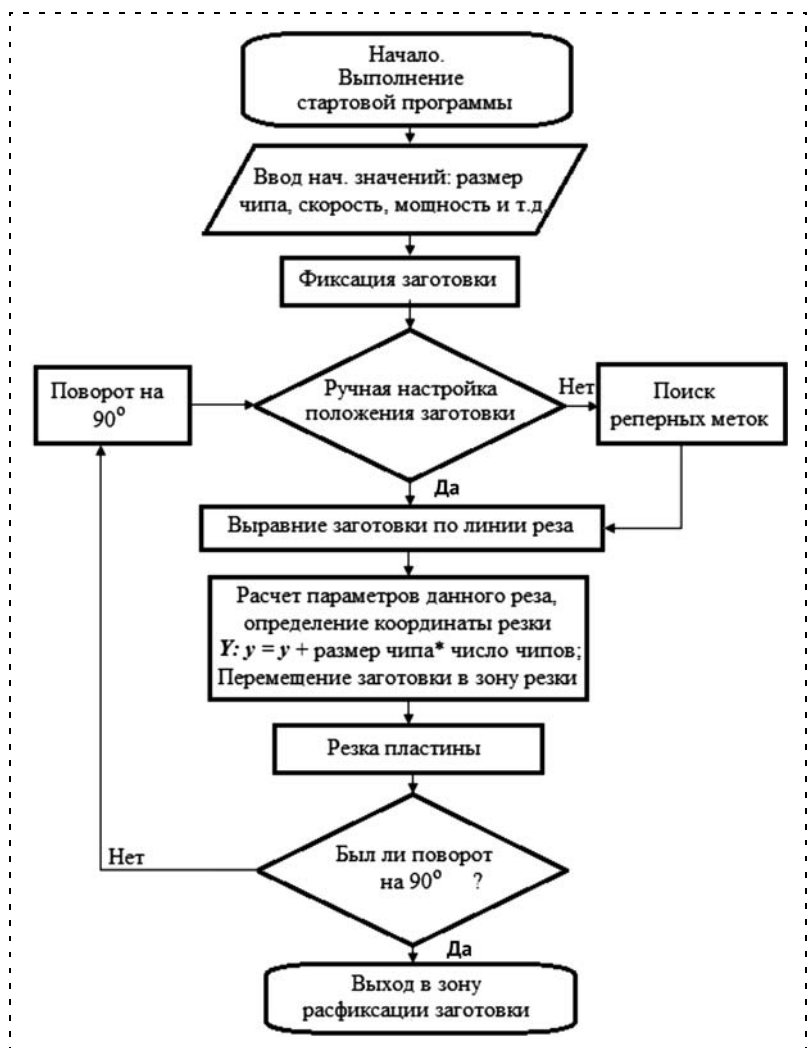


Рис. 3. Блок-схема алгоритма программы управления

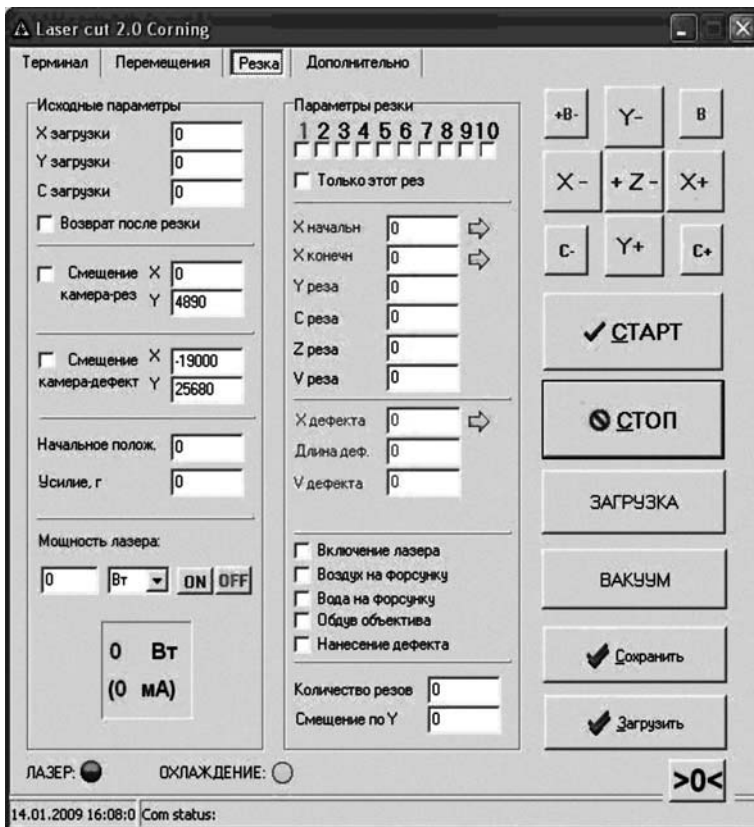


Рис. 4. Интерфейсное окно настройки с выводом изображения с камеры

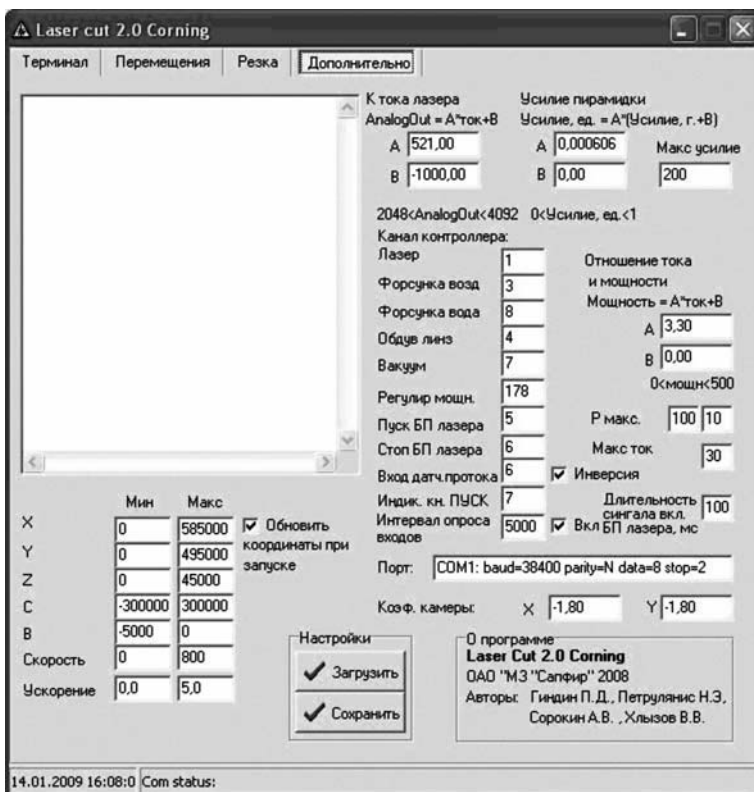


Рис. 5. Интерфейсное окно ввода специальных настроек

Аналогично был разработан алгоритм резки стекла на установке лазерной резки стекла РТ-500.

При разработке программы управления возник следующий ряд проблем, который приходилось решать, используя некоторые современные технологии и методы автоматизации.

1. Необходимо было ввести компоненты Threads многопоточности для оптимальной и высокопроизводительной работы установок, которые позволяют одновременно выполнять несколько операций в одно время, например: изменение положения, контроль приводов перемещения и расчет данных для текущего реза, что значительно ускоряет технологический процесс лазерной резки на установках.

2. Требовалось специально разработать алгоритм поиска упора и подпрограмму ГПКУ для устройства нанесения дефекта, которая позволяет с прецизионной точностью наносить дефект на сверхточные материалы, не повреждая их.

3. В системе необходимо было использовать динамические библиотеки DLL и объекты MImage, что позволило управлять перемещением приводов в горизонтальной плоскости в окне изображения с камер (рис. 4). В программе имеется также возможность сохранения изображения и система выравнивания заготовки по двум точкам.

4. Потребовалось использовать дополнительную плату обратной связи PCI Card I/O для своевременного получения данных (значений от приводов) и их верификации, что в значительной мере увеличило скорость резки заготовки.

5. С появлением новых модификаций контроллеров управления LSMC-5 с интерфейсом передачи данных USB 2.0 в программе управления появилась поддержка данного интерфейса, что в значительной мере увеличило скорость загрузки программы и выполнение операций на установках.

Перед началом работы в программе Laser Cut v3.0 необходимо ввести требуемые настройки в интерфейсном окне ввода специальных настроек (рис. 5). Эти настройки для каждой установки ЛУТ индивидуальные и содержатся в техническом паспорте установки. Далее необходимо провести операцию обнуления приводов, нажав на кнопку ">0<" в интерфейсном окне лазерной

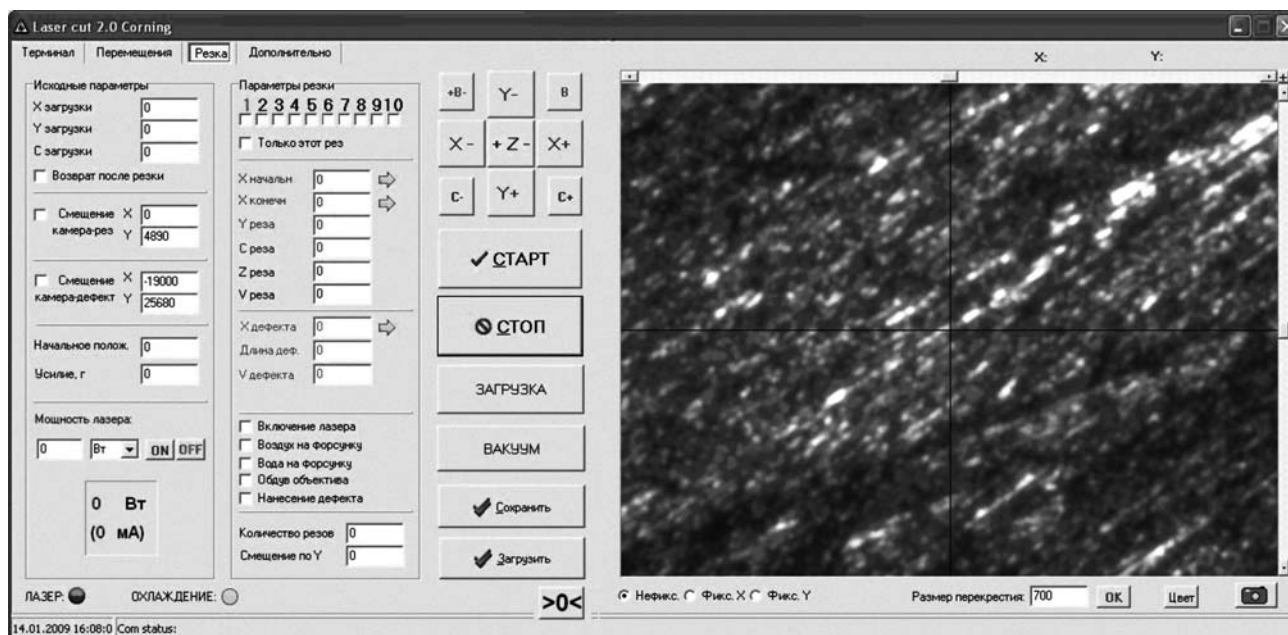


Рис. 6. Интерфейсное окно лазерной резки

резки (рис. 6). Эта операция обнулит абсолютное значение координат приводов перемещения X , Y , Z , C , B . Привод X , Y отвечает за перемещения установки в горизонтальной плоскости предметного столика. Привод Z отвечает за положение объектива, через который поступает лазерное излучение в зону резки. Привод C отвечает за вращение предметного столика. Приводом B является УНД, которое имеет расширенные настройки, такие как усилие прижима и усилие удержания прижима алмазной пирамидки. УНД необходимо для создания первоначального дефекта на поверхности материала, от которого зародится трещина, разделяющая материал.

Управление лазерной резкой материалов осуществляется в интерфейсном окне лазерной резки (рис. 6). В окно вводятся необходимые параметры, такие как мощность лазерного излучения, смещение для видеомикроскопа, смещение для УНД и непосредственно параметры циклов самой резки (смещение — это разница между положением объектива видеомикроскопа и УНД).

Для настройки параметров циклов резки эффективнее использовать изображение с видеомикроскопа (см. рис. 4), так как это дает возможность быстрого ввода значений для координат приводов X , Y посредством нажатия кнопки с символом " \Leftrightarrow ", расположенной напротив значений координат X , Y . Переключение циклов осуществляется нажатием на цифры 1, 2, 3, 4, Каждый цикл реза имеет свои индивидуальные настройки, такие как скорость реза, длина дефекта, положения приводов

X , Y , C , Z , B , и может быть использован как отдельно, так и комплексно с другими циклами. Все параметры, установленные в программе Laser Cut v3.0, сохраняются в текстовом файле. Также существует возможность загрузки параметров из текстового файла.

Разработанное программное обеспечение позволяет выполнять большой спектр работ по лазерной резке хрупких неметаллических материалов на установках ЛУТ РТ-350 и РТ-500. Программный продукт Laser Cut v3.0 может использоваться также и на других установках ЛУТ с учетом их конструктивных и технологических особенностей.

Список литературы

1. Кондратенко В. С. Исследование и разработка процесса резки стекла методом лазерного управляемого термораскалывания: Дис. канд. техн. наук. Москва, 1983.
2. Сорокин А. В., Кондратенко В. С., Гиндин П. Д., Наумов А. С., Колесник В. Д. Установка для лазерной резки стекла РТ-500 // Тр. МНТК "Инновационные технологии в науке, технике и образовании", Египет, 14—21 ноября 2009. М.: МГУПИ, 2009. С. 7.
3. Сорокин А. В., Кондратенко В. С., Гиндин П. Д., Колесник В. Д. Установка для лазерной резки полупроводниковых пластин РТ-350 // Тр. МНТК "Инновационные технологии в науке, технике и образовании", Египет, 14—21 ноября 2009. М.: МГУПИ, 2009. С. 6.
4. Кондратенко В. С., Гиндин П. Д., Наумов А. С., Черных С. П. Разделение приборных пластин на кристаллы методом лазерного управляемого термораскалывания // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. Тр. XIII Междунар. научн.-техн. сем. Алушта, 2004.
5. Патент 2024441, МКИ С 03 В 33/02. Способ резки хрупких материалов / Кондратенко В. С.; Заявл. № 5030537/33 от 2.04.1992; Опубл. 15.12.94; Бюл. № 23.

ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



Управление и информатика в авиакосмических и морских системах



Главный редактор:

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСЕЕВ В. В.
БЕЛОКОНОВ И. В.
БУКОВ В. Н.
ВАСИЛЬЕВ В. И.
ГОДУНОВ В. А.
ГУРЕВИЧ О. С.
ГУРСКИЙ Б. Г.
ЕФИМОВ В. В.
ЗАЙЦЕВ А. В.
КРЫЖАНОВСКИЙ Г. А.
НЕСТЕРОВ В. А.
ОХТИЛЕВ М. Ю.
ПАНКРАТОВ В. М.
РАСПОПОВ В. Я.
САБО Ю. И.
СТЕПАНОВ О. А.
СОЛДАТКИН В. М.
ТЕРЯЕВ Е. Д.
ФИЛИМОНОВ Н. Б.
ШИРЯЕВ В. И.
ШКОЛИН В. П.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЧУГУНОВА А. В.

СОДЕРЖАНИЕ

Мироненко А. А.

Программирование траектории и режимов движения судна
в стесненных водах 49

Севрюк А. Н.

Метод оптимизации кластерного анализа для решения задач
локализации подводных объектов 55

Игнатьев С. В., Степанов А. П., Завьялов П. П., Винокуров И. Ю.

Синтез алгоритма управления модуляционным вращением
измерительного блока инерциально-спутниковой системы . . . 62

Канушкин С. В., Лебедев Г. Н., Чан Ван Туен, Швыдченко К. И.

Подготовка операторов безотказного управления сложными
подвижными объектами при регулируемом регламенте
проведения проверок. 67

А. А. Мироненко, канд. техн. наук, доц.,
alex_mironenko@mail.ru,
ФГОУ ВПО МГА им. адм. Ф. Ф. Ушакова

Программирование траектории и режимов движения судна в стесненных водах

Рассматривается новый подход к заданию программной траектории судна в стесненных условиях плавания на основе сигмоидальных функций. Предлагается задавать элементы модели посредством кинематических параметров, а угол наклона сигмоидальной функции связывать с градиентами соответствующих кинематических параметров и их функциональными изменениями. Результаты могут быть использованы в современных электронных картографических навигационно-информационных системах, предназначенных для планирования программной траектории и режимов маневрирования судов, при автоматическом управлении судном по траектории.

Ключевые слова: программная траектория, сигмоида, градиент

Стесненные воды являются одним из наиболее ответственных и сложных этапов судовождения. Управление судном в проливах, каналах и фарватерах, где ширина полосы проводки ограничена, требует постоянного контроля за движением судна с высокой точностью, особенно на криволинейных участках [1–6]. Эти особенности отражены в нормативных требованиях Резолюции Международной морской организации (ИМО) А.893(21) и обязывают, чтобы в подробном плане рейса принимались во внимание:

- безопасная скорость вблизи навигационных опасностей и необходимые изменения скорости на пути;
- точки изменения курса с учетом циркуляции судна при запланированной скорости и ожидаемого воздействия приливных и других течений;
- другие факторы.

Анализ исследований [1–7] показывает, что при традиционном графическом планировании перехода на бумажных картах криволинейные участки пути судна, имеющие вид сложной кривой, учитываются со следующими допущениями:

1. Путь задается движением некоторой точки судна без учета угла дрейфа.

2. Кривая поворота заменяется кривой, соответствующей циркуляции судна, под которой в соответствии с Резолюциями ИМО А.715(18), Комитета по безопасности на море MSC.137(76) [8–10] понимается маневр, выполняемый как вправо, так и влево с углом кладки руля, допустимым при текущей скорости судна, т. е. не учитывается содержание судна. Точки начала и конца поворота (ТНП, ТКП) находятся по выдвигу и смещению, а криво-

линейный участок оформляется произвольной плавной линией [1, 5, 11].

3. Кривая поворота заменяется дугой окружности, ТНП и ТКП находят по касанию дуги окружности с прямолинейными отрезками пути. В действительности криволинейная траектория движения судна близка к дуге окружности только в период установившейся циркуляции, который по данным различных источников [6, 8–10] начинается после изменения курса более чем на 160...180°, т. е. является частным, редко встречающимся случаем поворота.

4. Курс судна в процессе поворота изменяется равномерно, однако, как показывает анализ литературы [1, 2, 6, 9, 10, 12, 13] и данные экспериментальных исследований [14], эти изменения носят нелинейный характер.

В настоящее время при использовании высокоточных систем позиционирования и электронных карт, современных навигационных комплексов необходимы и возможны иные способы учета поворота судна, более точные способы определения ТНП, ТКП и расчет точки удержания поворота (ТОП). Даже в свое время С. О. Макаров отмечал [15]: "Следует также научиться управлять кораблем таким образом, чтобы после перемены курса он был одержан на известном направлении и более не катился. Нет ничего безобразнее и бесполезнее, как перекачаться более чем надо, и затем катиться обратно".

Анализ современных отечественных и зарубежных электронных картографических навигационно-информационных систем (ECDIS) [12, 16–20], показывает, что поворот учитывается старыми способами (с постоянным радиусом, с постоянной угловой скоростью, с заданным углом кладки руля), которые имеют вышеописанные ограничения. Поэтому разработка новых моделей криволинейного пути судна, режимов изменения курса, скорости судна для использования в ECDIS, при автоматическом управлении по любой траектории крайне необходима. "И теперь, когда рангоут почти отменен, в чем собственно заключается знание морского дела, как не в точном понимании всех движений своего корабля..." [15].

Данные экспериментов [14] и анализ исследований [6, 12, 15] показывают, что поворот судна выполняется в следующей последовательности: перекладка руля в ТНП в сторону поворота и удержание в заданной позиции до достижения необходимой угловой скорости, далее удержание или перевод в положение "прямо руль" в целях стабилизации скорости поворота, а перед подходом к конечному курсу в ТОП перекладка руля в сторону, противоположную зарыскиванию для остановки поворота судна при достижении конечного курса (ТКП). Поскольку угловая скорость и ускорение могут принимать разные значения, то форма траектории может быть различной, но на криволинейном участке от ТНП до ТОП криволинейная траектория судна соответствует циркуляции с заданным углом

кладки руля, для которой выделяют три основных периода [1–3, 6, 9, 10]:

- 1) маневренный (период перекладки руля);
- 2) эволюционный (неустановившейся циркуляции), во время которого меняются угол дрейфа, линейная и угловая скорости, заканчивающийся, как правило, после изменения курса на 160...180°;
- 3) установившийся, характеризующийся постоянными значениями линейной, угловой скорости, радиуса кривизны и угла дрейфа.

Характеры изменения кинематических параметров судна при заданной кладке руля по данным типового эксперимента показаны на рис. 1. Очевидно, угол дрейфа и скорость судна изменяются нелинейно с момента начала циркуляции и достигают установившихся значений. Курс — монотонно убывающая (возрастающая) кривая, переходящая в конце эволюционного периода циркуляции в прямую.

Общеизвестно, что при выводе уравнений динамики судна [9, 10, 12, 13, 21] используются различные системы координат (полусвязная, связанная, скоростная), в которых за центр принимается точка, расположенная в центре масс судна (в большинстве случаев, в районе миделя судна), а кинематические параметры зависят от времени [1–3, 6, 9, 10, 12, 13]. В соответствии с теоремой Шаля центр системы может быть принят в любой точке на судне, поэтому целесообразно его разместить в точке управления судном капитаном (лоцманом), где расположены органы управления и информационные датчики (судовой радионавигационной аппаратуры, ECDIS и т. п.) и рассматривать функциональное изменение кинематических параметров относительно этой точки, а именно:

- градиент истинного курса — режим изменения истинного курса от пройденного расстояния (аналог угловой скорости);

- градиент скорости — режим изменения скорости судна от пройденного расстояния (аналог ускорения);
- градиент вектора перемещения точки управления (угла дрейфа) — режим изменения вектора перемещения точки управления (угла дрейфа) от пройденного расстояния (путь судна).

Проведенный в работе [14] анализ маневров судов в портовых водах по данным автоматических информационных (идентификационных) систем (АИС) подтвердил целесообразность использования сигмоидальных функций при формализации программных режимов курса и скорости, которые можно использовать и для аппроксимации маневренных элементов судна:

$$COG_i = COG_H + \sum_{k=0}^{n_{COG}} \frac{\Delta COG_k}{1 + \exp((Sc_k - S_i) \nabla COG_k)};$$

$$HDG_i = HDG_H + \sum_{k=0}^{n_{HDG}} \frac{\Delta HDG_k}{1 + \exp((Sh_k - S_i) \nabla HDG_k)}; \quad (1)$$

$$SOG_i = SOG_H + \sum_{k=0}^{n_{SOG}} \frac{\Delta SOG_k}{1 + \exp((Ss_k - S_i) \nabla SOG_k)},$$

где COG_i, COG_H — текущее и начальное значения направлений вектора перемещений точки управления судна относительно грунта, °; HDG_i, HDG_H — текущий и начальный истинные курсы судна, °; $\Delta COG_k, \Delta HDG_k$ — изменения направлений перемещений и курсов судна ((+) — вправо, (–) — влево), °; $\nabla COG_k, \nabla HDG_k$ — градиенты направлений перемещения и курсов судна, °/м; $n_{COG}, n_{HDG}, n_{SOG}$ — число маневров; Sc_k, Sh_k, Ss_k — пройденные расстояния от начальной точки до характерных точек (ХТ) соответствующих параметров, м; S_i — текущее расстояние, пройденное от начальной точки, м; SOG_i, SOG_H — текущая и начальная продольные скорости

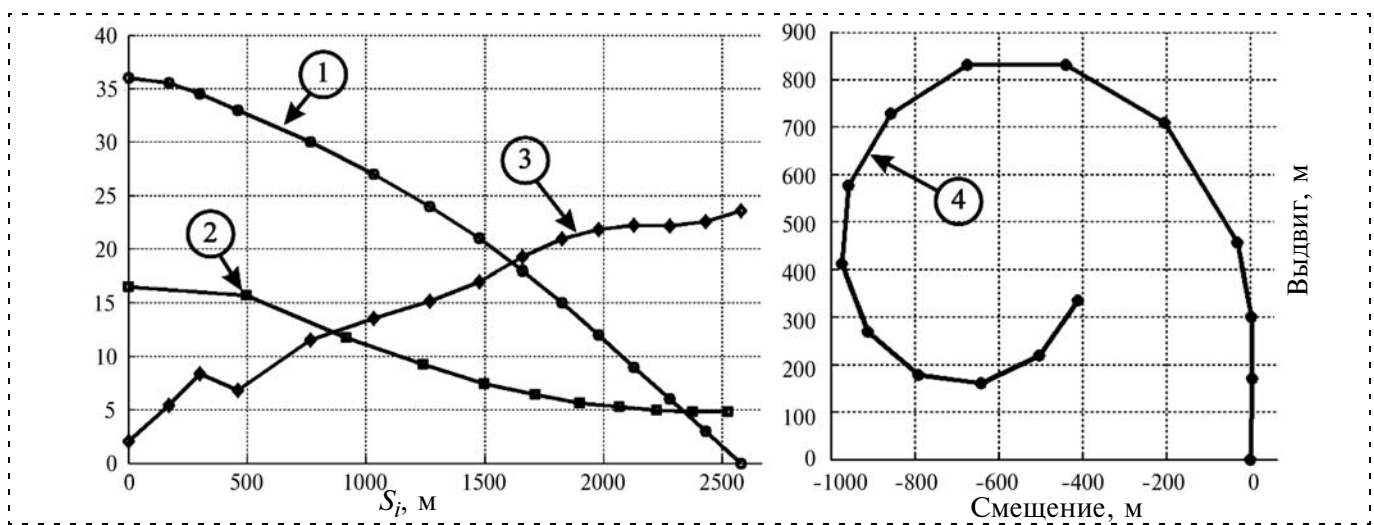


Рис. 1. Результаты натурального эксперимента циркуляции судна при заданной кладке руля: 1 — курс судна ($HDG_i/10, ^\circ$); 2 — скорость судна (SOG_i , узл); 3 — расчетный угол дрейфа ($\alpha_i, ^\circ$); 4 — траектория судна (позиции наблюдателя — COG_i)

судна относительно грунта, узл; ΔSOG_k — изменение скорости ((+) — увеличение, (-) — уменьшение), узл; ∇SOG_k — градиент скорости, узл/м.

Применение сигмоидальных функций в модели (1) обосновывается следующими их преимуществами:

1. Характер изменения функции соответствует характеру изменения кинематических параметров судна (например, изменению курса (кривой самописца компаса) при совершении поворота судна).
2. Коэффициенты сигмоидальной функции соответствуют изменениям кинематических параметров судна (например, коэффициент усиления функционально соответствует изменению навигационного параметра, угол наклона — градиенту кинематического параметра).
3. Точки перегиба соответствуют точкам подачи команд на руль, телеграф (например, ТНП, ТОП, ТКП).
4. Сигмоидальные функции широко используются в системах управления.
5. Обладают свойством гладкости и непрерывности.
6. Первая и вторая производные непрерывны.
7. Значения функции изменяются в диапазоне (0, 1).

Моделирование по натурным данным циркуляций различных судов выявило ряд недостатков модели (1). Традиционное для теории нечетких множеств задание угла наклона сигмоидальной функции в средней точке (для модели (1) — задание градиента кинематического параметра в ХТ), как следствие, позволяет точно воспроизводить изменение курса, скорости и вектора перемещений точки управления судна относительно грунта (угла дрейфа) только в окрестности ХТ (рис. 2). Моделирование вектора COG на начальном этапе поворота выявило сложность задания изменения градиента COG для воспроизведения движения кормы судна (вектора перемещений COG) в сторону, противоположную кладке руля. Поэтому предлагается рассмотреть совершенствование уравнений и способов задания градиентов кинематических параметров в модели (1).

Аппроксимация маневренных элементов уравнениями (1) показала целесообразность задания угла дрейфа сигмоидальной функцией, тогда вектор перемещений точки управления (COG) определяется суммой истинного курса и угла дрейфа. Исследование ходовых испытаний различных судов показало, что кинематические параметры принимают установившиеся значения в разные моменты времени (при прохождении разного расстояния, рис. 2), градиенты угла дрейфа и линейной скорости на установившемся периоде равны нулю, а градиент истинного курса отличен от нуля. Принимая во внимание вышесказанное, предлагается кинематические параметры судна на установившемся периоде циркуляции задавать следующим образом:

$$\alpha_i = \alpha_H + \frac{\Delta\alpha_k}{1 + \exp((S\alpha_{\text{ЭВЛ}} - S_i)\max(\nabla\alpha)/0,24)};$$

$$HDG_i =$$

$$= HDG_H + \frac{\Delta HDG_k}{1 + \exp((Sh_{\text{УСТ}} - S_i)\nabla HDG_{\text{УСТ}}/0,24)};$$

$$COG_i = HDG_i + \alpha_i;$$

$$SOG_i =$$

$$= SOG_H + \frac{\Delta SOG_k}{1 + \exp((Ss_{\text{ЭВЛ}} - S_i)\max(\nabla SOG)/0,24)}, \quad (2)$$

$$\nabla\alpha_{\text{УСТ}} = 0; \nabla SOG_{\text{УСТ}} = 0;$$

$$\max(\nabla\alpha) = \Delta\alpha_{\text{ЭВЛ}}/\Delta S_{\text{ЭВЛ}}; \nabla HDG_{\text{УСТ}} = \Delta HDG_{\text{УСТ}}/\Delta S_{\text{УСТ}};$$

$$\max(\nabla SOG) = \Delta SOG_{\text{ЭВЛ}}/\Delta S_{\text{ЭВЛ}}, \quad (3)$$

где α_i, α_H — текущее и начальное значения угла дрейфа, °; $\Delta\alpha_k$ — изменение угла дрейфа ((+) — поворот вправо, (-) — поворот влево), °; $Sh_{\text{УСТ}}, S\alpha_{\text{ЭВЛ}}, Ss_{\text{ЭВЛ}}$ — расстояние, пройденное от начальной точки до ХТ установившегося, эволюционного периодов циркуляции для соответствующих кинематических параметров, м; $\max(\nabla\alpha), \max(\nabla SOG)$ — максимальные значения градиентов α, SOG , соответственно °/м, узл/м; $\nabla\alpha_{\text{УСТ}}, \nabla HDG_{\text{УСТ}}, \nabla SOG_{\text{УСТ}}$ — градиенты α, HDG, SOG судна на установившемся периоде циркуляции, °/м, °/м, узл/м соответственно; $\Delta\alpha_{\text{ЭВЛ}},$

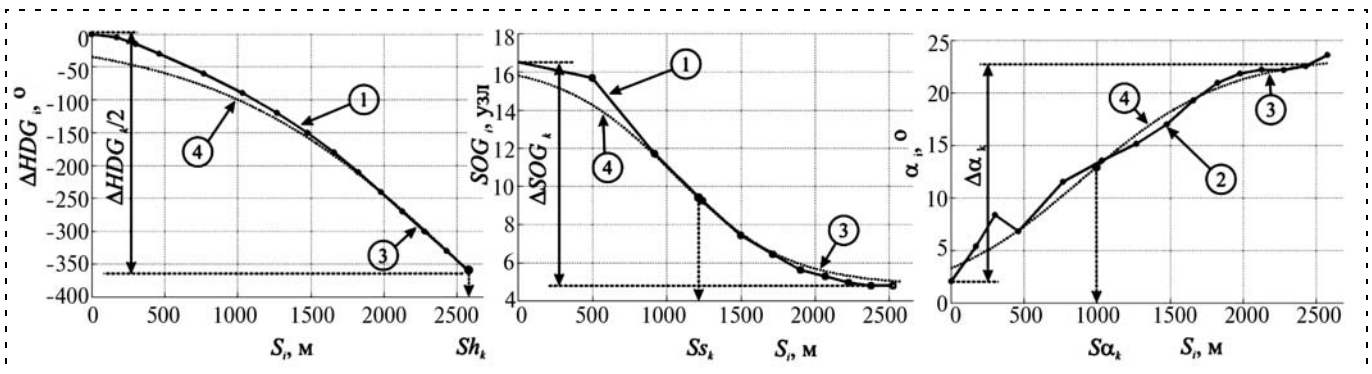


Рис. 2. Аппроксимация маневренных элементов при заданном угле кладки руля: 1 — экспериментальные данные; 2 — расчетные значения; 3 — установившийся период; 4 — модель

$\Delta SOG_{\text{ЭВЛ}}$ — разница в α , SOG между двумя точками эволюционного периода циркуляции при линейном изменении соответствующих параметров (в окрестности ХТ) °, узл соответственно; $\Delta S_{\text{ЭВЛ}}$, $\Delta S_{\text{уст}}$ — расстояния между двумя точками эволюционного, установившегося периодов циркуляции, м.

Для устранения недостатка модели (1), с учетом традиционного разделения циркуляции судна на периоды, предлагается градиенты кинематических параметров задавать в виде: постоянных значений (3) и функциональных изменений на эволюционном и маневренном периодах.

Проведенные эксперименты с использованием различных функциональных зависимостей показали целесообразность аппроксимации сигмоидальными функциями градиентов кинематических параметров на эволюционном периоде циркуляции:

$$\nabla \alpha_{\text{ЭВЛ}} = \frac{\max(\Delta \alpha_{\text{ЭВЛ}})}{1 + \exp((S \alpha_{\text{ЭВЛ}} - S_j) \nabla \nabla \alpha_{\text{ЭВЛ}} / 0,24)};$$

$$\nabla HDG_{\text{ЭВЛ}} = \frac{\nabla HDG_{\text{уст}}}{1 + \exp((Sh_{\text{ЭВЛ}} - S_j) \nabla \nabla HDG_{\text{ЭВЛ}} / 0,24)};$$

$$\nabla SOG_{\text{ЭВЛ}} = \frac{\max(\nabla SOG_{\text{ЭВЛ}})}{1 + \exp((Ss_{\text{ЭВЛ}} - S_j) \nabla \nabla SOG_{\text{ЭВЛ}} / 0,24)},$$

где $\nabla \alpha_{\text{ЭВЛ}}$, $\nabla HDG_{\text{ЭВЛ}}$, $\nabla SOG_{\text{ЭВЛ}}$ — градиенты α , HDG , SOG судна на эволюционном периоде циркуляции, °/м, °/м, узл/м соответственно; $S \alpha_{\text{ЭВЛ}}$, $Sh_{\text{ЭВЛ}}$, $Ss_{\text{ЭВЛ}}$ — расстояния от начальной точки маневра до ХТ эволюционного периода циркуляции соответствующих кинематических параметров α , HDG , SOG , м; $\nabla \nabla \alpha_{\text{ЭВЛ}}$, $\nabla \nabla HDG_{\text{ЭВЛ}}$, $\nabla \nabla SOG_{\text{ЭВЛ}}$ — скорости градиентов α , HDG , SOG судна на эволюционном периоде циркуляции, °/м², °/м², узл/м² соответственно.

Скорости изменения градиентов кинематических параметров на эволюционном периоде циркуляции, являющиеся аналогом ускорений соответствующих кинематических параметров, находятся из выражений

$$\begin{aligned} \nabla \nabla \alpha_{\text{ЭВЛ}} &= \Delta \nabla \alpha_{\text{ЭВЛ}} / \Delta S_{\text{ЭВЛ}}; \\ \nabla \nabla HDG_{\text{ЭВЛ}} &= \Delta \nabla HDG_{\text{ЭВЛ}} / \Delta S_{\text{ЭВЛ}}; \\ \nabla \nabla SOG_{\text{ЭВЛ}} &= \Delta \nabla SOG_{\text{ЭВЛ}} / \Delta S_{\text{ЭВЛ}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Delta \nabla \alpha_{\text{ЭВЛ}}$, $\Delta \nabla HDG_{\text{ЭВЛ}}$, $\Delta \nabla SOG_{\text{ЭВЛ}}$ — разница градиентов α , HDG , SOG судна между двумя точками эволюционного периода циркуляции при линейном изменении соответствующих параметров, °/м, °/м, узл/м соответственно.

Результаты численного моделирования типового эксперимента представлены на рис. 3.

Дальнейшее уточнение модели (2) выполняется аналогично (4), (5) подстановкой градиентов кинематических параметров на маневренном периоде циркуляции:

$$\nabla \alpha_{\text{ман}} = \frac{\max(\Delta \alpha_{\text{ман}})}{1 + \exp((S \alpha_{\text{ман}} - S_j) \nabla \nabla \alpha_{\text{ман}} / 0,24)};$$

$$\nabla HDG_{\text{ман}} = \frac{\max(\nabla HDG_{\text{ман}})}{1 + \exp((Sh_{\text{ман}} - S_j) \nabla \nabla HDG_{\text{ман}} / 0,24)};$$

$$\nabla SOG_{\text{ман}} = \frac{\max(\nabla SOG_{\text{ман}})}{1 + \exp((Ss_{\text{ман}} - S_j) \nabla \nabla SOG_{\text{ман}} / 0,24)};$$

$$\begin{aligned} \nabla \nabla \alpha_{\text{ман}} &= \Delta \nabla \alpha_{\text{ман}} / \Delta S_{\text{ман}}; \\ \nabla \nabla HDG_{\text{ман}} &= \Delta \nabla HDG_{\text{ман}} / \Delta S_{\text{ман}}; \\ \nabla \nabla SOG_{\text{ман}} &= \Delta \nabla SOG_{\text{ман}} / \Delta S_{\text{ман}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\max(\nabla \alpha_{\text{ман}})$, $\max(\nabla HDG_{\text{ман}})$, $\max(\nabla SOG_{\text{ман}})$ — максимальные значения градиентов α , HDG , SOG судна на маневренном периоде циркуляции, °/м, °/м, узл/м соответственно; $S \alpha_{\text{ман}}$, $Sh_{\text{ман}}$, $Ss_{\text{ман}}$ — расстояния от начальной точки маневра до ХТ маневренного периода циркуляции для соответствующих кинематических параметров α , HDG , SOG , м; $\nabla \nabla \alpha_{\text{ман}}$, $\nabla \nabla HDG_{\text{ман}}$, $\nabla \nabla SOG_{\text{ман}}$ — скорости градиентов α , HDG , SOG судна между двумя точками маневренного периода циркуляции при линейном изменении соответствующих параметров, °/м², °/м², узл/м² соответственно; $\Delta \nabla \alpha_{\text{ман}}$, $\Delta \nabla HDG_{\text{ман}}$, $\Delta \nabla SOG_{\text{ман}}$ — разница градиентов α , HDG , SOG судна на маневренном периоде циркуляции, °/м, °/м, узл/м соответственно; $\Delta S_{\text{ман}}$ — расстояние между двумя ХТ маневренного периода циркуляции, м.

Результаты численного моделирования типового эксперимента приведены на рис. 4.

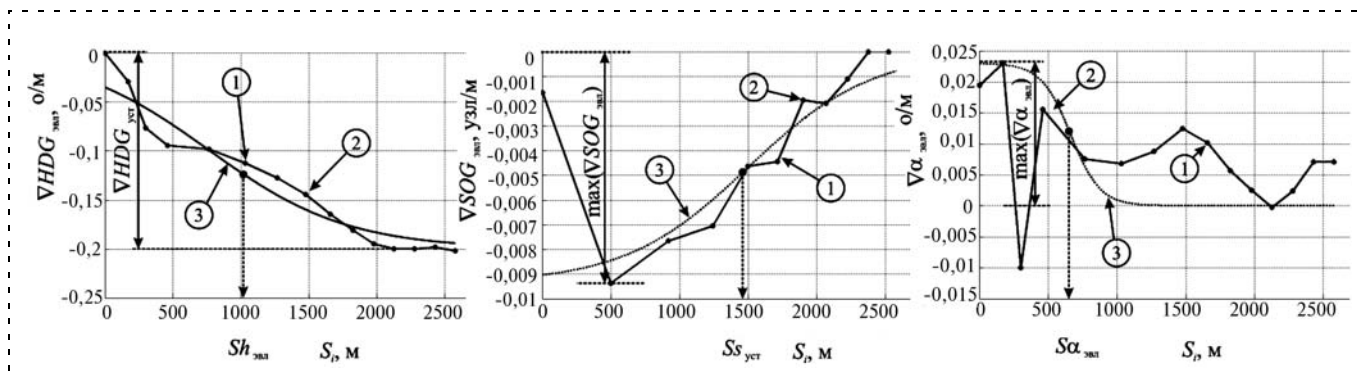


Рис. 3. Градиенты кинематических параметров на эволюционном периоде: 1 — расчетные значения; 2 — эволюционный период; 3 — модель

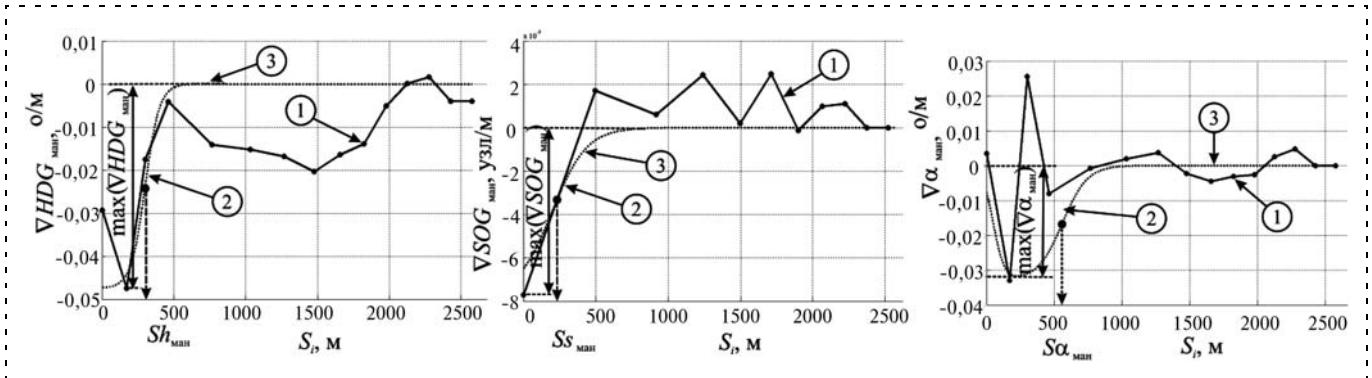


Рис. 4. Скорости градиентов кинематических параметров на маневренном периоде: 1 — расчетные значения; 2 — маневренный период; 3 — модель

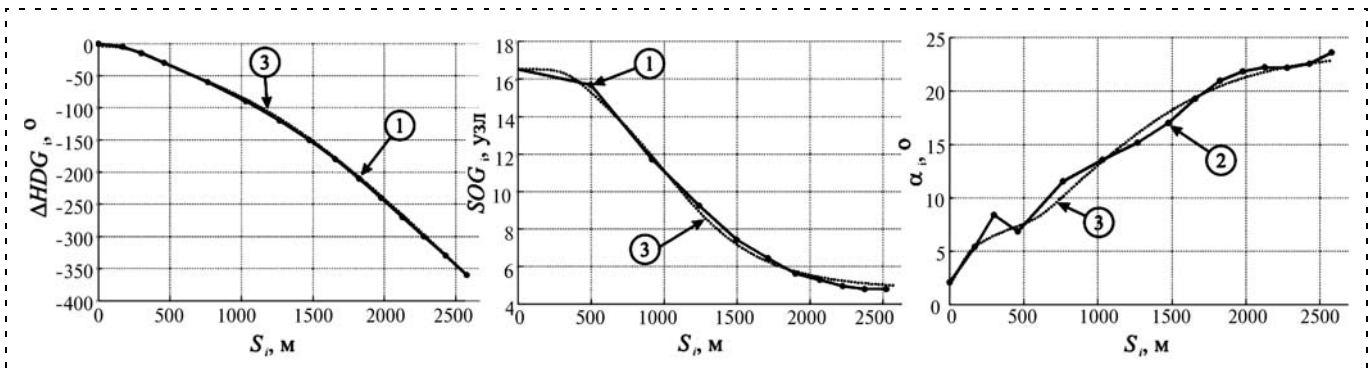


Рис. 5. Аппроксимация кинематических параметров уравнением (8): 1 — экспериментальные данные; 2 — расчетные значения; 3 — модель

Окончательно, уравнения, функционально задающие кинематические параметры при выполнении судном циркуляции, имеют следующий вид:

$$\alpha_i = \alpha_H + \frac{\Delta\alpha_k}{1 + \exp((S\alpha_k - S_i)(\max(\nabla\alpha)/0,24 + \nabla\alpha_{\text{эвл}} + \nabla\alpha_{\text{ман}}))};$$

$$HDG_i = HDG_H + \frac{\Delta HDG_k}{1 + \exp((Sh_k - S_i)(\nabla HDG_{\text{уст}}/0,24 + \nabla HDG_{\text{эвл}} + \nabla HDG_{\text{ман}}))};$$

$$SOG_i = SOG_H + \frac{\Delta SOG_k}{1 + \exp((Ss_k - S_i)(\max(\nabla SOG)/0,24 + \nabla SOG_{\text{эвл}} + \nabla SOG_{\text{ман}}))};$$

$$COG_i = HDG_i + \alpha_i. \quad (8)$$

Результаты численного моделирования, в сравнении с типовым экспериментом, приведены на рис. 5, а траектория судна (позиции наблюдателя) воспроизведена на рис. 6.

Моделирование показало, что подстановка в модель (2) уравнений (3)–(7), учитывающих функциональные изменения градиентов соответствующих кинематических параметров, позволяет достаточно точно воспроизводить циркуляцию судна, следовательно, уравнения (8) можно использовать для описания циркуляции судна.

Задавая коэффициенты модели (8) для любых кладок руля, можно сформировать любую криволинейную траекторию судна и область допустимых (крайних, экстремальных) траекторий. В общем виде типовая криволинейная траектория задается ступенчатыми кладками руля. При выходе судна к ТНП руль переключается на заданный угол

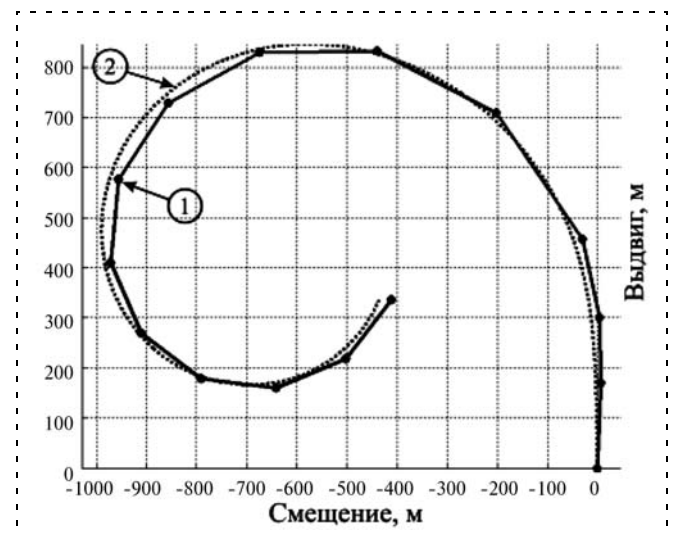


Рис. 6. Экспериментальная и модельная траектории судна на циркуляции: 1 — экспериментальные данные; 2 — модель (COGi)

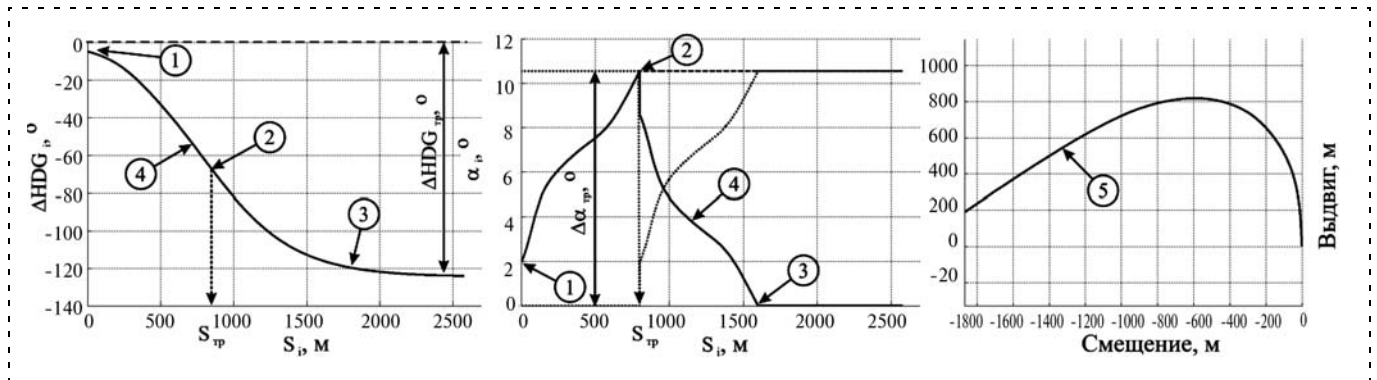


Рис. 7. Результаты численного моделирования поворота судна уравнением (9): 1 – ТНП; 2 – ТОП; 3 – ТКП; 4 – модель; 5 – модель траектории (COG_i)

в сторону поворота, при достижении заданного градиента истинного курса (выход в ТОП) руль переключается в противоположную сторону, а при выходе судна на заданный курс в ТКП руль переводится в диаметральной плоскости. Тогда для построения криволинейной траектории достаточно рассмотреть в модели (8) уравнения HDG и α , задающие COG . Режим изменения HDG определяется подстановкой в уравнение (8) требуемого изменения истинного курса $\Delta HDG_{Тр}$ вместо ΔHDG_k , заме-

ной Sh_k на $S_{Тр}$ (требуемое расстояние, соответствующее Sh_k в ТОП) и подстановкой $\nabla HDG_{Тр}$ (угла наклона, соответствующего касательной уравнения HDG в ТОП). Характер изменения угла дрейфа определяется разницей уравнений (8) по углу дрейфа α , при этом уменьшаемое задается частью кривой α от ТНП до ТОП ($\alpha_{Тр}$ — угол дрейфа в точке ТОП), а вычитаемое — симметричная кривая, смещенная на расстояние $S_{Тр}$ (расстояние, проходимое судном от ТНП до ТОП):

$$\alpha_i = \alpha_H + \min\left(\Delta\alpha_{Тр}, \frac{\Delta\alpha_k}{1 + \exp((S\alpha_k - S_i)(\max(\nabla\alpha)/0,24 + \nabla\alpha_{Эвл} + \nabla\alpha_{Ман}))}\right) - \min\left(\Delta\alpha_{Тр}, \frac{\Delta\alpha_k}{1 + \exp((S\alpha_k + S_{Тр} - S_i)(\max(\nabla\alpha)/0,24 + \nabla\alpha_{Эвл} + \nabla\alpha_{Ман}))}\right); \quad (9)$$

$$HDG_i = HDG_H + \frac{\Delta HDG_{Тр}}{1 + \exp((S_{Тр} - S_i)(\nabla HDG_{Тр}/0,24 + \nabla HDG_{Эвл} + \nabla HDG_{Ман}))};$$

$$COG_i = HDG_i + \alpha_i.$$

Результаты численного моделирования уравнения (9) приведены на рис. 7.

Дальнейшее совершенствование модели состоит в определении коэффициентов уравнения (8) для различных углов кладки руля, учете влияния гидрографических, гидрометеорологических, навигационных факторов, программировании режимов маневрирования судна в пределах допустимой (гарантированной) полосы. Это позволит при использовании модели в ECDIS:

1. Выполнить построение модели судна по данным ходовых испытаний, дополнение и совершенствование в процессе эксплуатации судна.

2. Упростить решение обратной задачи — построение программной траектории и режимов изменения кинематических параметров при следовании по заданной траектории, в том числе криволинейной.

3. Задавать не только криволинейную линию пути, но и полосы допустимых маневров судна на криволинейных участках траектории.

4. Формализовать знания экспертов (лоцманов, капитанов) о маневрировании в стесненных водах с учетом информации о действующих гидрографических, гидрометеорологических факторах, текущей навигационной обстановке.

Кроме того модель может найти применение при построении интеллектуального интерфейса судоводителя, в обучающих тренажерных комплексах.

Список литературы

1. Баранов Ю. К., Гаврюк М. И., Логиновский В. А., Песков Ю. А. Навигация. СПб: Лань, 1997. 510 с.
2. Дмитриев В. И., Григорян В. Л., Катенин В. А. Навигация и лоция / Под ред. В. И. Дмитриева. М.: ИКЦ "Академкнига", 2004. 471 с.
3. Драчев В. Н. Учет циркуляции при плавании в стесненных районах. Владивосток: Изд. Мор. гос. университета, 2008. 97 с.
4. Михайлов В. С., Кудрявцев В. Г. Навигация и лоция. Киев: КГАВТ, 2006. 638 с.
5. Песков Ю. А. Практическое пособие по использованию САПП. М.: Транспорт, 1995. 224 с.

6. Таратынов В. П. Судовождение в стесненных районах. М.: Транспорт, 1980. 128 с.

7. Larry Wilson. Cruise ship piloting / Seaways. 2005, January. P. 14–15.

8. Кацман Ф. М., Ершов А. Судоводителю о маневренных характеристиках судна. СПб.: Изд. ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2001. 60 с.

9. Лихачев А. В. Управление судном. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. 504 с.

10. Снопков В. И. Управление судном. СПб.: АНО НПО "Профессионал", 2004. 536 с.

11. American Practical Navigator. An Epitome of Navigation. Originally by Nathaniel Bowditch, LL.D. 1984 Edition. Pub. N 9. V. I. Published by the Defence mapping agency Hydrographic/Topographic center.

12. Вагущенко Л. Л., Цымбал Н. Н. Системы автоматического управления движением судна. Одесса: Латстар, 2002. 310 с.

13. Васьков А. С. Методы управления движением судна и конфигурацией зоны навигационной безопасности. Новороссийск: НГМА, 1997. 248 с.

14. Васьков В. А., Мироненко А. А. Формализация знаний о допустимых маневрах подхода судов к причалу // Эксплуатация морского транспорта. 2011. Вып. № 2 (64). С. 36–40.

15. Макаров С. О. Рассуждения по вопросам морской тактики. М.: Военно-морское изд-во НКВМФ Союза ССР, 1943. 516 с.

16. Лобастов В. М. Электронная картографическая система "dKartNavigator". Владивосток: МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2004. 80 с.

17. URL: <http://www.consilium.se/files/fire-detection-marine/Consilium-ECDIS.pdf>

18. URL: <http://www.kelvinhughes.com/upload/pdf/brochures/ecdis.pdf>

19. URL: <http://www.lilleyandgillie.co.uk/landg/pdf/navmaster/PC%2520Maritime%2520ECDIS.pdf>

20. URL: <http://www.sam-electronics.de/dateien/navigation/broschueren/3.047.pdf>

21. Веремей Е. И., Корчанов В. М., Коровкин М. В., Погожев С. В. Компьютерное моделирование систем управления движением морских подвижных объектов. СПб.: Изд. НИИ Химии СПбГУ, 2002. 370 с.

УДК 551.46.077:629.584

А. Н. Севрюк, мл. науч. сотр.,
sevryuk@marine.febras.ru,

Институт проблем морских технологий
Дальневосточного отделения
Российской академии наук

Метод оптимизации кластерного анализа для решения задач локализации подводных объектов

Описан метод автоматического выделения (локализации) объектов на изображениях, получаемых системой технического зрения АНПА во время работы. Метод основан на топологическом анализе измеримых величин и позволяет в реальном масштабе времени выполнять построение многомерных кластеров. Метод применяется для выделения пространственных неоднородностей параметров, измеряемых АНПА (электропроводности, температуры и т. п.). В работе приводятся примеры применения метода для выявления обособленных объектов на фото и ГБО-изображениях.

Ключевые слова: кластерный анализ, сегментация, системы реального времени, автономные подводные роботы

Введение

При исследовании дна подводным роботом большую роль играет возможность обнаружения объектов внешней среды, имеющих определенный потенциал для исследования. Такими объектами (объектами локализации) могут быть крупные элементы рельефа, скопления гидробионта, аномалии физических полей, искусственные объекты, данные о которых могут быть получены от системы технического зрения подводного аппарата. Выявленные объекты, положение которых предполагается статичным, могут быть использованы в каче-

стве ориентиров либо как объекты для отдельных исследований.

Задача обнаружения потенциально интересных объектов для исследований состоит из двух подзадач: обнаружение измерительных аномалий (локализации) и их идентификация. Описанные задачи решаются последовательно, изначально на множестве измерений определяются устойчивые группы, которые в соответствии с критериями соотносятся с классами. В подводной робототехнике применение данного подхода позволяет значительно упростить поиск миноподобных объектов, ведение учета популяций и ряд других задач, связанных с мониторингом акваторий. Данная статья посвящена вопросам оптимизации процесса локализации измерительных аномалий по скорости обработки данных, так как скорость обработки данных является базовым показателем эффективности при обнаружении объектов, при этом скорость локализации определяет актуальность использования идентификации отдельных объектов и классификации выделенных объектов на борту автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) в режиме реального времени.

Определяя совокупность измерений, которая может содержать информацию об исследуемых объектах в виде изображения, и рассматривая процесс выделения объектов подобных изображений, следует отметить, что в зависимости от вида изображения и области применения результатов этот процесс может называться сегментацией, локализацией или кластеризацией (кластерным анализом). Далее в тексте в основном будет использоваться термин "кластерный анализ", который обладает более широким контекстом

Кластерный анализ [1] преимущественно используется как инструмент предварительной обработки информации, позволяющий разбить общую совокупность данных на группы, пригодные для

дальнейшего анализа. В подводной робототехнике кластерный анализ применим в задачах выявления объектов фото- и ГБО-изображений*, очагов физических полей (объекты на фотоснимках и ГБО-изображениях, участки магнитных аномалий и очаги солености). Кластерный анализ позволяет анализировать измерения разной степени топологической размерности, что дает возможность использовать его в качестве универсального метода локализации объектов разной природы.

1. Некоторые методы кластерного анализа

При решении задачи локализации в условиях жесткого реального времени, при выделении объектов изображений важно, чтобы этот процесс обладал наименьшей комбинаторной сложностью.

Среди множества методов кластеризации (сегментации) наиболее простыми являются следующие:

- *метод k средних* — разновидность центроидного метода кластерного анализа [1]. Принцип формирования кластеров следующий: среди исследуемого множества материальных точек выбирается k точек, которые считаются центрами кластеризации. Для всех остальных точек проводится сравнение с каждым из центров, после чего наиболее близкая точка и центр объединяются. Таким образом, для k центров и n точек выполняется $\Phi(n, k)$ операций:

$$\Phi(n, k) = k(n - k); \quad (1)$$

- *метод накопления (сдвига) средних*. Аналогичен предыдущему методу, однако центры кластеризации накапливаются постепенно и организуются из точек, лежащих далее заданного расстояния от уже существующих. Первым центром кластеризации становится произвольно взятая точка исследуемой области. Число операций для данного метода p в случае образования k кластеров в области из n точек определяется условием

$$n \leq p \leq \Phi(n, k). \quad (2)$$

Таким образом, настоящий метод можно считать самым быстрым из приведенных. В англоязычной литературе описанный метод называется "mean shift"[6].

2. Локализация объектов на больших изображениях

Препятствием на пути использования методов кластерного анализа в системах реального времени является большой объем исходных данных, который значительно увеличивает комбинаторную сложность кластеризации. Рассмотрим описанные сложности и пути их решения на примере ГБО- и фотоизображений, полученных с использованием АНПА ИПМТ ДВО РАН. Рассматриваемые ГБО-изобра-

* ГБО — гидролокатор бокового обзора.

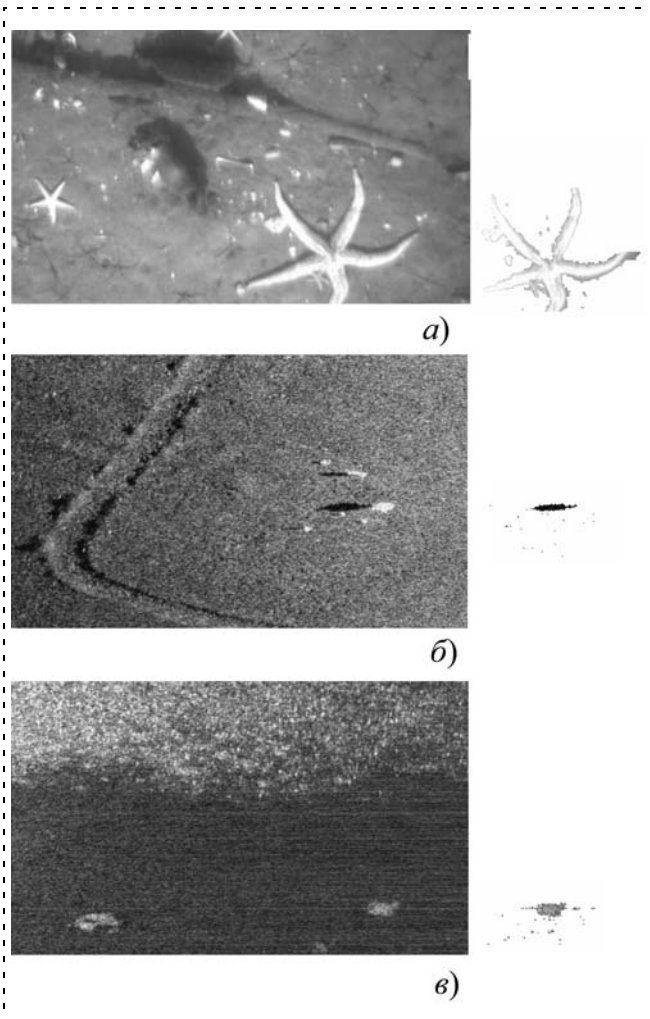


Рис. 1. Фрагменты оригинальных ГБО- и фотоизображений и эталонных сегментов:

a — фрагмент фотоизображения; *б* — фрагмент ГБО-изображения с низким уровнем шума; *в* — фрагмент ГБО-изображения с высоким уровнем шума

жения являются полутоновыми (256 оттенков) рисунками в формате BMP (рис. 1), которые могут содержать от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов точек. Размер фотоизображений составляет 768 на 576 точек при аналогичной цветовой градации. С учетом реальных условий функционирования АНПА решение описанных задач не может быть выполнено корректно по времени при прямом использовании методов по причинам большого объема исходных данных.

В условиях задачи локализации объектов проблема избыточности исходных данных может быть решена с помощью спектральной фильтрации, градиентного анализа и построения первичных кластеров.

Составление объективной оценки локализации объектов с использованием приведенных методов возможно при выполнении:

- 1) качественной оценки алгоритмом сегментации (кластеризации) оригиналов изображений без

фильтрации и иной предварительной обработки, получение эталонных сегментов;

2) оценки качества и скорости сегментации путем сравнения эталонных кластеров и сегментов, полученных в результате предварительной обработки оригинальных изображений.

Локализацию можно будет считать эффективной, если алгоритм кластеризации (сегментации) обеспечит приемлемое качество, а использование методов устранения избыточности исходных данных изображения значительно ускорит процесс выделения объектов, значительно уменьшив ресурсную емкость задачи, при этом сохранится качество сегментации.

В качестве примеров использовали фрагменты ГБО- и фотоизображений размером 440×260 точек. В качестве инструмента локализации был выбран метод накопления средних. Выбор обусловлен следующими причинами:

- данный метод является одним из самых эффективных способов кластеризации и имеет простой механизм управления стагнацией числа кластеров и итераций;
- является "any time" алгоритмом, результат которого можно оценить на каждом шаге работы.

Результаты кластеризации при построении эталонных кластеров показаны на рис. 1. Рассмотрим методы устранения избыточности данных более подробно.

2.1. Методы спектральной фильтрации

Спектральная фильтрация [7, 8] рассматривает совокупность данных в виде ансамбля волн определенной частоты. Выбирая волны определенного спектра из преобразованной зависимости, в результате обратного преобразования можно получить искомую зависимость. Так, при выборе соответствующего окна спектра можно выделить контур изображения или сгладить шумы (рис. 2).

Оценить результат фильтрации контура можно, используя пороговый критерий. На рис. 3–5 изобра-

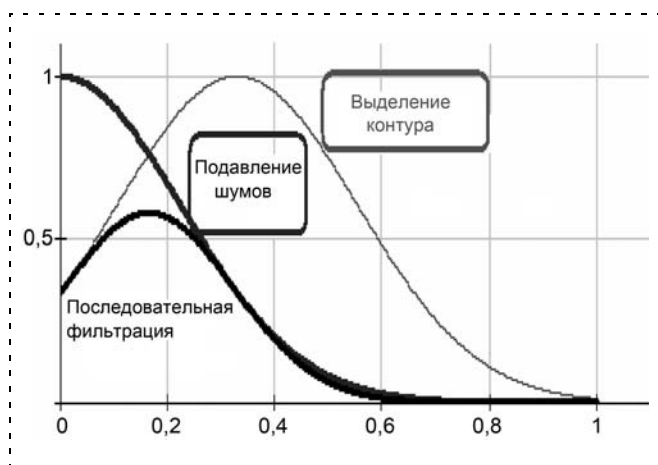


Рис. 2. Виды спектральных окон

жены результаты фильтрации и обработка результата фильтрации пороговым фильтром. Результаты моделирования показывают, что эффективность спектральной фильтрации контуров изображений с сильным уровнем шума может быть повышена, если использовать последовательную фильтрацию (см. рис. 2), при которой сначала выполняется сглаживание, а затем выделяется контур. Для изображений с низким уровнем шума последовательная фильтрация нецелесообразна, поскольку уменьшает эффективность устранения избыточности, приводя к росту соотношения контур/фон (рис. 5).

К недостаткам спектральной фильтрации следует относить высокую вычислительную емкость волнового преобразования (как прямого, так и обратного); недостаточную чувствительность к выделению низкоконтрастных переходов. Плюсами спектральной фильтрации являются универсальность (метод одинаково работает при анализе как одномерных, так и многомерных изображений), возможность варьировать функцию спектрального окна в зависимости от задачи.

Качественная оценка преобразований в целом удовлетворительная, поскольку кластеры, полученные из изображения, прошедшего спектральную обработку, идентичны эталонным сегментам, приведенным на рис. 1. Однако комбинаторная эффективность преобразований достаточно низка (табл. 1). В данном случае эффективность преобразований определяется изменением числа операций по получению сегментов при использовании дополнительной обработки данных.

Эффективность выражается в процентах. Положительное значение эффективности свидетельствует о том, что число операций по построению кластеров было уменьшено на указанное число процентов. Отрицательное значение указывает на рост числа операций. Из табл. 1 видно, что для каждого из приведенных изображений число операций по обработке данных значительно возрастает. Рост числа операций происходит на нижней границе оценки числа операций выбранного метода. Несмотря на значительное устранение избыточности данных, которая может превосходить 97 % ($1 - \{\text{доля контура} = [\text{число точек границ объектов}] / [\text{число точек изображения}]\}$), общее число операций возрастает, поскольку число операций по выделению контура достаточно велико.

В приведенных примерах сложность фильтрации составляет 409 888 операций при 114 400 точках исходного изображения.

Высокое значение комбинаторной эффективности на верхней границе оценки кластеризации обуславливается рекурсивной составляющей алгоритма, в соответствии с которой каждое последующее измерение сопоставляется с уже накопленными кластерами. Таким образом, чем больше кластеров может быть выявлено в изображении, тем более оправдано использование фильтрации.

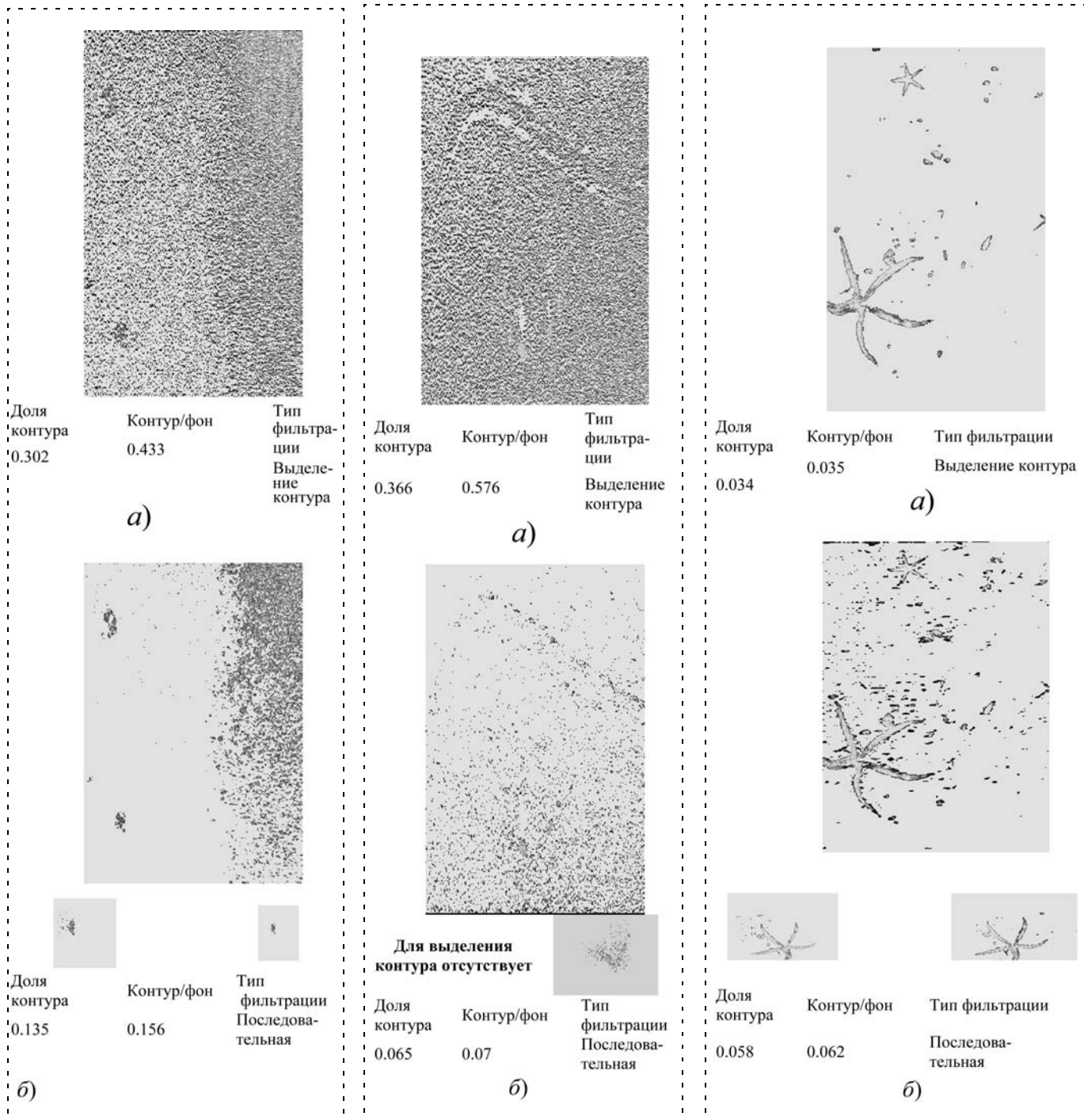


Рис. 3. Спектральная обработка зашумленного ГБО-изображения

Рис. 4. Спектральная обработка незашумленного ГБО-изображения

Рис. 5. Спектральная обработка фотоизображения

Таблица 1

Анализ эффективности спектральной фильтрации

Фрагмент изображения	Доля контура	Число операций без фильтрации		Число операций с учетом фильтрации		Эффективность	
		Минимум	Максимум	Минимум	Максимум	Минимум	Максимум
Рис. 3, б	0,302	114400	3431100	34548	1035540	-288,49 %	64,49 %
Рис. 3, а	0,135	114400	3431100	15444	462420	-271,79 %	81,20 %
Рис. 4, б	0,366	114400	3431100	41870	1255200	-294,89 %	59,23 %
Рис. 4, а	0,065	114400	3431100	7436	222180	-264,79 %	89,35 %
Рис. 5, б	0,034	114400	3431100	3889	115770	-261,69 %	75,54 %
Рис. 5, а	0,058	114400	3431100	6635	198150	-264,09 %	73,13 %

2.2. Градиентный анализ

Методы градиентного анализа рассматривают совокупность данных как поверхность некоторого евклидового пространства, рассматривая вектор изменения поверхности и определяя скорость его возрастания (модуль градиента).

Как и спектральная фильтрация, данная группа методов позволяет выделить границы объекта в исследуемой области и использовать в дальнейшем анализе только те точки, которые принадлежат границам объектов.

Численные методы градиентного анализа чувствительны к шумам, по этой причине исходное изо-

бражение должно быть отфильтровано. Проведя обработку фрагментов изображений на основе преобразования Собела [4] с использованием оператора Шара [5], получим результат, показанный на рис. 6. Из рис. 6 следует, что предварительная фильтрация эффективна в случаях средней степени зашумленности (рис. 6, б). В случаях, когда изображение сильно зашумлено или имеет четкие границы (рис. 6, а, в), предварительная фильтрация не оказывает существенного влияния на результат. Поиск границ объектов на изображениях тем эффективней, чем более четко исходное изображение (табл. 2).

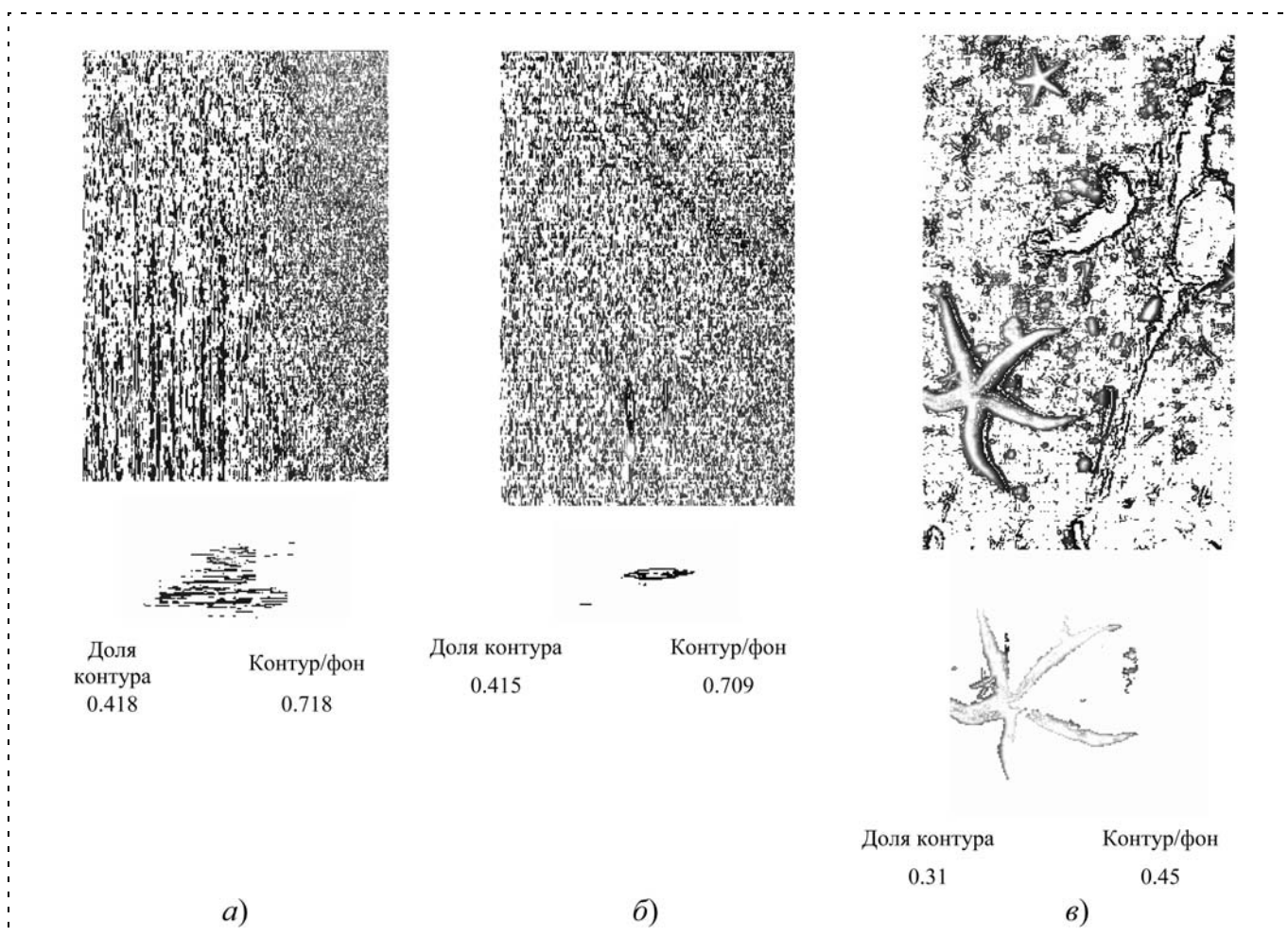


Рис. 6. Градиентная фильтрация фрагментов изображений: а — ГБО с высоким уровнем шума; б — ГБО с низким уровнем шума; в — фотоизображение

Таблица 2

Анализ эффективности градиентной фильтрации

Фрагмент изображения	Число операций без фильтрации		Число операций с учетом фильтрации		Сложность фильтрации	Эффективность	
	Минимум	Максимум	Минимум	Максимум		Минимум	Максимум
Рис. 6, а	114400	3431100	47819	3199384	343200	-241,80 %	53,75 %
Рис. 6, б	114400	3431100	47476	4028235	343200	-241,50 %	55,01 %
Рис. 6, в	114400	3431100	35464	602599	343200	-231,00 %	51,36 %

К сложностям градиентного анализа следует отнести:

- *необходимость синтеза целевой функции*, для которой рассчитывается модуль градиента. Так, например, для фото-, видео- и ГБО-изображений целевой функцией является яркость точки, причем существенными для анализа параметрами являются координаты на канве и яркость точки без учета, например, времени при анализе видеопотока. Если изображение будет иметь большую размерность и/или учитывать большее число параметров, то выбор целевой функции превратится в нетривиальную задачу, которая потребует разработки специальной методики для преобразования пространства признаков. Простым примером такого преобразования может служить градиентный анализ цветного изображения, где поиск границ объекта происходит по каждому из компонентов цвета с последующим усреднением результата, либо анализируется изображение, приведенное к полутоновому;
- *отсутствие готовых численных решений для многомерных пространств*. Данное обстоятельство является следствием приведенного выше. Поскольку анализ фото- и видеоизображений — распространенная техническая задача, для которой однозначно определены целевая функция и метод преобразования пространства признаков, для них существуют численные решения, которые в большинстве случаев эффективны (метод Собела, метод Кани и др.). Для анализа изображений большей размерности (например, полей солёности) либо потребуется решающее правило, позволяющее приводить задачу к существующим методам решения, либо будет необходима разработка нового численного метода. Также следует отметить экспоненциальную сложность вывода аналитических зависимостей при численном дифференцировании многомерных функций.

Качество построения эталонных кластеров можно считать приемлемым. Особенно близки к эталонным кластеры, полученные в результате обработки фотоизображения.

Следует отметить более высокую комбинаторную эффективность градиентной фильтрации по сравнению со спектральной благодаря более низкой сложности фильтрации. Однако комбинаторную эффективность градиентной фильтрации также

нельзя считать достаточной для оптимального решения задачи локализации.

2.3. Метод топологического анализа измеряемых величин

Альтернативой приведенным методам является *метод предварительного формирования кластеров*. Метод топологического анализа измеряемых величин основан на следующих предположениях:

- объекты (отображаемые на ГБО или в ином пространственно-параметрическом контексте) имеют размер более одной точки и образуют группы точек в некоторой области пространства;
- для каждой группы евклидово расстояние между точками в группе меньше, чем аналогичное между точками из соседних групп.

Суть предварительного формирования кластеров состоит в том, что точки, лежащие в определенной области пространства (подпространство точек), сопоставляются с отдельным кластером.

Подпространства формируются с использованием многомерной нерегулярной сетки, число ячеек которой определяется числом интервалов на каждой из осей базиса. Отличие приведенной системы исчисления от равномерной состоит в том, что эквивалент (номер ячейки) складывается из значений разрядов разной мощности, т. е. число единиц разрядов может быть задано произвольно.

Точки приписываются кластеру, если их компоненты лежат в границах диапазона ячейки. Номер ячейки вычисляется из компонентов точки, что позволяет построить множество предварительных кластеров за один проход по множеству точек исследуемой области. Сеточное разбиение не оказывает существенного влияния на характеристики методов кластеризации, но существенно уменьшает ресурсную емкость их реализации. Используя сетки разного разрешения, можно варьировать точность кластеризации на первом шаге кластеризации, получая более детализированное (четкое) изображение при большем разрешении. При неизменном значении порога объединения кластеров и числе итераций результат кластеризации не зависит от шага сетки, однако стагнация числа кластеров при меньшем разрешении наступает быстрее. В табл. 3 приведены анализы эффективности сеточного разбиения для разрешения, заданного вектором $v = \{30, 40, 10\}$. Результаты кластеризации оригиналов изображений

Таблица 3

Анализ эффективности сеточного разбиения

Фрагмент изображения	Число операций без фильтрации		Число операций с учетом фильтрации		Эффективность	
	Минимум	Максимум	Минимум	Минимум	Минимум	Максимум
Рис. 7, а	114400	7660311	6069	402134	94,69 %	94,75 %
Рис. 7, б	114400	9716775	6977	585820	93,90 %	93,97 %
Рис. 7, в	114400	1944511	2920	49351	97,45 %	97,46 %

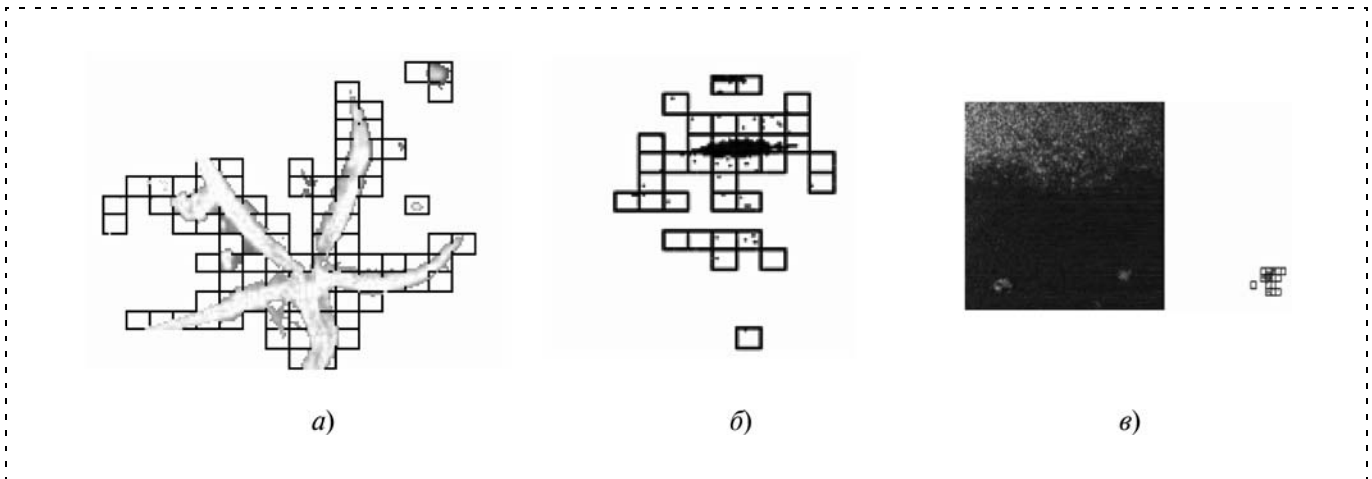


Рис. 7. Эталонные сегменты ГБО- и фотоизображений при сеточном разбиении:

a — фрагмент фотоизображения; *б* — фрагмент ГБО-изображения с низким уровнем шума; *в* — фрагмент ГБО-изображения с высоким уровнем шума

показаны на рис. 7. Сегменты, выделенные на изображениях с использованием сеточного разбиения, практически идентичны эталонным (см. рис. 1 и рис. 7). Однако в отличие от оригинальных они сформированы не из отдельных точек, а из ячеек сетки, границы которых показаны на рис. 7 линиями.

Число этих ячеек гораздо меньше не только числа точек выделяемых объектов, но и числа точек, входящих в их границы. Именно это соотношение обеспечивает высокую комбинаторную эффективность.

Сравнивая эффективность сеточного разбиения и приведенных выше методов, позволяющих уменьшить объем исходных данных, следует обратить внимание на следующие его преимущества:

- *скорость вычислений* для градиентных или спектральных методов. При обработке изображения будут нужны преобразования, сложность которых будет превосходить один полный перебор всех точек исследуемой области. В свою очередь, скорость построения первичных кластеров не зависит от шага сетки (числа ячеек), поскольку преобразуется только соответствующая точке ячейка, и число преобразований зависит только от числа измерений и не превысит одного полного перебора точек изображения. Общая эффективность сеточного разбиения при уменьшении объема исходных данных также намного выше и может превышать 90 %;
- *отсутствие потерь информации*. Рис. 3—6 наглядно иллюстрируют, что при градиентной или спектральной фильтрации некоторые объекты изображений могут быть утрачены из-за низкой чувствительности фильтров. При сеточном разбиении ни одно измерение исследуемой области не будет утрачено, при этом для одного и того же изображения можно использовать несколько сеток разного разрешения.
- *универсальность метода при анализе объектов разной размерности* позволяет без изменения ха-

рактера преобразований и снижения скорости их выполнения проводить первичную классификацию разнородных объектов (в том числе физических и химических полей), расширяя область применения метода;

- *инвариантность метода к порядку поступления исходных данных* позволяет использовать при кластеризации неполную информацию об объекте, которая может быть при необходимости уточнена. Например, при анализе ГБО-изображений путевая дальность (строки изображения) накапливаются в процессе работы АНПА. Более того, данная инвариантность позволяет отнести указанный метод к классу "any-time" алгоритмов, результаты которых формируются итерационно, а результат можно наблюдать на каждом шаге алгоритма.

К сложностям метода следует отнести выбор разрешающей способности сетки при построении первичных кластеров, поскольку при выборе слишком большого шага сетки мелкие элементы изображений (артефакты) могут быть поглощены крупными кластерами и не выделены в самостоятельные объекты. Использование же слишком малого разрешения приведет к снижению комбинаторной эффективности.

Заключение

Резюмируя сказанное, следует отметить, что благодаря своей комбинаторной эффективности, информативности и универсальности метод предварительного формирования кластеров является наиболее предпочтительным методом предварительной обработки данных при выделении объектов на изображениях независимо от конкретного метода кластеризации. Указанный метод реализован в составе системы сегментации изображений, применяемой на АНПА ИПМТ ДВО РАН.

Список литературы

1. **Олдендерфер М. С., Блэшфилд Р. К.** Кластерный анализ / Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: Пер. с англ. / Под. ред. И. С. Енюкова. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
2. **Parker J. R.** Algorithms for Image Processing and Computer Vision. John Wiley & Sons Inc, NY, USA, 1996.
3. **Farid H., Simoncelli E. P.** Differentiation of discrete multi-dimensional signals // IEEE Trans Image Processing. 2004. V. 13 (4). P. 496—508.
4. **Ciany Ch. M., Zurawski W. C., Dobeck G. J., Weilert D. R.** Real-Time Performance of Fusion Algorithms for Computer Aided Detection and Classification of Bottom Mines in the Littoral Environment. OCEANS'03. 2003. P. 1119—1125.
5. **Павин А. М.** Распознавание кабельных линий на гидроакустическом изображении // Матер. 3-й Всеросс. науч.-техн. конф. "Технические проблемы освоения мирового океана", Владивосток, 22—25 сентября 2009 г.
6. **Cheng Yizong.** Mean Shift, Mode Seeking, and Clustering // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (August 1995). (IEEE) 17 (8): 790—799. doi:10.1109/34.400568

УДК 621.396.988.6:629.19;

С. В. Игнатъев, научн. сотр.,

А. П. Степанов, инж. 1 кат.,

П. П. Завьялов, инж. 1 кат.,

И. Ю. Винокуров, инж. 2 кат.,

office@eprib.ru,

ОАО "Концерн "ЦНИИ

"Электроприбор", г. Санкт-Петербург

Синтез алгоритма управления модуляционным вращением измерительного блока инерциально-спутниковой системы

Рассматривается задача оценивания погрешностей измерительного модуля интегрированной системы ориентации и навигации (ИСОН), снабженного приводом модуляционного вращения. Задача решается путем выбора оптимального закона управления приводом по критерию минимума дисперсии ошибок оценивания погрешностей инерциальных датчиков ИСОН в рамках процедуры калмановской фильтрации.

Ключевые слова: инерциально-спутниковая система, модуляционное вращение, фильтр Калмана, оптимальный алгоритм управления, нелинейное программирование, результаты испытаний

Введение

Известно [1], что определяющее влияние на точность интегрированной системы ориентации и навигации (ИСОН) оказывают инструментальные погрешности гироскопов и акселерометров, входящих в состав инерциального измерительного модуля (ИИМ) ИСОН и являющихся первичными источниками информации системы.

Повысить качество работы ИСОН, ИИМ которой использует информацию сравнительно грубых инерциальных датчиков, при заданном уровне погрешностей ИИМ возможно, если осуществлять непрерывную оценку погрешностей ИИМ (в условиях подвижного основания) и их компенсацию в показаниях инерциальных датчиков ИИМ.

Здесь следует отметить, что в прецизионных навигационных системах [2—4], способных решать

поставленные задачи в течение длительного времени, задача уточнения погрешностей ИИМ решается лишь эпизодически и в определенные промежутки времени на траектории движения объекта. В связи с этим, без акцентирования в дальнейшем внимания на характеристиках ИИМ, под ИСОН будет подразумеваться ИСОН с ИИМ со сравнительно грубыми датчиками.

Задача оценивания погрешностей инерциальных датчиков ИИМ ИСОН на подвижном основании не является новой. В ряде статей, например в [5, 6], рассмотрены условия, при которых обеспечивается наблюдаемость погрешностей ИИМ. В частности, для сравнительно грубых систем это достигается за счет модуляционных разворотов ИИМ, содержащих привод модуляционного вращения [7].

Здесь можно отметить, что исторически в инерциальных системах вращение ИИМ используется для автокомпенсации инструментальных погрешностей входящих в него инерциальных датчиков [8]. В данном же случае решается принципиально иная задача оценивания погрешностей ИИМ, что не предполагает особых требований к механической части привода модуляционного вращения.

Однако проблема нахождения эффективного закона управления приводом модуляционного вращения исходя из достижения максимальной точности оценивания инструментальных погрешностей ИИМ недостаточно освещена в открытых публикациях.

Здесь и далее под приводом модуляционного вращения подразумевается следящая система, состоящая из моментного двигателя, датчика угла, вычислительного устройства, задающего желаемый закон изменения угла датчика угла привода, и необходимых преобразователей информации. Под законом управления приводом в данном случае понимается как раз желаемый закон изменения угла датчика угла привода.

В данной статье решается задача определения требований к закону управления приводом модуляционного вращения ИИМ исходя из минимизации заранее выбранного критерия, отражающего уровень точности оценивания инструментальных

погрешностей ИИМ. По результатам решения указанной задачи сформирован закон управления приводом модуляционного вращения.

Задача решается на примере функционирования ИСОН в условиях качки объекта при комплексировании с приемной аппаратурой спутниковой навигационной системы (ПА СНС). Результаты получены методом полунатурного моделирования ИСОН с привлечением реальных данных стендовых испытаний ИСОН на волоконно-оптических гироскопах с вращением ИИМ вокруг оси, ортогональной основанию. Моделирование проводили с использованием имитационной модели ИСОН, алгоритмы которой построены на базе обобщенного фильтра Калмана с вектором состояния 15-го порядка.

Эффективность предложенного подхода подтверждена результатами стендовых испытаний ИСОН на примере оценивания смещений нулей триады акселерометров ИИМ.

Упрощенная модель погрешностей ИСОН

Рассматривается упрощенная модель погрешностей ИСОН, относительно представленной в [9], в предположении неподвижного основания. Рассматриваются только погрешности ориентации и погрешности северной и восточной составляющих скорости. С учетом сказанного принята для дальнейшего анализа модель погрешностей ИСОН имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= \omega_N \beta - \omega_E \gamma + \operatorname{tg} \varphi \frac{\Delta V_E}{R} - \delta \omega_H; \\ \dot{\beta} &= -\omega_N \alpha + \omega_H \gamma - \frac{\Delta V_N}{R} - \delta \omega_E; \\ \dot{\gamma} &= \omega_E \alpha - \omega_H \beta + \frac{\Delta V_E}{R} - \delta \omega_N; \\ \Delta \dot{V}_E &= n_N \alpha - n_H \gamma + \delta a_E; \\ \Delta \dot{V}_N &= -n_E \alpha + n_H \beta + \delta a_N, \end{aligned} \quad (1)$$

где α, β, γ — погрешности ИИМ в аналитическом моделировании горизонтной системы координат (ГСК) с географической ориентацией осей ENH ; $\Delta V_E, \Delta V_N$ — погрешности в выработке составляющих вектора линейной скорости; φ — широта места; R — радиус кривизны сферической Земли; n_E, n_N, n_H — проекции ускорения объекта на оси ГСК (в данном случае $n_E = n_N = 0, n_H = 9,81 \text{ м/с}^2$); $\delta \omega_E, \delta \omega_N, \delta \omega_H$ — проекции нескомпенсированных дрейфов гироскопов и так называемых "вычислительных" дрейфов, преобразованных из связанной с объектом системы координат (ССК) к осям ГСК

$$\begin{bmatrix} \delta \omega_E \\ \delta \omega_N \\ \delta \omega_H \end{bmatrix} = \mathbf{C}_h^b \begin{bmatrix} \Delta \omega_{xb} \\ \Delta \omega_{yb} \\ \Delta \omega_{zb} \end{bmatrix}; \delta a_E, \delta a_N — \text{проекции неском-}$$

пенсированных погрешностей акселерометров на

$$\text{оси ГСК} \begin{bmatrix} \delta a_E \\ \delta a_N \\ \delta a_H \end{bmatrix} = \mathbf{C}_h^b \begin{bmatrix} \Delta a_{xb} \\ \Delta a_{yb} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ в предположении,}$$

что оценка погрешностей Δa_{zb} акселерометра A_{zb} уже проведена; \mathbf{C}_h^b — матрица перехода из ССК

в ГСК, имеющая в данном случае вид $\mathbf{C}_h^b =$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\rho(t)) & -\sin(\rho(t)) & 0 \\ \sin(\rho(t)) & \cos(\rho(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \rho(t) — \text{угол модуляцион-}$$

ного вращения ИИМ (угол вращения привода, желаемый закон изменения которого формируется в его вычислительном устройстве).

Постановка задачи управления модуляционным вращением

Как уже было отмечено ранее, повышение качества работы ИСОН возможно при непрерывном оценивании (на подвижном основании) погрешностей ИИМ и исключении полученных оценок погрешностей ИИМ из показаний инерциальных датчиков ИИМ.

В данном случае оцениванию подлежат только погрешности x -го (x_b) и y -го (y_b) измерительных каналов ИИМ (что не нарушает общности изложения), для которых оси чувствительности датчиков находятся в плоскости, ортогональной оси вращения ИИМ по углу ρ , а именно — смещения нулей акселерометров $\Delta a_{xb}, \Delta a_{yb}$ и гироскопов $\Delta \omega_{xb}, \Delta \omega_{yb}$. Оценки погрешностей ИИМ вырабатываются в рамках процедуры фильтра Калмана (ФК) с вектором состояния вида

$$\mathbf{X}^T = [\alpha \ \beta \ \gamma \ \Delta V_E \ \Delta V_N \ \Delta \omega_{xb} \ \Delta \omega_{yb} \ \Delta a_{xb} \ \Delta a_{yb}]^T \quad (2)$$

и с использованием следующих измерений:

$$\begin{aligned} Z_K &= K_{pr} - K = \alpha + v_K, \\ Z_{V_i} &= V_{ipr} - V_{icнс} = \Delta V_i + v_{V_i}, \end{aligned} \quad (3)$$

где K — курс, вырабатываемый внешним по отношению к ИСОН измерителем; K_{pr}, V_{ipr} — приборные значения курса, восточной и северной составляющих скорости соответственно ($i = E, N$); $V_{icнс}$ — восточная и северная составляющие скорости по данным ПА СНС ($i = E, N$); v_K, v_E, v_N — соответствующие эквивалентные шумы измерений.

Отсутствие в векторе состояния ФК (2) оценки дрейфа $\Delta \omega_{zb}$ обусловлено тем, что даже наличие не-

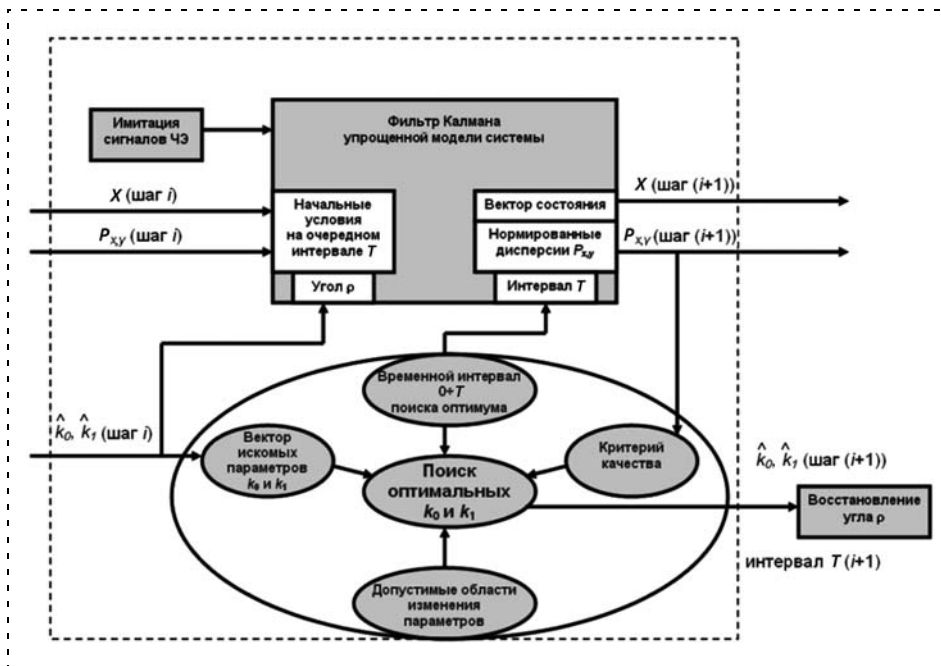


Рис. 1. Схема алгоритма получения параметров полиномиальной модели

скомпенсированного дрейфа $\Delta\omega_{zb}$ и значительной ошибки α практически не влияет на точность оценивания Δa_{xb} и Δa_{yb} и оказывает слабое влияние на точность оценивания $\Delta\omega_{xb}$, $\Delta\omega_{yb}$ при вращении по углу ρ . Курсовое измерение из (3) используется только в режиме начальной выставки.

Анализ (1) и (3) показывает, что изменение угла ρ приводит к соответствующему изменению проекций погрешностей гироскопов и акселерометров из ССК в ГСК. Это, в свою очередь, влияет на характер изменчивости, в частности, погрешностей ИСОН в выработке скорости движения в ГСК. Сказанное позволяет заключить, что существует потенциальная возможность (при отсутствии курсового измерения, после завершения режима начальной выставки) оценки погрешностей инерциальных датчиков ИИМ при задании только одноосного модуляционного вращения ИИМ (по углу ρ). Однако при этом возникает задача нахождения эффективного, с точки зрения оценивания погрешностей ИИМ, закона изменения угла ρ .

Для поиска закона управления был принят следующий критерий:

$$J(\rho(\tau), T) = \operatorname{argmin}_{\rho(\tau)} \sqrt{P_{x_b}(\rho(\tau), T) + P_{y_b}(\rho(\tau), T)}, \quad (4)$$

где τ — время на заданном интервале времени $[0, T]$; $P_i(\rho(\tau), T)$ — элементы главной диагонали матрицы ковариаций ФК, отражающие точность выработки оценок соответствующих погрешностей ИИМ ($i = x_b, y_b$) на момент времени T . При этом рассматривается только последняя точка интервала T , т. е. осуществляется оптимизация в точке. Такой подход представляется справедливым, так как при непре-

рывном на интервале $[0, T]$ изменении угла ρ и обеспечении наблюдаемости оцениваемых параметров их дисперсия является монотонно убывающей.

Анализ влияния характера изменения угла ρ на точность оценивания погрешностей ИИМ осуществлялся при численном решении во временной области системы (1) с использованием пакета прикладных программ MATLAB.

Оптимальный в отношении критерия (4) закон управления приводом выбирали на интервалах времени T с использованием соответствующих элементов матрицы ковариаций ФК, при этом интервалы до наступления времени $T_{\text{зад}} = 180$ с. На каждом следующем интервале T начальные

условия для задачи фильтрации ФК задавали по результатам, полученным на предыдущем интервале времени. При этом в ходе выбора длительности интервалов времени осуществляли поиск минимального интервала T , при котором наблюдался заметный уровень изменчивости градиента (4). Поиск минимума критерия (4) выполняли методами нелинейного программирования при кусочно-полиномиальной аппроксимации изменения угла ρ . Была принята полиномиальная модель 1-го порядка на интервале времени $[0, T]$ вида

$$\rho = k_0 + k_1\tau. \quad (5)$$

Схема рекуррентного алгоритма определения параметров полиномиальной модели приведена на рис. 1.

Определение оптимального закона управления приводом

При осуществлении поиска оптимального решения (4) были рассмотрены два варианта:

- поиск при отсутствии каких-либо ограничений на параметры коэффициентов полинома в модели (5);
- поиск при наложении ограничений на параметры коэффициентов полинома.

Ограничения на параметры k_i вводили с учетом предполагаемых возможностей электроприводов:

- по диапазону изменения угла k_0 — $0 \dots 360^\circ$;
- по диапазону изменения угловой скорости k_1 — $10^\circ/\text{с}$.

На рис. 2, а–в, приведены результаты модельного решения задачи минимизации критерия (4) в среде MATLAB с использованием библиотечной

m -функции MATLAB `fmincon` (на рис. 2 приведены кривые оптимального закона управления приводом при наложении ограничений на параметры аппроксимирующего полинома (рис. 2, *a, б*) и при отсутствии каких-либо ограничений (рис. 2, *в*)). При этом для определенности в качестве дисперсий, входящих в критерий (4), рассматривали дисперсии погрешностей оценок смещений нулей Δa_{xb} , Δa_{yb} акселерометров и смещений нулей $\Delta \omega_{xb}$, $\Delta \omega_{yb}$ гироскопов.

При моделировании принимались следующие допущения:

- смещения нулей акселерометров заданы как сумма случайной константы, равной в конкретном случае $0,01 \text{ м/с}^2$ (3σ), и марковского процесса первого порядка с интервалом корреляции порядка 300 с;
- смещения нулей гироскопов заданы как сумма случайной константы, равной $10^\circ/\text{ч}$ (3σ), и марковского процесса первого порядка с интервалом корреляции порядка 1000 с;
- белые шумы скоростных измерений заданы на уровне $0,15 \text{ м/с}$ (3σ);
- белый шум курсового измерения задан на уровне 5° (3σ).

Анализ приведенных результатов показывает, что:

- при отсутствии ограничений на коэффициенты полинома (5) закон изменения угла ρ практически нереализуем (рис. 2, *в*) (скорость изменения угла ρ превышает возможности приводов, применяемых в рассматриваемых системах);
- при задании ограничений на параметры полинома (5) уровень скорости изменения угла ρ ограничен во времени (рис. 2, *a, б*), а сам закон изменения угла носит гармонический характер.

Обобщая приведенные результаты по выявлению оптимального закона управления приводом модуляционного вращения, можно утверждать следующее:

- ◆ для получения оптимальных по критерию (4) оценок дрейфов нулей гироскопов/акселерометров изменение угла ρ должно носить гармонический характер;
- ◆ наилучшей аппроксимацией полученного закона изменения угла ρ в классе аналитических непрерывных во времени функций является аппроксимация рядом Фурье по нескольким гармоникам;
- ◆ период изменения первой гармоники угла ρ составляет десятки секунд, при этом ее амплитуда, исходя из практической целесообразности (простоты реализации и надежности работы ИИМ), должна составлять величину порядка 180° ;
- ◆ в рамках рассмотренного подхода не удается определить период первой гармоники угла ρ . В связи с этим представляется возможным использовать другие методы, в частности, метод Power Spectral Density (PSD), основанный на анализе спектральных плотностей сигналов (в данном случае, спектральных плотностей шумов инерциальных датчиков ИИМ).

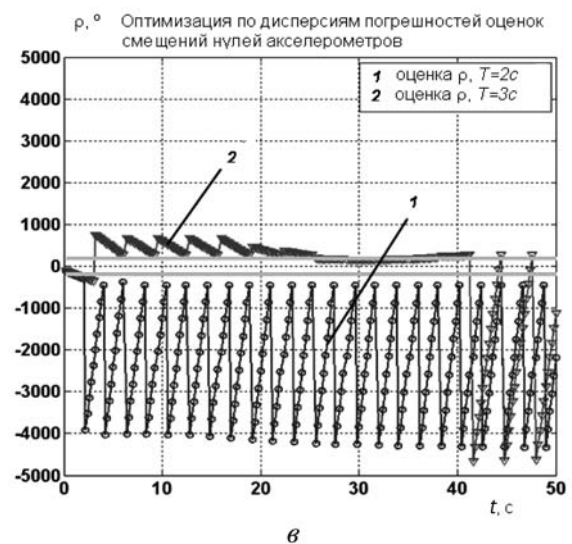
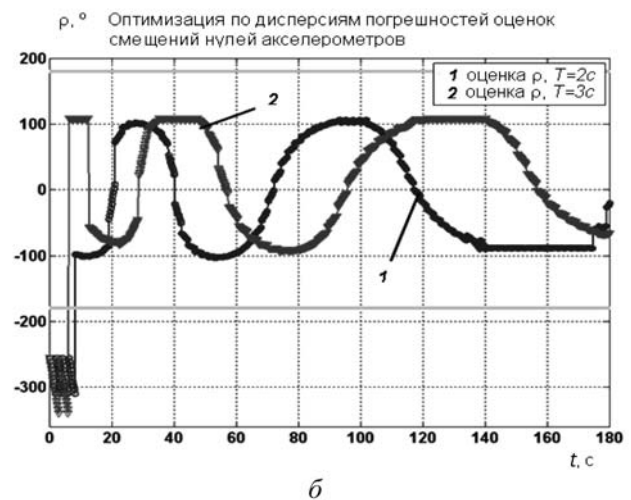
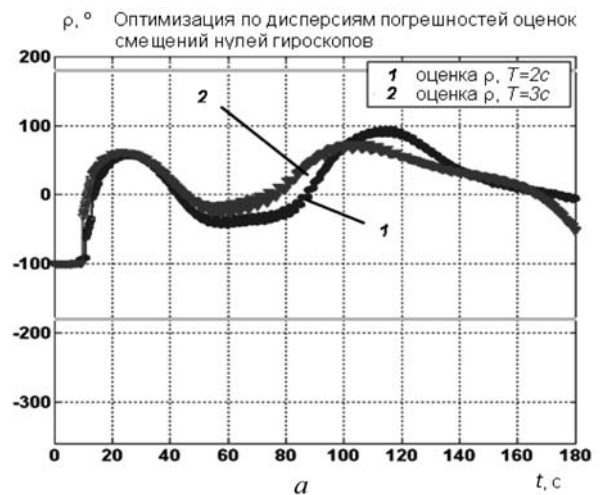



Рис. 2. Результаты модельного решения задачи минимизации критерия (4):

a — минимизация критерия по смещениям нулей гироскопов; *б* — минимизация критерия по смещениям нулей акселерометров; *в* — минимизация критерия по смещениям нулей акселерометров (1 — интервал поиска $T = 2 \text{ с}$; 2 — интервал поиска $T = 3 \text{ с}$; горизонтальные линии — диапазон углов 180°)

Условия проведения испытаний

 Внешний вид ГГК	Параметры модуляционного вращения Закон изменения — синусоидальный Период — 120 с Амплитуда — 180°	Параметры качки Бортовая качка — 15°, 12 с Килевая качка — 15°, 10 с	Средства контроля Квадрант КВО-6 (погрешность 6'')
	Примечания: 1. Период реверсивного вращения ИИМ принят исходя из спектров погрешностей акселерометров. 2. Максимальный перепад температуры внутри прибора составил 5 °С.		

Результаты камеральной обработки экспериментальных данных

Для экспериментальной проверки эффективности применения оптимального закона управления приводом модуляционного вращения для оценки погрешностей ИИМ ИСОН в условиях динамики основания проведен ряд натурных экспериментов. Эксперименты проводили на неподвижном основании и при задании двухосной качки при работе системы как из прогретого, так и из непрогретого состояний. Объектом эксперимента служил гироскопизированный компас (ГГК) разработки ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор". Данный прибор содержит программируемый привод, обеспечивающий модуляционное вращение его инерциального измерительного модуля.

Условия проведения экспериментов приведены в табл. 1.

В качестве примера рассматривали оценивание погрешностей акселерометров, поскольку характер их влияния на погрешности ИСОН значительно проще, чем влияния погрешностей гироскопов. Перед началом испытаний акселерометры были откалиброваны (погрешность калибровки не более 40''), далее в соответствующие измерительные каналы ИСОН были искусственно введены дополнительные смещения нулей (в виде случайных констант):

- акселерометр A_x : $-0,4 \cdot 10^{-3}g$;
- акселерометр A_y : $+1,3 \cdot 10^{-3}g$.

Шумы ПА СНС в выработке горизонтальных составляющих скорости при этом имитировали и задавали на уровне $0,05 \text{ м/с}$ (1σ).

Таблица 2

Результаты экспериментов

Условия эксперимента		Погрешности оценки смещений нулей акселерометров, мг	
		x-го	y-го
Неподвижное основание	Непрогретое состояние	0,06	0,08
	Прогретое состояние	-0,02	-0,02
Двухосная качка до 15° по каждой оси	Непрогретое состояние	0,01	0,14
	Прогретое состояние	0,07	0,17

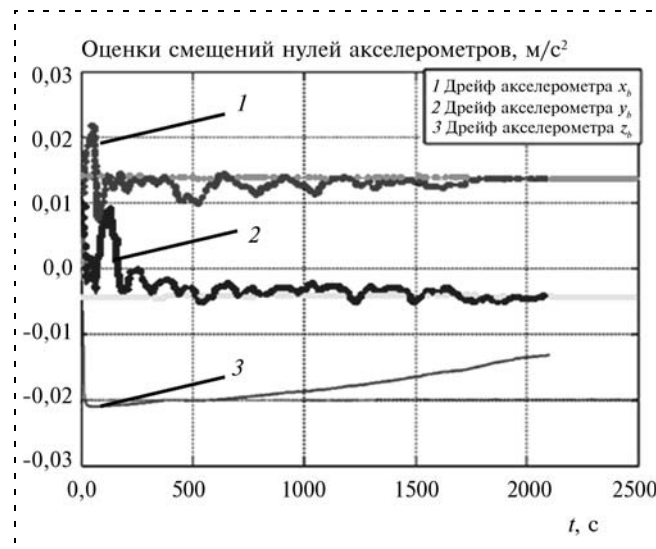


Рис. 3. Дрейфы акселерометров (1 — оценка дрейфа акселерометра x; 2 — акселерометра y; 3 — акселерометра z; запуск из непрогретого состояния, бортовая и килевая качка)

Результаты испытаний получены постобработкой данных испытаний (в ходе испытаний фиксировали угол вращения ρ и показания инерциальных датчиков ИИМ) в рамках созданной в пакете MATLAB модели ИСОН с ФК 15-го порядка без учета упрощений (1) и приведены в табл. 2 и на рис. 3 (на рис. 3 горизонтальными линиями обозначен уровень дополнительных смещений нулей акселерометров).

Анализ результатов натурных экспериментов с ГГК позволяет заключить, что:

- ♦ существует потенциальная возможность выработки оценок погрешностей триады акселерометров в условиях качки как из прогретого, так и из непрогретого состояний;
- ♦ погрешность оценивания смещений нулей акселерометров для всех режимов проведения экспериментов составила не более $0,2 \cdot 10^{-3}g$.

Заключение

Решена задача нахождения эффективного закона изменения угла модуляционного вращения чувствительных элементов ИИМ, при котором достигает-

ся минимум дисперсий ошибок оценок погрешностей чувствительных элементов ИИМ.

Установлено, что наилучшим законом изменения угла ρ является синусоидальный закон с амплитудой первой гармоники порядка 180° .

Определение оптимального периода первой гармоники угла ρ возможно исходя из анализа спектров погрешностей чувствительных элементов ИИМ.

Экспериментально подтверждена возможность точной (с погрешностью не более $0,2 \cdot 10^{-3}g$) оценки дрейфов акселерометров ИИМ на подвижном основании при выбранном законе управления модуляционным вращением.

Использование разработанного подхода позволяет использовать в системах типа ГГК акселерометры сравнительно низкой (порядка $6 \cdot 10^{-3}g$ (3σ)) точности.

Авторы выражают благодарность коллегам из ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор" за помощь в проведении исследований.

Список литературы

1. **Бромберг П. В.** Теория инерциальных систем навигации. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979.
2. **Копелович В. А., Копылов И. А., Харин Е. Г.** Летные испытания инерциально-спутниковых навигационных систем с применением современных информационных технологий //

Сб. матер. XVI Санкт-Петербургской Междунар. Конф. по интегрированным навигационным системам. СПб., 2009. ГНЦ РФ — ЦНИИ Электроприбор. С. 187—190.

3. **Мешковский И. К., Стригалева В. Е., Дейнека Г. Б., Пешехонов В. Г.** и др. Трехосный волоконно-оптический гироскоп. Результаты испытаний // Сб. матер. XVIII Санкт-Петербургской Междунар. Конф. по интегрированным навигационным системам. СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор". 2011. С. 8—14.

4. **Patrel Y., Rumoroso V., Chapelon A., Honthaas J.** MARINS, the First FOG Navigation System for Submarines // Сб. ст. Symposium Gyro Technology 2006. Stuttgart, Germany. IXSea. France.

5. **Емельянец Г. И., Анучин О. Н.** Об эффективности использования данных относительного лага в корабельных интегрированных системах ориентации и навигации на основе бескарданных инерциальных модулей // Гироскопия и Навигация. 2001. № 3. С. 32—42.

6. **Анучин О. Н., Емельянец Г. И.** О влиянии угловых колебаний объекта на точность и время выставки по курсу интегрированной системы ориентации и навигации // Гироскопия и Навигация. 1997. № 3. С. 7—13.

7. **Емельянец Г. И.** О проблемах построения прецизионной корабельной БИНС // Тр. VI Росс. науч.-техн. конф. "Современное состояние и проблемы навигации и океанографии". СПб.: ГНИНГИ МО РФ, 2007. С. 117—124.

8. **Zhang Zhi-xin, Zheng Chun-lei, Jiang Rong-zhen.** The Technology of Rotation Modulate for the Marine FOG Inertial Navigation System // Proc. of 2010 Inertial Symposium on Inertial Technology and Navigation. Langfang, Haitao Pinting Limited Company. 2010. China. P. 311—316.

9. **Анучин О. Н., Емельянец Г. И.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / Под общей ред. акад. РАН В. Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ — ЦНИИ "Электроприбор", 2003.

УДК 62-5

С. В. Канушкин,

канд. техн. наук, зам. начальника кафедры,
Серпуховский военный институт ракетных войск,

Г. Н. Лебедев, д-р техн. наук, проф.,

Чан Ван Туен, аспирант, **К. И. Швыдченко,** студент,
k301@mail.ru,

Московский авиационный институт
(технический университет)

Подготовка операторов безотказного управления сложными подвижными объектами при регулируемом регламенте проведения проверок*

Рассматривается процесс обучения безошибочным действиям оператора контроля и управления сложным динамическим объектом. Вводится регулируемый регламент проведения проверок как главный фактор оперативности принятия решений.

Ключевые слова: безотказное управление, регламент проверок, функции риска, оптимальное поведение

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки по проекту НК-528П/58ФЦП, контракт П-787.

При проведении проверок работоспособности сложных технических объектов, таких как ракетно-космические комплексы, возможны два подхода.

Один подход основан, в первую очередь [1, 2], на учете не столько ошибок в принятии решений, сколько их несвоевременности. Данный подход имеет одно полезное конструктивное предложение — различать простые и сложные ситуации, а для них считать оправданными неодинаковые потери времени на принятие окончательных решений. Однако главным показателем качества при данном подходе является только время задержки в действиях оператора, а стоимости ошибочных решений не учитываются. Для их учета необходимо как-то соотнести их с потерями времени и дать оценку неидеальным действиям оператора в свертке. Другой подход состоит в том, чтобы учесть штрафы не столько за время принятия решений, сколько за ошибки первого и второго рода — ложную тревогу и пропуск отказа, — ответственность за которые слишком велика, чтобы допускать их в работе оператора управления.

Выбор критерия качества действий оператора в свертке при обучении

Не снижая общности рассуждений, будем считать действия оператора состоящими из отдельных шагов определенной последовательности проверок при предстартовой подготовке. Каждая из таких проверок сводится к оценке работоспособности отдельной подсистемы летательного аппарата и осуществляется с помощью допускового контроля. Задача первого уровня заключается в определении при удачном стечении обстоятельств окончательного решения (норма и отказ), а также в принятии решения о переходе на второй уровень дополнительного принятия решения. На втором уровне используется новая уточняющая информация. Функция риска в ряде случаев соответствует штрафу за ошибки первого и второго рода либо штрафу за дополнительные усилия на принятие окончательного решения. Принимая гипотезу о нормальном распределении сигнала измерений z относительно номинального значения n при безотказном поведении и смещенного значения $(n - r)$ при возникновении отказа, представим функции штрафов F_j^I за ошибки первого и второго рода на первом уровне принятия решений в виде

$$\left\{ \begin{aligned} F_1^I &= C_1 \int_n^{\infty} \frac{e^{-\frac{(z-r)^2}{2\sigma_1^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} dz = \\ &= C_1 \left[0,5 - \Phi\left(\frac{z-n-r}{\sigma_1}\right) \right] + C_0 T_1; \\ F_2^I &= C_2 \int_{-\infty}^n \frac{e^{-\frac{z^2}{2\sigma_1^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} dz = \\ &= C_2 \left[0,5 - \Phi\left(\frac{z-n}{\sigma_1}\right) \right] + C_0 T_1, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где σ_1 — среднеквадратичное отклонение в оценке полезного сигнала на уровне 1 принятия решений, соответствующее измерительному шуму; r — среднее "расстояние" между измерениями в безотказном и отказном состояниях подсистемы летательного аппарата; C_1 — стоимость ошибки за пропуск отказа; C_2 — стоимость ложной тревоги; Φ — интеграл Лапласа; T_1 — время принятия решений на первом уровне; C_0 — коэффициент значимости потерь времени, который пока неизвестен и его нужно как-то найти.

Картина изменений функций штрафа в зависимости от аргумента представлена на рис. 1. Для случая, когда $C_1 \gg C_2$, формулы (1) после линеаризации в точках $\frac{z-n}{\sigma_1} \cong 3$ и $\frac{z-n-r}{\sigma_1} \cong -3$ соответственно для

функций F_1^I и F_2^I можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} F_1^I = C_1(0,001 + 0,001x_1); \\ F_2^I = C_2(0,1 + 0,01x_1). \end{cases} \quad (2)$$

Эта аппроксимация соответствует линейному характеру поведения функций риска F_j^I вблизи их точек пересечения.

Из рис. 1 ясно, что максимальная вероятность ошибочных решений возникает в точке пересечения функций F_1^I и F_2^I . Чтобы снизить ее влияние, воспользуемся основной идеей первого подхода — перейдем в окрестности наибольшего риска на второй уровень дополнительной оценки ситуации, чтобы ценой оправданной дополнительной задержки времени T_2 получить лучшее решение $j = 3$, чему на рис. 1 соответствует функция риска F_3^I .

Ее значение можно получить как результат осреднения потерь следующим путем:

$$F_3^I = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-\frac{(x_2-x_1)^2}{2\Delta\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}\Delta\sigma} \left\{ \min \begin{bmatrix} F_1^{II}(x_2) \\ F_2^{II}(x_2) \end{bmatrix} \right\} dx_2,$$

где F_1^{II} и F_2^{II} — функции принятия окончательных решений на втором уровне; $\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$ — разность дисперсий в оценке состояния контролируемого параметра, всегда большая нуля, так как значение σ_2 соответствует уточненному значению оценки на втором уровне по сравнению с первым уровнем; $x_2 = (z - n)/\sigma_2$ — параметр осреднения действий на втором уровне.

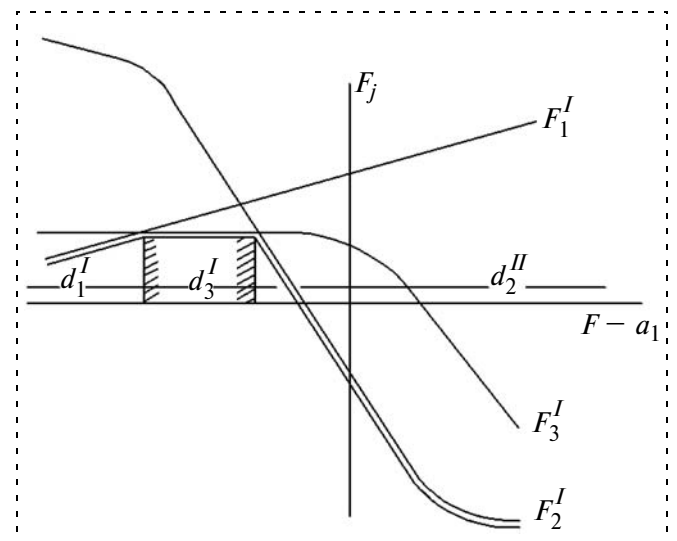


Рис. 1. График изменения функции Беллмана

Функции F_1^H и F_2^H в соответствии с формулами (2) имеют аналогичный вид:

$$F_1^H = C_1 \left(0,001 + 0,001 \frac{z-n}{\sigma_2} \right) + C_O(T_1 + T_2);$$

$$F_2^H = C_2 \left(0,1 - 0,01 \frac{z-n-r}{\sigma_2} \right) + C_O(T_1 + T_2).$$

В результате осреднения функцию риска F_3^I можно представить константой при $C_1 \gg C_2$, а именно:

$$F_3^I \approx C_O(T_1 + T_2) + 0,001 C_1 e^{-\frac{\Delta\sigma}{\sigma_2}}. \quad (3)$$

Формул (1)–(3) достаточно, чтобы с помощью обучающего лица оценить искомое значение коэффициента C_O в свертке штрафов, если при известных параметрах C_1 , C_2 , допустимых значениях T_1 , T_2 и заданных характеристиках точности σ_1 и σ_2 на определенном этапе обучения будет назначена допустимая максимальная вероятность $P_{\text{ош}}$ ошибочных решений, которой соответствует величина F_3^I мак-

симального штрафа $C_1 P_{\text{ош}} = C_O T_2 + 0,001 C_1 e^{-\frac{\Delta\sigma}{\sigma_2}}$.

Отсюда можно получить первую оценку C_O :

$$C_O \approx \frac{C_1}{T_2} (P_{\text{ош}} - 0,001 C_1 e^{-\frac{\Delta\sigma}{\sigma_2}}).$$

Пусть, например, заданы значения $C_1 = 10^6$, $C_2 = 10^4$, $T_2 = 10$, $P_{\text{ош}} = 0,5 \cdot 10^{-3}$, $\sigma_1 = 2\sigma_2$. Тогда $C_O = 13$, т. е. штраф за задержку времени на несколько порядков ниже штрафов за пропуск отказа и ложную тревогу, но он существует. Поэтому на практике при проверке важных объектов авиационной и космической техники при малейших сомнениях необходимо переходить на уровень дополнительного уточнения в оценке работоспособности.

Отсюда следует вывод о том, что обучающее лицо (преподаватель) в зависимости от этапа обучения операторов обязано, во-первых, требовать от них выполнения проверок в общем случае с помощью двух уровней восприятия информации (но всегда с малой вероятностью ошибочных решений) и, во-вторых, должно быть способно назначить минимизируемую функцию штрафов за неидеальные действия в свертке на каждом шаге проверок:

$$J_i = \min[C_O \Delta t_i + C_1 P_{\text{отк}}^i + C_2 P_{\text{л.т.}}^i],$$

где Δt — задержка времени принятия решений на каждом i -м шаге; $P_{\text{отк}}^i$ — вероятность пропуска от-

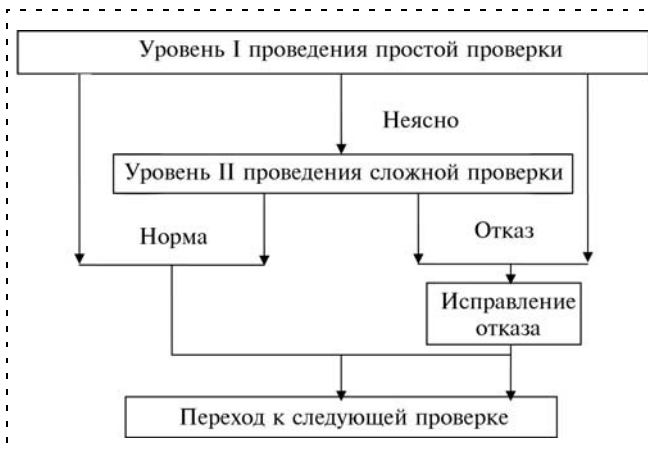


Рис. 2. Двухуровневая структура принятия решений при контроле технического состояния и управлении объектом

каза; $P_{\text{л.т.}}^i$ — вероятность ложной тревоги; C_1 — штраф за потерю объекта из-за пропуска отказа; C_2 — штраф за ложную тревогу; C_O — штраф за "медлительность", весьма малый в начале обучения и постепенно растущий к его завершению; J_i — штрафная функция действий на i -м шаге. Двухуровневая структура принятия решения оператором показана на рис. 2.

Таким образом, можно представить процесс обучения, состоящим из следующих этапов, — вначале задаются малые значения C_O и даются простые задания. Если полученные значения штрафных функций через некоторое время обучения снижаются до нужного уровня, то повышают требования по скорости действий, увеличивая C_O , и переходят на более сложные задания, требующие от оператора более частого использования дополнительного уровня оценивания обстановки.

Введение регулируемого регламента при освоении оператором простых и сложных навыков

Регламент проведения проверок при обучении целиком зависит как от достигнутой оператором скорости освоения навыков, так и скорости их забывания. Опыт обучения [3] показал, что эти скорости зависят от сложности возникающих ситуаций при проведении проверок.

При выполнении простых проверок допустимое время T_1 принятия безошибочных решений быстро снижается в зависимости от длительности T обучения, как это показано на рис. 3.

Видно, что как у сильной, так и у слабой группы при увеличении времени обучения простому навыку задержка в принятии решений стремится к нулю.

На рис. 4 представлена зависимость от времени обучения регламента проведения сложных проверок, для которых асимптотой является ненулевое время задержки Δ , требуемое для обеспечения принятия безошибочных решений в сложных ситуациях.

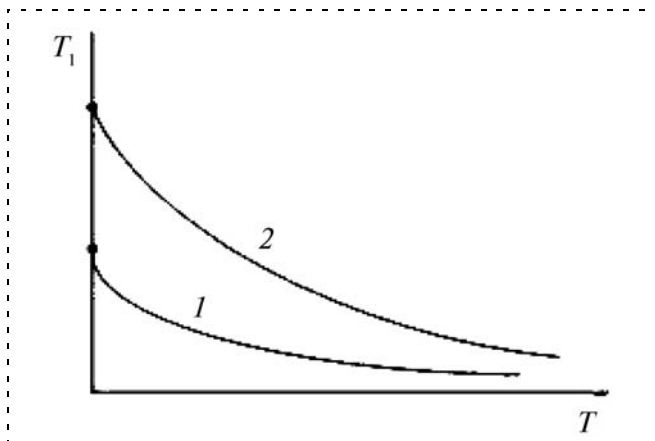


Рис. 3. Регулируемый регламент проведения простых проверок для сильной (1) и слабой (2) групп

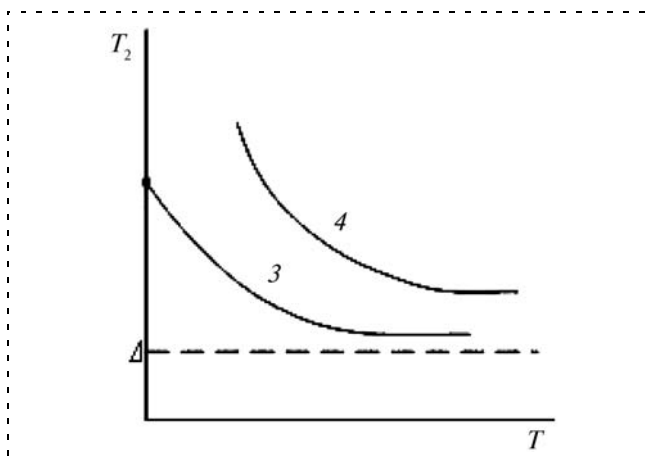


Рис. 4. Регулируемый регламент проведения сложных проверок для сильной (3) и слабой (4) групп

Кроме того, сильная и слабая группы требуют индивидуального подхода в обучении.

Предложенный подход применим и при оценке действий оператора непосредственного управления

движением объекта, в частности, при появлении внешних возмущений, таких как внезапные порывы ветра, ударные механические нагрузки и т. п. Особенно важными являются случаи движения при обходе препятствий и возникновении внешних угроз. При обучении операторов навыкам ручного управления также уместен регулируемый регламент на выполнение действий по оценке текущей обстановки

Заключение

1. При контроле действий оператора необходимо учитывать в свертке различные по значимости штрафы за пропуск отказа, ложную тревогу и неоправданные задержки времени принятия решений. Коэффициенты значимости отдельных показателей в свертке должны меняться в ходе обучения в зависимости от сроков обучения и сложности возникающих ситуаций.

2. Принципиально важной является необходимость различения оператором простых и сложных ситуаций и приобретения в последнем случае необходимых навыков, связанных с переходом на дополнительный уровень восприятия информации.

3. При учете такого фактора, как скорость забывания навыков, важную роль играет процесс их чередования при освоении и повторении, что требует дополнительных исследований.

Список литературы

1. Лебедев Г. Н. Применение оперативного последовательного анализа данных в задачах управления и контроля // Автоматика и телемеханика. 1976. № 9.
2. Лебедев Г. Н. Интеллектуальные системы управления и их обучение с помощью методов оптимизации. М.: Изд. МАИ, 2002.
3. Романов О. В., Алексеев А. Ю. Разработка модельного обеспечения компьютерной системы обучения и тренажа для подготовки операторов систем управления // Сб. тезисов докл. IV междунар. науч.-практич. конф. "Пилотируемые полеты в космос". Звездный городок: ГНИИ ЦПК, 2000.

ИНФОРМАЦИЯ

с 28 по 30 мая 2012 г. состоится

XIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (МКИНС2012)

Тематика конференции

- Системы навигации, управления и наведения и их элементы
- Интегрированные навигационные системы для морских, наземных и аэрокосмических объектов
- Инерциальные системы и датчики
- Спутниковые системы GLONASS, GPS, Galileo и их дополнения
- Микромеханические системы
- Алгоритмы и программное обеспечение
- Испытания и метрология

Подробную информацию о конференции см. сайте:

<http://www.elektropribor.spb.ru/cnf/icins2012/rindex.php>

CONTENTS

Mironov V. I., Mironov Yu. V., Yusupov R. M. Energetically Optimum Control in Linear Multipoint Problems about the Meeting of Movements2

One considers the problem energetically optimum control of movement of active object is considered at its consecutive meeting with system of mobile target objects. The analytical decision of a corresponding modeling linearly-quadratic problem is resulted.

Keywords: optimum control, approchement, target objects, multipoint problems

Anisimov D. N., Myakinkov D. A. Problems of Nonlinear Dynamic Objects Parameters Estimates Errors Reduction when Identification by the Method of Exponential Modulation6

The paper is devoted to research of nonlinear dynamic objects identification by the method of exponential modulation (MEM). Identification of object linear part using transient response distorted by nonlinear element and random noise is carried out. These two factors can considerably influence on estimation errors. A problem of a choice of nonlinear characteristic operating area (input signal amplitude and offset) providing the best result of identification is considered. Suitability of inverse block introduction for compensation nonlinearity influence is discussed. A criterion permitting to judge a preferable choice of static characteristic operating area is proposed.

Keywords: identification, nonlinear dynamic object, static characteristic, operating area is proposed

Makarov I. M., Lokhin V. M., Manjko S. V., Romanov M. P. Multiagent Robotic Systems' Construction Principles and Design Problems 11

The multiagent robotic systems' construction principles, design problems and a generalized functional structure is discussed.

Keywords: multiagent robotic system, intelligent autonomous robot, group robot control

Osipov V. Yu. Erase Outdated Information in Associative Intelligent Systems 16

An approach to erase outdated information in associative intelligent systems (AIS) based on partial reflection signals from the layers of neural networks is offered. A mathematical model of a neural network with such an erase is made. Results of modeling are presented. It is shown that the proposed approach improves the stability of the AIS.

Keywords: the associative intelligent system, neural network, erasure of information

Volkomorov S. V., Karpenko A. P. Geometry Optimization for Multisection "Trunk" Manipulator 21

The problem of optimizing the shape and size of the sections of multisection "trunk" robot-manipulator according to various criteria of optimality is considered. A formulation of the problem, methods for its solution, the optimization results are given.

Keywords: robotics, manipulators, geometry optimization, solution of ill-posed problems

Tatmyshevskiy K. V., Pavlov D. D. Mechanoluminescence Sensors for Tactile Sensitivity of Robots 27

Different types of mechanoluminescence sensor elements for systems for registration and measure of pulse pressure are considered in this paper. Furthermore the construction of such type sensors and the method for radiation registration is submitted. There are gives the examples of such type sensors use.

Keywords: mechanoluminescence sensor, tactile, sensitivity

Krasilnikyants E. V., Varkov A. A., Tiutikov V. V. Software of IntNCR Control System by Manipulation Robots . 31

The singularities of design of software of control system by manipulation robots IntNCR are considered. The approaches of realization of systems software of control system by manipulation robots are defined. The possibilities of programming language developed for use with control system IntNCR are determined.

Keywords: manipulators, control system, software, programming of robots

Sharshenaliyev Zh. Sh., Mirkin E. L. Synthesis of Modified Adaptive Control Algorithms Growth Process of Silicon Single Crystals 37

Substantiates the concept of an adaptive approach to solve the control problem by "Redmet-30" equipment, designed for growing single crystals of silicon. Obtained the linearized mathematical model with an input delay of control object. Formulated and solved the problem of synthesis of modified adaptive control algorithms setup. Analysis of the functioning of the unit showed the effectiveness of the proposed adaptive control algorithms. The obtained samples were single crystal silicon as a result of experimental meltings are fully consistent with a given geometry of the product.

Keywords: adaptive control algorithms, systems with delay, automatic control system process of crystal growth

Gindin P. D., Kondratenko V. S., Sorokin A. V., Khlyzov V. A. Operating Software for industrial laser cutting thermal cleaving machines 44

Laser cutting machines RT-350 and RP-500 of brittle non-metallic materials are considered. The main details of the RT-350, RT-500 machines are described, scheme of machines is present. Laser cutting semiconductor wafers and glass is assembled and proposed algorithm of control system machines on base technological flow. The main problems with creation of control system are described and resolved. Laser cutting machines control system Laser Cut v3.0 is developed and proposed. Main principle of working with software Laser Cut v3.0 on laser-controlled thermal cleavage machines is described. Main parameters and there values required for cutting of brittle non-metallic materials on laser-controlled thermal cleavage machines are described.

Keywords: laser-controlled thermal cleavage, laser, silicon, software, control system, interface windows, laser cutting of semiconductor wafer, laser cutting machine

Mironenko A. A. The Programming of Vessel's Track and Maneuvering Modes in Restricted Areas 49

A new approach to vessel's track programming in restricted areas on the bases of sigma functions is under consideration. The components of the model are assigned through kinematic parameters and the inclination angle of a sigma function corresponds with the gradients of kinematic parameters and their functional alterations. The results can be applied to modern Electronic Chart Display and Information System (ECDIS) used for track and maneuvering modes planning and automatic controlling of a vessel's track.

Keywords: a program track, sigma function, gradient

Sevryuk A. N. Method of Optimization of the Data Clustering for the Decision of Problems of Localization of Underwater Objects 55

In article the method of automatic localization of objects on the images received by system of technical sight of the autonomous underwater vehicle (AUV) in an operating time is described. The method is based on the topological analysis of measurable quantities, and allows to carry out in real time construction multidimensional clusters. The method is applied to allocation spatial accumulations of the parameters measured by the AUV (conductivity, temperatures, etc.). In work examples of application of a method for revealing of the isolated objects on a photo and side-scan sonar images are resulted.

Keywords: data clustering, segmentation, real-time systems, autonomous underwater robots

Ignatiev S. V., Stepanov A. P., Zavyalov P. P., Vinokurov I. Yu. Synthesis of Measurement Unit Modulation Rotation Control Algorithm in GPS-Aided Attitude and Heading Reference System 62

The problem of estimation aided attitude and heading reference system inertial measurement unit's (IMU) errors is considered. The problem of estimation IMU's errors is determined for IMU with modulation rotation actuator by optimal control of modulation rotation actuator on the basis of a certain previously surveyed quality criterion, that minimizes estimate error variance for biases of inertial sensors of the system. The IMU's errors estimates and the estimate error variances are obtained in the context of extended Kalman filter procedure.

Keywords: aided attitude and heading reference system, modulation rotation, Kalman filter, optimal controlling algorithm, nonlinear programming, test results

Kanushkin S. V., Lebedev G. N., Tran Van Tuyen, Shvydchenko K. I. Operator Training Trouble-Free Management of Complex Moving Objects at a Controlled Regulation of the Audits 67

We consider the learning process unmistakable actions of the operator and control complex dynamic objects. Introduces adjustable regulation of the audits as a major factor in decision making.

Keywords: trouble-free management, the regulations of checks, risk functions, the optimum behavior

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Т. В. Пчелкина.*

Сдано в набор 29.12.2011. Подписано в печать 20.02.2012. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,82. Уч.-изд. л. 9,56. Заказ МН312. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансд солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансд солюшнз".
105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2, офис 2.