

# МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 10 (91)

октябрь

2008

**Редакционный совет:**

МАКАРОВ И. М.  
МАТВЕЕНКО А. М.  
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.  
ФЕДОРОВ И. Б.

**Главный редактор:**

ТЕРЯЕВ Е. Д.

**Заместители гл. редактора:**

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

**Ответственный секретарь:**

ПЕТРИН К. В.

**Редакционная коллегия:**

АЛЕКСАНДРОВ В. В.  
АНТОНОВ Б. И.  
АРШАНСКИЙ М. М.  
БОГАЧЕВ Ю. П.  
БУКОВ В. Н.  
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.  
ЛЁВИН Б. А.  
ЛОХИН В. М.  
НОРЕНКОВ И. П.  
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.  
РАПОПОРТ Э. Я.  
РАССАДКИН Ю. И.  
РАЧКОВ М. Ю.  
РЕЗЧИКОВ А. Ф.  
СЕБРЯКОВ Г. Г.  
СИГОВ А. С.  
СИРОТКИН О. С.  
СОЙФЕР В. А.  
ТИМОФЕЕВ А. В.  
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.  
ФИЛИМОНОВ Н. Б.  
ФУРСОВ В. А.  
ЮРЕВИЧ Е. И.  
ЮСУПОВ Р. М.

**Редакция:**

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Краснощеченко В. И.** Синтез управления в задаче быстрогодействия с использованием метода модельного прогнозируемого управления . . . . . 2  
**Макаров Н. Н., Семашкин В. Е.** Предельно достижимая точность линейных следящих систем. . . . . 8  
**Бобцов А. А., Кремлев А. С.** Алгоритм компенсации неизвестного синусоидального возмущения для линейного неминимально-фазового объекта . . . . . 14

### АВТОМАТИЧЕСКОЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

- Колосов О. С., Гармаш В. Б., Деев Р. В., Морозов Р. Б.** Повышение помехоустойчивости и эффективности алгоритма регулирования температуры горячего водоснабжения на центральных тепловых пунктах . . . . . 18  
**Блинников А. Е.** Разработка новых методов организационного и технологического управления в литейном производстве. . . . . 23  
**Кудинов Ю. И., Иванченко К. С., Кудинов И. Ю.** Разработка нечеткой системы прогнозирования качества металлопродукции. . . . . 27

### РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Егоров О. Д.** Особенности расчета преобразователей движения мехатронных и роботизированных систем . . . . . 33  
**Пряничников В. Е.** Алгоритмическое обеспечение дистанционных сенсоров мобильных роботов . . . . . 38  
**Аршанский М. М., Королев Д. Е.** Разработка специальной базы знаний на основе данных инспекционной системы в задачах управления мобильными роботами . . . 44

### ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

- Лохин В. М., Романов М. П., Манько С. В.** Открытое письмо с обсуждением публикации С.Ф. Сергеева "Методология эргономического проектирования систем искусственного интеллекта для самолетов 5-го поколения" . . . . . 48  
**Сергеев С. Ф.** Ответ на открытое письмо В. М. Лохина, М. П. Романова, С. В. Манько . . . 52

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВИОНИКИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

- Распопов В. Я.** Концепция построения и проектирования авионики малоразмерных беспилотных летательных аппаратов . . . . . 54  
**Телухин С. В., Матвеев В. В.** Беспилотный летательный аппарат как объект управления . . . . . 54  
**Малютин Д. М.** Исследование динамики рулевого привода беспилотного малоразмерного летательного аппарата . . . . . 54  
**Алалуев Р. В., Иванов Ю. В., Матвеев В. В., Распопов В. Я., Шведов А. П.** Бесплатформенная система ориентации и навигации мини-беспилотного летательного аппарата . . . . . 54  
**Распопов В. Я., Телухин С. В., Малютин Д. М., Алалуев Р. В., Шведов А. П., Кузнецов Я. С., Ладонкин А. В.** Автопилот мини-беспилотного летательного аппарата . . . . 55  
**Contents** . . . . . 55

*Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание степени доктора наук*

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

УДК 62.50, 517.9, 512

**В. И. Краснощеченко**, канд. техн. наук, доц.,  
Калужский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана

## Синтез управления в задаче быстрогодействия с использованием метода модельного прогнозируемого управления

*Для линейных стационарных систем предлагается методика приближенного синтеза управления в задаче быстрогодействия на основе применения метода модельного прогнозируемого управления с грамиановзвешиванием. Представлен пример синтеза для осциллятора.*

**Ключевые слова:** метод модельного прогнозируемого управления, синтез, задача быстрогодействия, линейные системы, устойчивость, грамиан управляемости.

### Введение

В данной статье рассматривается новый подход в применении метода модельного прогнозируемого управления (МПУ), в отечественной литературе получивший название "управление методом прогнозирующей модели" (А. А. Красовский и его школа), "упреждающего управления" (Н. Б. Филимонов), "метод управления с прогнозом" и т. п.; в зарубежной литературе используется уже устоявшийся термин "model predictive control (MPC)". Метод МПУ представляется в сочетании с взвешенным проектированием: для синтеза управления на каждом шаге прогноза движения системы используется метод наименьших квадратов, но последний трактуется как метод проектирования вектора невязки на подпространство управляемого движения системы, причем данное проектирование проводится с грамиановзвешиванием. Исследуются вопросы использования метода МПУ к решению задачи быстрогодействия. Показывается, что в данной задаче может быть получено синтезируемое, хотя и приближенное, управление. Представлен пример синтеза управления для осциллятора, проведено сравнение с результатами, полученными из принципа максимума.

### МПУ

Пусть имеется непрерывная задача быстрогодействия для линейного стационарного объекта управления со скалярным ограниченным управлением:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t); \\ \mathbf{x}(0) &= \mathbf{x}_0, \mathbf{x}(t_f) = \mathbf{0}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |u(t)| &\leq 1; \\ J &= \min_u \int_0^{t_f} f. \end{aligned}$$

Здесь  $t \in [0, t_f]$  — интервал управления,  $t_f$  — конечный момент времени;  $\mathbf{x}(t)$  и  $u$  — вектор состояния и управляющее воздействие соответственно;  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{b}$  — числовые матрица и вектор соответствующих размеров.

Введем шаг дискретизации  $h$  и перейдем к дискретному аналогу данной задачи:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{b}_d u(k); \quad (1)$$

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \mathbf{x}(N) = \mathbf{0};$$

$$|u(k)| \leq 1, k = 0, 1, \dots, N-1,$$

$$J = \min_u N h,$$

где  $\mathbf{A}_d = \mathbf{A}(h) = \mathbf{e}^{\mathbf{A}h}$ ;  $\mathbf{b}_d = \mathbf{b}(h) = \int_0^h \mathbf{e}^{\mathbf{A}t} \mathbf{b} dt$ .

Пусть для метода МПУ с грамиановзвешиванием:  $t_u = N_u h$  — интервал прогноза постоянства управления,  $T = N_w h$  — интервал, на котором вычисляется грамиан управляемости

$$\mathbf{W}_c(T) = \int_0^T \mathbf{e}^{-\mathbf{A}t} \mathbf{b} \mathbf{b}^T \mathbf{e}^{-\mathbf{A}^T t} dt.$$

Роль грамиана управляемости как метрического тензора задач управления подробно рассмотрена автором в монографии [1]. Обозначим  $\tilde{\mathbf{A}}_d, \tilde{\mathbf{b}}_d$  — матрицы дискретной системы (1) для интервала прогноза управления, т. е.  $\tilde{\mathbf{A}}_d = \mathbf{A}(t_u)$ ;  $\tilde{\mathbf{b}}_d = \mathbf{b}(t_u)$ . Тогда в соответствии с алгоритмом МПУ [1] и взвешенным проектированием в начало координат на каждом интервале прогноза управления  $t_u$  имеем следующее управление с грамиановзвешиванием:

$$\begin{aligned} u(k) &= -(\tilde{\mathbf{b}}_d^T \mathbf{W}_c^{-1}(T) \tilde{\mathbf{b}}_d)^{-1} \tilde{\mathbf{b}}_d^T \mathbf{W}_c^{-1}(T) \tilde{\mathbf{A}}_d \mathbf{x}(k), \\ k &= 0, 1, \dots, N-1. \end{aligned} \quad (2)$$

Управление (2) согласно методу МПУ, как и всем алгоритмам с прогнозом, используется только на элементарном шаге  $h$ .

### Энергетическая трактовка МПУ

Рассмотрим энергетическую трактовку управления (2). Обозначим  $\|u\|_{x \rightarrow 0}^2 = \mathbf{x}^T \mathbf{W}_c^{-1}(T) \mathbf{x} = (\mathbf{x}, \mathbf{x})|_{\mathbf{W}_c^{-1}(T)}$  — минимальные энергетические затраты в  $L_2[0, T]$  для перевода системы из состояния  $\mathbf{x}$  в начало координат

нат за время  $t = T$  [2]. С учетом этих обозначений формула (2) примет вид

$$u(k) = -\frac{(\tilde{\mathbf{b}}_d, \tilde{\mathbf{A}}_d \mathbf{x}(k))}{(\tilde{\mathbf{b}}_d, \tilde{\mathbf{b}}_d)} \Big|_{\mathbf{W}_c^{-1}(T)} = -\frac{1}{2(\tilde{\mathbf{b}}_d, \tilde{\mathbf{b}}_d)} ((\tilde{\mathbf{b}}_d, \tilde{\mathbf{b}}_d) + (\tilde{\mathbf{A}}_d \mathbf{x}(k), \tilde{\mathbf{A}}_d \mathbf{x}(k)) - (\tilde{\mathbf{A}}_d \mathbf{x}(k) - \tilde{\mathbf{b}}_d, \tilde{\mathbf{A}}_d \mathbf{x}(k) - \tilde{\mathbf{b}}_d)) \Big|_{\mathbf{W}_c^{-1}(T)} = -\frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\|u^o\|_{\tilde{\mathbf{A}}_d \mathbf{x}(k) \rightarrow 0}^2 - \|u^o\|_{\tilde{\mathbf{A}}_d \mathbf{x}(k) - \tilde{\mathbf{b}}_d \rightarrow 0}^2}{\|u^o\|_{\tilde{\mathbf{b}}_d \rightarrow 0}^2} \right). \quad (3)$$

Проанализируем энергетическую формулу (3). Составляющая  $\|u^o\|_{\tilde{\mathbf{b}}_d \rightarrow 0}^2$  определяет затраты энергии для перевода системы из состояния  $\tilde{\mathbf{b}}_d$  в начало координат. Само состояние  $\tilde{\mathbf{b}}_d$  получается как движение системы из начала координат с управлением  $u = 1$  в течение времени  $t = t_u$ . Это значит, что при ограничении на управление  $|u| \leq 1$  из состояния  $\tilde{\mathbf{b}}_d$  в начало координат можно попасть не ранее, как за время  $t \geq t_u$ , причем при минимальном времени  $t = t_u$  затраты управления  $\|u_b^o\|_{L_2[0, t_u]}^2 = t_u$ . Если проводится взвешивание при проектировании невязки на управляемое подпространство с помощью грамиана  $\mathbf{W}_c^{-1}(T)$ , то так как  $T \gg t_u$ , то имеем  $\|u^o\|_{\tilde{\mathbf{b}}_d \rightarrow 0}^2 \ll t_u$ . Из проведенного анализа следует, что:

- 1) интервал прогноза грамиана  $T$  существенно влияет на формируемое управление и время перевода системы в начало координат;
- 2) при выборе интервала  $T$  для грамиана управляемости необходимо выполнить условие  $T(\mathbf{x}_0) \geq t_{\min}(\mathbf{x}_0)$ , где  $t_{\min}(\mathbf{x}_0)$  — минимальное время перехода системы в начало координат при заданном ограничении на управление и начальном состоянии  $\mathbf{x}_0$ .

### Смена знака в МПУ.

#### Условия малоэффективного, но экономичного управления и затяжной стабилизации

Рассмотрим, при каких условиях в методе МПУ происходит смена знака управления (в задаче быстрогодействия это момент выхода на линию (поверхность) переключения). Из формул (2), (3) получаем, что управление в этот момент становится равным нулю, т. е.  $u(k) = 0 : \mathbf{x}(k) \in \text{Ker}\{(\tilde{\mathbf{A}}_d \mathbf{W}_c^{-1}(T) \tilde{\mathbf{b}}_d)^T\}$ .

Исследуем ядро  $\text{Ker}\{(\tilde{\mathbf{A}}_d \mathbf{W}_c^{-1}(T) \tilde{\mathbf{b}}_d)^T\}$  и его окрестность. Имеем:

$$(\tilde{\mathbf{A}}_d \mathbf{W}_c^{-1}(T) \tilde{\mathbf{b}}_d)^T = \tilde{\mathbf{b}}_d^T \mathbf{W}_c^{-1}(T) \tilde{\mathbf{A}}_d^T \approx \tilde{\mathbf{b}}_d^T \mathbf{W}_c^{-1}(T),$$

так как при малом интервале  $t_u$  прогноза постоянства управления  $\tilde{\mathbf{A}}_d^T \approx \mathbf{I}$ . Рассмотрим случай, когда  $\mathbf{x}(k) \in \text{span}\{\xi_{\min}(\mathbf{W}_c^{-1}(T))\}$ ,  $\mathbf{x}(k) = \beta \xi_{\min}(\mathbf{W}_c^{-1}(T))$ ,  $\beta \in R$ , где  $\xi_{\min}(\mathbf{W}_c^{-1}(T))$  — собственный вектор матрицы  $\mathbf{W}_c^{-1}(T)$  для ее минимального собственного значения  $\lambda_{\min}(\mathbf{W}_c^{-1}(T))$ . Тогда

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{b}}_d^T \mathbf{W}_c^{-1}(T) \mathbf{x}(k) &= \tilde{\mathbf{b}}_d^T \mathbf{W}_c^{-1}(T) \beta \xi_{\min}(\mathbf{W}_c^{-1}(T)) = \\ &= \beta \lambda_{\min}(\mathbf{W}_c^{-1}(T)) \tilde{\mathbf{b}}_d^T \xi_{\min}(\mathbf{W}_c^{-1}(T)). \end{aligned}$$

Если собственное значение  $\lambda_{\min}(\mathbf{W}_c^{-1}(T))$  — мало, тогда можно считать, что текущее состояние  $\mathbf{x}(k)$  принадлежит окрестности  $\text{Ker}\{(\tilde{\mathbf{A}}_d \mathbf{W}_c^{-1}(T) \tilde{\mathbf{b}}_d)^T\}$  малого управления (малых затрат управления).

Вместе с тем, *наиболее медленное движение* системы к началу координат (наибольшие временные затраты) с *малым* управлением (а значит, без выхода на ограничение) происходит при попадании системы на инвариантное подпространство  $\mathbf{x}(k) \in \text{span}\{\xi_{\max}(\mathbf{A}_d^*)\}$  собственного вектора матрицы  $\mathbf{A}_d^*$  с ближайшим по модулю к 1 вещественным собственным значением, т. е. для  $1 - |\lambda_{\max}(\mathbf{A}_d^*)| = \varepsilon$ , где  $\varepsilon > 0$  — малое число. При этом переход из некоторого состояния  $\mathbf{x}(k) \in \text{span}\{\xi_{\max}(\mathbf{A}_d^*)\}$ ,  $\mathbf{x}(k) = \beta \xi_{\max}(\mathbf{A}_d^*)$ ,  $\beta \in R$  имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}_d^* \mathbf{x}(k) = \mathbf{A}_d^* \beta \xi_{\max}(\mathbf{A}_d^*) = \\ &= \lambda_{\max}(\mathbf{A}_d^*) \beta \xi_{\max}(\mathbf{A}_d^*), \end{aligned}$$

а через  $m$  шагов получаем

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+m) &= \mathbf{A}_d^{*m} \mathbf{x}(k) = \mathbf{A}_d^{*m} \beta \xi_{\max}(\mathbf{A}_d^*) = \\ &= (\lambda_{\max}(\mathbf{A}_d^*))^m \beta \xi_{\max}(\mathbf{A}_d^*), \quad m = 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Нетрудно показать, что для простых комплексных корней соответствующее инвариантное подпространство будет двумерным следующего вида:

$$P_{\lambda_{\max}} = \text{span}\{\text{Re} \xi_{\max}(\mathbf{A}_d^*), \text{Im} \xi_{\max}(\mathbf{A}_d^*)\}.$$

#### Устойчивость системы с МПУ при наличии ограничения на управление

Обозначим в выражении (2)

$$\mathbf{K}_{reg} = -(\tilde{\mathbf{b}}_d^T \mathbf{W}_c^{-1}(T) \tilde{\mathbf{b}}_d)^{-1} \tilde{\mathbf{b}}_d^T \mathbf{W}_c^{-1}(T) \tilde{\mathbf{A}}_d \quad (4)$$

матрицу коэффициентов регулятора в системе без ограничений на управление. С учетом обозначений (4)

объект управления (1) с обратной связью примет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= (\mathbf{A}_d + \mathbf{b}_d \mathbf{K}_{reg}) \mathbf{x}(k) = \mathbf{A}_d^* \mathbf{x}(k), \\ k &= 0, 1, \dots, N-1; \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0; \mathbf{x}(N) = \mathbf{0}. \end{aligned} \quad (5)$$

При описании системы (5) в расширенной области, включающей подобласти с насыщением управления (выход на ограничение), используем политопическую модель. В данной модели матрица уравнения движения представляется в виде выпуклой комбинации матриц уравнений движения в насыщенной и ненасыщенной областях. Для этого синтезируемое управление представим с помощью функции насыщения  $\text{sat}(\cdot)$  в следующем виде:

$$u(k) = \text{sat}(\mathbf{K}_{reg} \mathbf{x}(k)) = \alpha(\mathbf{x}(k)) \mathbf{K}_{reg} \mathbf{x}(k),$$

где множитель

$$\alpha(\mathbf{x}(k)) = \begin{cases} \frac{-1}{\mathbf{K}_{reg} \mathbf{x}(k)}, & \text{если } \mathbf{K}_{reg} \mathbf{x}(k) < -1; \\ 1, & \text{если } -1 \leq \mathbf{K}_{reg} \mathbf{x}(k) \leq 1; \\ \frac{1}{\mathbf{K}_{reg} \mathbf{x}(k)}, & \text{если } \mathbf{K}_{reg} \mathbf{x}(k) > 1 \end{cases}$$

назовем коэффициентом (или уровнем) насыщения управления. Заметим, что  $0 < \alpha(\mathbf{x}(k)) \leq 1$ . В этом случае движение системы в расширенной области имеет вид (для упрощения обозначим  $\alpha(k) = \alpha(\mathbf{x}(k))$ )

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= (\mathbf{A}_d + \alpha(k) \mathbf{b}_d \mathbf{K}_{reg}) \mathbf{x}(k) = \tilde{\mathbf{A}}_d(\alpha(k)) \mathbf{x}(k), \\ k &= 0, 1, \dots, N-1. \end{aligned} \quad (6)$$

Рассмотрим в пространстве состояний некоторое компактное множество  $E_0 \subset R^n$ . Определим на этом множестве нижнюю границу коэффициента насыщения (максимальное насыщение управления)

$$\alpha_{\min} = \min\{\alpha(k) : \mathbf{x}(k) \in E_0\}.$$

Обозначим  $\mathbf{A}_d^\alpha = \mathbf{A}_d + \alpha_{\min} \mathbf{b}_d \mathbf{K}_{reg}$ . Тогда любая матрица уравнения движения (6) на множестве  $E_0$  в диапазоне  $\alpha_{\min} < \alpha(k) \leq 1$  может быть представлена как выпуклая комбинация матриц  $\mathbf{A}_d^*$  и  $\mathbf{A}_d^\alpha$ , т. е.

$$\tilde{\mathbf{A}}_d(\alpha(k)) \in \text{co}\{\mathbf{A}_d^*, \mathbf{A}_d^\alpha\}, \forall \mathbf{x}(k) \in E_0. \quad (7)$$

С учетом соотношения (7) система (6) может быть представлена политопической моделью

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= (\lambda_1 \mathbf{A}_d^* + \lambda_2 \mathbf{A}_d^\alpha) \mathbf{x}(k), \\ \lambda_1 + \lambda_2 &= 1, \lambda_i \geq 0, i = 1, 2. \end{aligned}$$

Коэффициенты выпуклой комбинации  $\lambda_1(k)$ ,  $\lambda_2(k)$  в зависимости от текущего уровня насыщения  $\alpha(k)$  определяются из следующих выражений:

$$\lambda_1(k) = \frac{\alpha(k) - \alpha_{\min}}{1 - \alpha_{\min}}, \lambda_2(k) = 1 - \lambda_1(k) = \frac{1 - \alpha(k)}{1 - \alpha_{\min}}.$$

Найдем границу  $k_{\max}$  области  $\bar{E} = \{\mathbf{x}(k) \in R^n : -k_{\max} \leq \mathbf{K}_{reg} \mathbf{x}(k) \leq k_{\max}\}$ , внутри которой  $\alpha_{\min} < \alpha(k) \leq 1$ . Ясно, что

$$k_{\max} = \frac{1}{\alpha_{\min}} \quad (8)$$

и при этом  $E_0 \subset \bar{E}$ .

Предположим, что в качестве множества  $E_0$  мы рассматриваем эллипсоид

$$E_0 = E(T, c) = \{\mathbf{x} \in R^n : \mathbf{x}^T \mathbf{W}_c^{-1}(T) \mathbf{x} \leq c\}. \quad (9)$$

Найдем максимальное значение  $c = c_{\max} > 0$ , при котором области  $\bar{E}$  будет принадлежать эллипсоид (9) максимального размера

$$E_0 = E(T, c_{\max}) = \{\mathbf{x} \in R^n : \mathbf{x}^T \mathbf{W}_c^{-1}(T) \mathbf{x} \leq c_{\max}\}. \quad (10)$$

Ясно, что в этом случае данный эллипсоид должен касаться границы множества  $\bar{E}$ . Имеем следующую задачу условной оптимизации:

- найти максимум  $\max(\mathbf{x}^T \mathbf{W}_c^{-1}(T) \mathbf{x})$  при условии  $\mathbf{K}_{reg} \mathbf{x} = k_{\max}$ .

Составим функцию Лагранжа  $L = \mathbf{x}^T \mathbf{W}_c^{-1}(T) \mathbf{x} + \lambda(\mathbf{K}_{reg} \mathbf{x} - k_{\max})$ , стационарность которой определяет оптимальное решение

$$\begin{aligned} c_{\max} &= \mathbf{x}^{*T} \mathbf{W}_c^{-1}(T) \mathbf{x}^* = \\ &= \frac{k_{\max}^2}{\mathbf{K}_{reg} \mathbf{W}_c(T) \mathbf{K}_{reg}^T} = \frac{1}{\alpha_{\min}^2 \mathbf{K}_{reg} \mathbf{W}_c(T) \mathbf{K}_{reg}^T}, \end{aligned} \quad (11)$$

где было использовано соотношение (8). Из этого заключаем, что в эллипсоиде (10) с границей (11) обеспечивается насыщение управления не хуже  $\alpha_{\min}$ .

Определим, при каких условиях данный эллипсоид обеспечит инвариантность системы (6) по отношению к начальным условиям, т. е. функция  $V(\mathbf{x}(k)) = \mathbf{x}(k)^T \mathbf{W}_c^{-1}(T) \mathbf{x}(k)$  будет функцией Ляпунова для всех  $\mathbf{x}(k) \in E(T, c_{\max})$ . Эти условия сформулируем в виде следующей теоремы.

**Теорема** (достаточные условия инвариантности эллипсоида при ограниченном управлении). Пусть  $\forall \mathbf{x}(k) \in E(T, c_{\max})$  матрицы  $\mathbf{A}_d^*$ ,  $\mathbf{A}_d^\alpha$  удовлетворяют неравенству Ляпунова:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_d^{*T} \mathbf{W}_c^{-1}(T) \mathbf{A}_d^* - \mathbf{W}_c^{-1}(T) &\leq 0; \\ \mathbf{A}_d^{\alpha T} \mathbf{W}_c^{-1}(T) \mathbf{A}_d^\alpha - \mathbf{W}_c^{-1}(T) &\leq 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Тогда эллипсоид  $E(T, c_{\max})$  является инвариантным эллипсоидом. Из неравенств (12) непосредственно получаем следующее следствие.

**Следствие.** Для того чтобы эллипсоид  $E(T, c_{\max})$  был инвариантным, достаточно выполнения двух неравенств:

$$\begin{aligned} \|Z\mathbf{A}_d^*Z^{-1}\|_s &\leq 1; \\ \|Z\mathbf{A}_d^\alpha Z^{-1}\|_s &\leq 1, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\mathbf{W}_c^{-1}(T) = Z^T Z$ ,  $\|\mathbf{P}\|_s = \lambda_{\max}^{1/2}(\mathbf{P}^T \mathbf{P})$  — спектральная норма матрицы  $\mathbf{P}$ . Неравенства (13) используются для выбора интервала прогноза грамиана управляемости  $T$  и интервала прогноза управления  $t_u$ .

Из энергетической трактовки МПУ и условий устойчивости системы при МПУ можно сделать следующие выводы:

1. Допустимый уровень насыщения управления  $\alpha_{\min}$ , при котором спектральная норма  $\|Z\tilde{\mathbf{A}}_d(\alpha(k))Z^{-1}\|_s \leq 1$ , напрямую зависит от интервала  $T$  и стремится к 0 (допускаются неограниченные начальные условия) при  $T \rightarrow \infty$  (только для систем, имеющих глобальную нуль-управляемость при ограниченном управлении, например, двойной интегратор).

2. С ростом  $T$  уменьшается и амплитуда управления, но при этом его (управления) эффективность также снижается, так как увеличивается время перевода в начало координат. Необходим компромисс, который сочетал бы решение проблемы устойчивости  $\|Z\tilde{\mathbf{A}}_d(\alpha(k))Z^{-1}\|_s \leq 1$ , формировал бы максимальный размер инвариантного эллипсоида (требуется как можно больший интервал прогноза  $T$ ), обеспечивая при этом минимальное время перевода (необходимо как можно меньший интервал прогноза  $T$ ).

3. Решение данной задачи возможно лишь с использованием переменных интервалов прогноза  $T$ , а значит, необходимы переключения.

Предлагается следующая процедура синтеза.

### Процедура синтеза ограниченного управления

**1-й этап.** Выбор числа участков управления. Определяется (экспериментально) общее число участков  $p$  (чем больше участков, тем лучше) управления с различными параметрами прогноза (участков коррекции параметров управления), которое должно быть компромиссным с точки зрения быстрогодействия (максимальной амплитуды управления, минимального времени управления), устойчивости и вычислительных затрат.

**2-й этап.** Определение параметров управления по участкам.

1. Выбирается  $p \geq 1$  вариантов времени прогноза грамиана управляемости  $T_i, i = 1, \dots, p$ , распределенных в убывающей последовательности (эффективность управления наоборот возрастает).

2. Путем моделирования с использованием пакетов оптимизации (симплекс-метода, нелинейного программирования) для каждого выбранного интервала  $T_i, i = 1, \dots, p$  определяется начальная точка

$x_0^i, i = 1, \dots, p$ , для которой решение задачи быстрогодействия обеспечивает приблизительное равенство  $t_{\min}^i \approx T_i, i = 1, \dots, p$ . Это дает возможность получения первичной оценки границ эллипсоидов переключения  $E(T_i, c_{\max}^i), c_{\max}^i = x_0^{iT} \mathbf{W}_c^{-1}(T_i) x_0^i, i = 1, \dots, p$ , которые в дальнейшем потребуют корректировки, связанной с принципами переключения эллипсоидов и учетом ограничений на управление.

3. С использованием неравенств (13) выбираются (по участкам) интервалы прогноза постоянства управления  $t_u^i, i = 1, \dots, p$ , также в убывающей последовательности, так как с уменьшением интервала прогноза грамиана управляемости  $T_i, i = 1, \dots, p$ , возрастает динамичность системы, и требуется более короткий интервал прогноза постоянства управления  $t_u^i, i = 1, \dots, p$ .

4. Для выбранных  $T_i, t_u^i, i = 1, \dots, p$  и шага дискретизации  $h$  определяются максимальные уровни насыщения управления  $\alpha_{\min}^i, i = 1, \dots, p$ , обеспечивающие выполнение условий инвариантности (13) эллипсоидов при ограниченном управлении.

**3-й этап.** Выбор метода (алгоритма) переключения эллипсоидов (параметров синтеза управляющего воздействия). Рассмотрим алгоритмы.

### Алгоритмы исключения или уменьшения влияния малоэффективного управления и затяжной стабилизации

**Алгоритм 1** (переключения осуществляются при попадании текущего состояния системы непосредственно в окрестность малого управления и затяжной стабилизации).

**Основная идея** подхода: переключения выполнять при выходе на пересечение подпространств  $\text{span}\{\xi_{\max}(\mathbf{A}_d^*)\}, P_{\lambda_{\max}}$  и  $\text{span}\{\xi_{\min}(\mathbf{W}_c^{-1}(T))\}$ , а также их окрестностей (с точностью до  $\varepsilon_{w_i} > 0$ ) при допустимом уровне насыщения управления. Заметим, что последнее условие, как правило, выполняется автоматически, так как малое управление предполагает, что насыщение управления отсутствует.

**Достоинством** данного метода является непосредственное исключение или заметное сокращение (путем переключения) участков с малым управлением и затяжной стабилизацией, что позволяет эффективно влиять на время стабилизации.

**Недостатки:**

- нерегулярность при переключениях энергетических эллипсоидов приводит к заметной неопределенности времени стабилизации;
- непростой задачей является выбор параметра переключения  $\varepsilon_{w_i} > 0$ , определяющего точность выхода на пересечение окрестностей подпространств малого управления и затяжной стабилизации:
  - относительно большое значение  $\varepsilon_{w_i}$  может привести как к быстрой стабилизации, так и не-

устойчивому движению (в случае, если очередной эллипсоид переключения с неопределенным заранее уровнем не находится внутри допустимой области насыщения управления, гарантируется только принадлежность текущей точки области с допустимым насыщением,  $\mathbf{x}(k) \in \bar{E}$ );

- малое значение этого параметра практически сводит на нет эффект переключений.

**Алгоритм 2** (переключения по достижении определенного — фиксированного для всех участков — энергетического уровня).

*Основная идея* подхода: переключение выполнять, если расстояние до начала координат в метрике  $\mathbf{W}_c^{-1}(T_i)$  текущего грамиана управляемости становится меньше некоторого фиксированного для всех участков уровня  $V_0$ , т. е.

$$t_{s_i} = t(k) : \mathbf{x}(k)^T \mathbf{W}_c^{-1}(T_i) \mathbf{x}(k) = V(\mathbf{x}(k)) \leq V_0 \ \& \ \alpha_{i+1}(k) \geq \alpha_{\min}^{i+1}, \quad (14)$$

где  $T_i$  — текущий интервал прогноза грамиана управляемости, при условии, что уровень насыщения управления для следующего участка не превышает допустимый  $\alpha_{i+1}(k) \geq \alpha_{\min}^{i+1}$ . Подход к переключению (14) определяет фиксированный энергетический уровень переключения, но с обязательным выполнением условия по насыщению управления. Поэтому переключения могут происходить нерегулярно, в том числе на меньшем энергетическом уровне (по уровню насыщения), т. е. при  $V(\mathbf{x}(k)) < V_0 \ \& \ \alpha_{i+1}(k) = \alpha_{\min}^{i+1}$ .

*Достоинство:* достаточная гибкость при варьировании фиксированного энергетического уровня и значительное влияние последнего на динамику системы.

*Недостатки* практически те же, что и в алгоритме 1.

Для устранения главного недостатка алгоритмов 1 и 2 — отсутствия гарантии стабилизации — необходимо включить в условия переключения обоих методов дополнительное требование:

$$\&(\mathbf{x}(k)^T \mathbf{W}_c^{-1}(T_{i+1}) \mathbf{x}(k) = V_{i+1}(\mathbf{x}(k)) \leq c_{\max}^{i+1}), \text{ где } c_{\max}^{i+1} \text{ — максимальный уровень } (i+1)\text{-го эллипсоида с допустимым уровнем насыщения; } c_{\max}^{i+1} \text{ находится из формулы (11). Но такое дополнение фактически приводит к алгоритму 3.}$$

*Алгоритм 3* (переключения по достижении определенного — фиксированного для каждого участка — энергетического уровня). Точка переключения участков

$$t_{s_i} = t(k) : \mathbf{x}(k)^T \mathbf{W}_c^{-1}(T_{i+1}) \mathbf{x}(k) = V_{i+1}(\mathbf{x}(k)) \leq c_{\max}^{i+1}. \quad (15)$$

Критерий (15) позволяет выполнять переключение при достижении строго определенного энергетического уровня, т. е. при попадании на границу

очередного *вложенного* эллипсоида. Так как уровень следующего эллипсоида выбирается исходя из допустимого уровня насыщения, то обязательное (необходимое) условие для стабилизации с ограниченным управлением  $\alpha_{i+1}(k) \geq \alpha_{\min}^{i+1}$ , которое было в алгоритмах 1 и 2, в алгоритме 3 отсутствует.

*Достоинства алгоритма:*

- подход вносит регулярность в порядок переключения и дает возможность с хорошей точностью оценить, по крайней мере, сверху время стабилизации;
- гарантируется стабилизация при всех начальных условиях из самого первого, внешнего эллипсоида притяжения, в том числе и для неустойчивых объектов управления.

*Недостатки:*

- относительно слабое влияние на время стабилизации: необходимость увеличения числа участков, если основным показателем является время стабилизации, а не комплексный показатель — минимизация энергии + быстродействие.

Рассмотрим нетривиальный пример (классический осциллятор, не имеющий в задаче быстродействия, согласно теореме А. А. Фельдбаума, заранее определенного, максимального числа переключений), где продемонстрируем применение метода МПУ с грамиановзвешиванием на практике.

### Пример

Пусть объектом управления является осциллятор:

$$\dot{x}_1 = x_2;$$

$$\dot{x}_2 = -x_1 + u; \ |u| \leq 1.$$

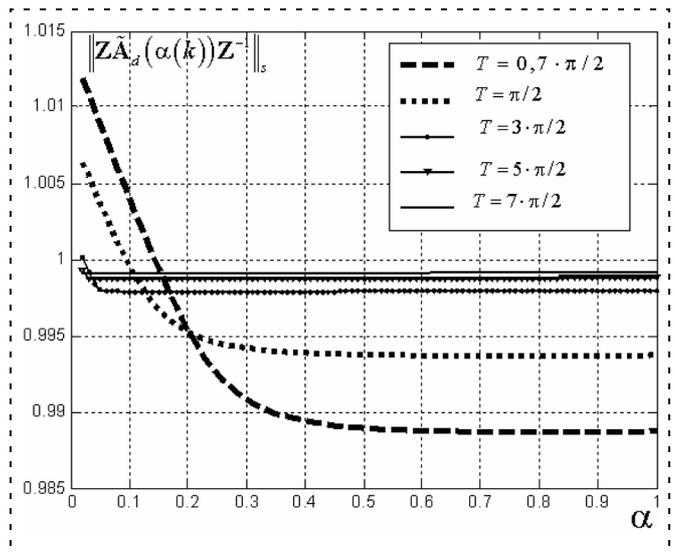


Рис. 1. Осциллятор. Зависимость спектральной нормы от уровня насыщения для интервалов  $T \in [\pi/2, \dots, 9\pi/2]$  (с),  $t_u = 0, 1$  с с шагом  $\Delta T = 2\pi$

Соответствующие матрицы дискретной системы имеют вид ( $h = 0,01$  с)

$$\mathbf{A}_d = \begin{pmatrix} \cosh h & \sinh h \\ -\sinh h & \cosh h \end{pmatrix}; \mathbf{b}_d = \begin{pmatrix} 1 - \cosh h \\ \sinh h \end{pmatrix}.$$

Матрица (обратного) грамиана управляемости

$$\mathbf{W}_c^{-1}(T) = \begin{pmatrix} \frac{2(\cos T \sin T + T)}{-\sin^2 T \cos^2 T + T^2 - \sin^4 T} & \frac{2\sin^2 T}{-\sin^2 T \cos^2 T + T^2 - \sin^4 T} \\ \frac{2\sin^2 T}{-\sin^2 T \cos^2 T + T^2 - \sin^4 T} & \frac{2(-\cos T \sin T + T)}{-\sin^2 T \cos^2 T + T^2 - \sin^4 T} \end{pmatrix}.$$

Замечаем, что данная матрица содержит элементы, являющиеся периодическими функциями интервала прогноза грамиана  $T$ . Эта особенность приводит к тому, что, в отличие от систем с вещественными собственными значениями матрицы  $\mathbf{A}$  (двойной интегратор и т. п.), где присутствует монотонное изменение спектральной нормы  $\|\mathbf{Z}\tilde{\mathbf{A}}_d(\alpha(k))\mathbf{Z}^{-1}\|_s$ ,  $i = 1, \dots, p$ , от уровня насыщения управления  $\alpha \in [\alpha_{\min}, 1]$ , здесь, в общем случае, такого изменения не наблюдается. Анализ показал, что наилучшим решением (с соблюдением требования монотонности) для выбора интервалов прогнозирования  $T \in [0, \dots, 12]$  с грамиана управляемости будут следующие значения:  $T = \pi/2[7 \ 5 \ 3 \ 1 \ 0,7]$  с (предполагается пять участков прогноза грамиана). На рис. 1 для осциллятора представлены зависимости спектральной нормы  $\|\mathbf{Z}\tilde{\mathbf{A}}_d(\alpha(k))\mathbf{Z}^{-1}\|_s$ ,  $i = 1, \dots, p$ , от уровня насыщения управления. На рис. 2 представлены результаты моделирования для осциллятора с  $\mathbf{x}_0 = (4 \ 4)^T$  и  $t_u = [0,20 \ 0,17 \ 0,13 \ 0,08 \ 0,05]$  с (алгоритм 2, уровень переключения  $V_0 = 1,2$ ). Максимальные уровни насыщения по участкам  $\alpha_{\min} = [0,01 \ 0,04 \ 0,1 \ 0,2 \ 0,3]$ . Для сравнения там же приведены графики координат состояния и управления, полученные при решении задачи быстродействия по принципу максимума с теми же начальными условиями.

Начальное состояние $x(0)$	Принцип максимума		Метод МПУ		$\Delta t\% = \frac{t_{\min} - t_{stab}}{t_{\min}} \cdot 100\%$
	$t_{\min}(c)$	$\ u\ _{pm}^2$	$t_{stab}(c)$	$\ u\ _{MPC}^2$	
$[1 \ 1]^T$	3,14	3,14	3,92	2,27	24,8
$[5 \ 1]^T$	8,10	8,10	9,18	8,05	13,3
$[-2 \ 0]^T$	3,14	3,14	3,38	2,96	8,0
$[1 \ 4]^T$	6,30	6,30	6,68	6,33	6,0
$[-1 \ 2]^T$	3,40	3,40	4,58	3,05	34,7

В таблице представлены результаты сравнения решения задач стабилизации для осциллятора по методу МПУ с переключениями (синтез управления, все решения получены с *одним и тем же* набором параметров) и быстродействия по принципу максимума при различных начальных условиях, расположенных в эллипсоиде  $E(7\pi/2; 6,3) = \{x \in R^2 : x^T \mathbf{W}_c^{-1}(7\pi/2)x \leq 6,3\}$ . Видно, что время стабилизации  $t_{stab}$  (определяется условием  $\|x(t_{stab})\| \leq 0,05$ ) отличается от времени максимального быстродействия не более чем на 35 %.

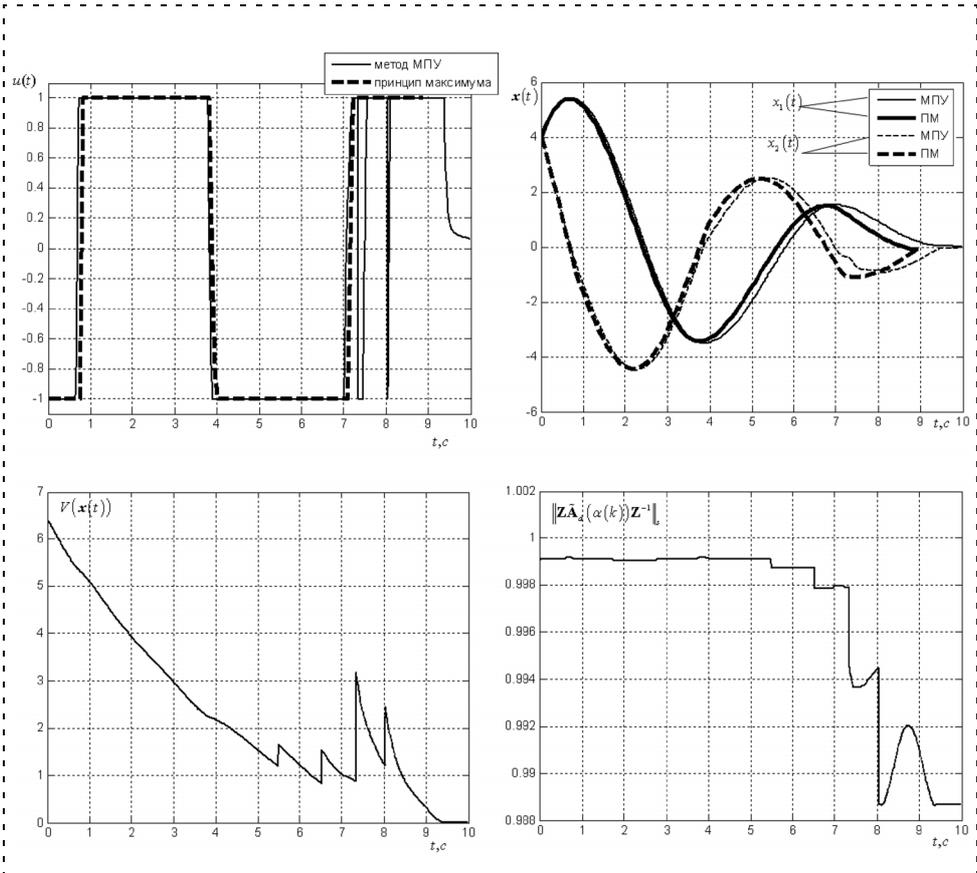


Рис. 2. Сравнение результатов моделирования при управлении осциллятором по методу МПУ и принципу максимума: а — графики управления; б — координаты состояния; в — кусочно-квадратичная функция Ляпунова  $V(x(t))$ ; г — график изменения спектральной нормы  $\|\mathbf{Z}\tilde{\mathbf{A}}_d(\alpha(k))\mathbf{Z}^{-1}\|_s$

### Заключение

В статье рассмотрены вопросы применения метода МПУ с грамиановзвешиванием к приближенному решению задачи быстродействия. Исследуются причины малоэффективного управления и затяжной стабилизации. Показано, что для повышения быстродействия необходимо вводить переключения в параметрах МПУ-управления: предложено три алгоритма переключения. Представлены условия устойчивости при ограниченном управле-

нии, для чего используется кусочно-квадратичная функция Ляпунова.

### Список литературы

1. **Краснощеченко В. И.** Геометрические методы анализа и синтеза нестационарных систем // Нестационарные системы автоматического управления: анализ, синтез и оптимизация / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М.: Издательство МГТУ, 2007. 632 с. (С. 339—398).
2. **Андреев Ю. Н.** Управление конечномерными линейными объектами. М.: Наука, 1976. 404 с.

УДК 681.513.3

**Н. Н. Макаров**, д-р техн. наук, проф.,  
**В. Е. Семашкин**, аспирант,  
Тулский государственный университет

## Предельно достижимая точность линейных следящих систем

*Сформулирована задача о предельно достижимой точности слежения на множестве входных сигналов, которая решена для линейных объектов. Предложен закон управления, обеспечивающий высокую гарантированную точность слежения. Рассмотрен пример использования полученных результатов для управления силовым следящим приводом.*

**Ключевые слова:** следящая система, линейная система, оптимальное управление, оптимальная точность, следящий привод, гидравлический привод.

### Постановка задачи о предельно достижимой точности

Важным классом систем автоматического управления являются следящие системы, которые должны воспроизводить заранее не известный входной сигнал. Ключевым этапом проектирования таких систем является синтез регулятора для заданного объекта управления. Объект рассматривается как неизменная часть, и именно за счет выбора одного из допустимых регуляторов необходимо обеспечить требования по точности слежения.

Очевидно, что динамика объекта накладывает определенные ограничения на динамику всей системы. Иными словами, для заданного объекта управления и заданного множества возможных входных сигналов существует предельно достижимая точность, превзойти которую невозможно ни при каком допустимом регуляторе.

Точность слежения на классе возможных входных сигналов стали исследовать недавно. Одним из подходов к решению этой проблемы является метод гарантированной точности (ГТ) [1]. Но ранее в его рамках вопрос о предельно достижимой точности

не поднимался. Поэтому представляется практически полезным вычислить значение минимально возможной ГТ для заданного объекта и класса сигналов, а также закон управления, обеспечивающий такое значение ГТ.

В методе ГТ источником входного сигнала для следящей системы является задающее устройство (ЗУ), динамика которого определяет класс входных сигналов. Система вместе с ЗУ называется расширенной.

Разомкнутая расширенная система состоит из ЗУ и объекта управления (рис. 1, а). У разомкнутой системы два входа (вход ЗУ и вход объекта управления) и один выход — ошибка слежения. Задачей регулирования является подача на вход объекта управляющего сигнала  $u$ , минимизирующего абсолютную величину ошибки слежения  $|y|$ . Регулятором будем называть устройство, вырабатывающее сигнал  $u$  на основе измерений состояния объекта и ЗУ. Систему из ЗУ, объекта и регулятора будем называть замкнутой (рис. 1, б).

Известно [1], что для стационарной системы, начинающей движение из положения равновесия, достаточно исследовать ошибку только в конечный момент времени. Входной сигнал ЗУ  $v$ , при котором достигается предельное значение ошибки, зависит как от динамики объекта, так и от закона управления. Поэтому процесс можно рассматривать как

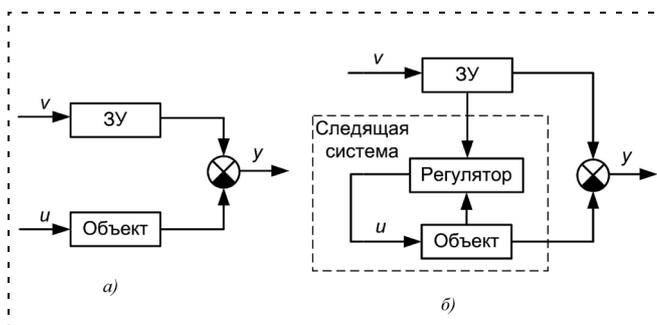


Рис. 1. Разомкнутая (а) и замкнутая (б) расширенные системы

антагонистическую игру двух противников, которые распоряжаются управляющими сигналами  $u$  и  $v$ . Первый стремится минимизировать ошибку, его закон управления известен заранее и реализован регулятором. Второй стремится максимизировать ошибку, его закон управления заранее не известен. Будем называть стороны "регулятор" и "противник".

Неопределенность действий противника является первым фактором, существенно ограничивающим точность слежения. Поскольку невозможно однозначно предсказать состояние системы на следующем шаге, то невозможно и гарантировать нулевую ошибку.

Формализуем задачу. Будем считать, что разомкнутая расширенная система описана дискретной по времени моделью

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= F(x_k, u_k, v_k); \\ y_k &= Cx_k, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x$  — состояние расширенной системы;  $k$  — дискретное время (номер шага);  $C$  — вектор-строка постоянных коэффициентов соответствующей размерности. Будем также считать, что возможности сторон по выбору управляющих сигналов ограничены замкнутыми множествами:

$$v_k \in V; \quad (2)$$

$$u_k \in U. \quad (3)$$

Ограничение на управление объекта (3) фактически задает класс допустимых регуляторов. Множество траекторий объекта, реализуемых такими регуляторами, может не покрывать множество входных сигналов. Это второй фактор, существенно ограничивающий точность слежения.

Пусть  $g_0(x)$  — абсолютная величина ошибки слежения в начальном положении:

$$g_0(x) = |Cx|. \quad (4)$$

Пусть также  $g_m(x)$  — минимальная абсолютная величина ошибки, которую регулятор может достичь независимо от действий противника (минимальная гарантированная ошибка) через  $m$  шагов при движении из начального состояния  $x$ .

Рассмотрим отдельно первый шаг и остальные  $(m - 1)$  шагов. Предположим, на первом шаге регулятором выбрано управление  $u$ . Если противник выберет управление  $v$ , то согласно уравнению динамики (1) система перейдет в состояние  $F(x, u, v)$ . Наибольшая ошибка, которую противник сможет обеспечить из этого состояния за оставшиеся  $(m - 1)$  шагов, с учетом ограничения управления  $v$  (2) составляет

$$g'_{m-1}(x, u) = \max_{v \in V} g_{m-1}(F(x, u, v)). \quad (5)$$

Для этого противнику на первом шаге надо выбрать управление  $v(x, u)$ , при котором достигается данный максимум.

Тогда минимальное гарантированное отклонение в конце процесса, с учетом ограничения управления  $u$  (3), составит

$$\begin{aligned} g_m(x) &= \min_{u \in U} g'_{m-1}(x, u) = \\ &= \min_{u \in U} (\max_{v \in V} g_{m-1}(F(x, u, v))). \end{aligned} \quad (6)$$

Соответственно, регулятор должен выбирать управление  $u(x)$ , при котором достигается этот минимум.

Минимально возможная ГТ в процессе длительностью  $m$  шагов составит (по определению ГТ)

$$ГТ_m^{\min} = g_m(0). \quad (7)$$

### Минимальное гарантированное отклонение линейной системы

Рассмотрим случай, когда динамика системы линейна:

$$F(x, u, v) = \Phi x + H_u u + H_v v, \quad (8)$$

где  $\Phi$ ,  $H_u$ ,  $H_v$  — матрицы постоянных коэффициентов соответствующих размерностей.

Пусть множества возможных управлений (2), (3) имеют вид

$$|v_k| \leq 1; \quad (9)$$

$$|u_k| \leq 1. \quad (10)$$

Тогда уравнение (6) для минимального гарантированного отклонения при движении из состояния  $x$  через  $m$  шагов примет вид

$$g_m(x) = \min_{|u| \leq 1} (\max_{|v| \leq 1} g_{m-1}(\Phi x + H_u u + H_v v)). \quad (11)$$

Вместе с начальным условием для  $g_0$  (4) это уравнение, как будет показано ниже, имеет единственное решение

$$\begin{aligned} g_m(x) &= \\ &= \max \left\{ \begin{aligned} &\max_{j=0 \dots m-1} |C\Phi^j H_u| + \sum_{i=0}^j |C\Phi^i H_v| - |C\Phi^i H_u|; \\ &|C\Phi^m x| + \sum_{i=0}^{m-1} |C\Phi^i H_v| - |C\Phi^i H_u| \end{aligned} \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

Данное предельное отклонение может быть достигнуто при следующих законах управления:

$$v_m(x) = \begin{cases} \text{sign} \frac{C\Phi^m x}{C\Phi^{m-1} H_v}, & \text{если } C\Phi^{m-1} H_v \neq 0 \\ \text{и } |C\Phi^m x| > |C\Phi^{m-1} H_u|; \\ \pm 1 \text{ произвольно,} & \text{если } C\Phi^{m-1} H_v \neq 0 \\ \text{и } |C\Phi^m x| \leq |C\Phi^{m-1} H_u|; \\ \text{произвольно,} & \text{если } C\Phi^{m-1} H_v = 0; \end{cases} \quad (13)$$

$$u_m(x) = \begin{cases} -\text{sign} \frac{C\Phi^m x}{C\Phi^{m-1} H_u}, & \text{если } C\Phi^{m-1} H_u \neq 0 \\ \text{и } |C\Phi^m x| > |C\Phi^{m-1} H_u|; \\ -\frac{C\Phi^m x}{C\Phi^{m-1} H_u}, & \text{если } C\Phi^{m-1} H_u \neq 0 \\ \text{и } |C\Phi^m x| \leq |C\Phi^{m-1} H_u|; \\ \text{произвольно,} & \text{если } C\Phi^{m-1} H_u = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Минимально возможная ГТ такой системы составит

$$\Gamma_m^{\min} = \max_{j=0 \dots m-1} \left\{ |C\Phi^j H_u| + \sum_{i=0}^j |C\Phi^i H_v| - |C\Phi^i H_u| \right\}. \quad (15)$$

**Доказательство.**

Докажем формулы (12)–(14). Перепишем формулу гарантированной ошибки (12) в виде

$$g_m(x) = \max \left\{ \max_{j=0 \dots m-1} S_j; |C\Phi^m x| + S_{m-1} - |C\Phi^{m-1} H_u| \right\}, \quad (16)$$

где

$$S_j = |C\Phi^j H_u| + \sum_{i=0}^j |C\Phi^i H_v| - |C\Phi^i H_u|. \quad (17)$$

Будем вести доказательство по индукции.

Покажем, что формулы (13), (14), (16) справедливы при  $m = 1$ . По формулам для  $g$  (4), (11) имеем предельное отклонение через один шаг

$$g_1(x) = \min_{|u| \leq 1} (\max_{|v| \leq 1} |C\Phi x + CH_u u + CH_v v|). \quad (18)$$

Вычислим внутренний максимум уравнения (18):

$$\max_{|v| \leq 1} |C\Phi x + CH_u u + CH_v v| = |C\Phi x + CH_u u| + |CH_v|. \quad (19)$$

Это значение может быть достигнуто при следующей одношаговой стратегии противника:

$$v_1(x, u) = \begin{cases} \text{sign} \frac{C\Phi x + CH_u u}{CH_v}, & \text{если } CH_v \neq 0 \\ \text{и } C\Phi x + CH_u u \neq 0; \\ \pm 1 \text{ произвольно,} & \text{если } CH_v \neq 0 \\ \text{и } C\Phi x + CH_u u = 0; \\ \text{произвольно,} & \text{если } CH_v = 0; \end{cases} \quad (20)$$

Уравнение для  $g_1$  (18) с учетом (19) примет вид

$$g_1(x) = \min_{|u| \leq 1} |C\Phi x + CH_u u| + |CH_v|. \quad (21)$$

Вычисляя минимум по  $u$  в выражении (21), получаем

$$g_1(x) = \max \left\{ |CH_v|; |C\Phi x| - |CH_u| + |CH_v| \right\} = \max \left\{ S_0; |C\Phi x| + S_0 - |CH_u| \right\}. \quad (22)$$

Это значение может быть достигнуто при следующей одношаговой стратегии регулятора:

$$u_1(x) = \begin{cases} -\text{sign} \frac{C\Phi x}{CH_u}, & \text{если } CH_u \neq 0 \text{ и } |C\Phi x| > |CH_u|; \\ -\frac{C\Phi x}{CH_u}, & \text{если } CH_u \neq 0 \text{ и } |C\Phi x| \leq |CH_u|; \\ \text{произвольно,} & \text{если } CH_u = 0. \end{cases} \quad (23)$$

Подставив стратегию регулятора (23) в стратегию противника (20), последнюю можно представить в форме, не зависящей явно от  $u$ :

$$v_1(x) = \begin{cases} \text{sign} \frac{C\Phi x}{CH_v}, & \text{если } CH_v \neq 0 \text{ и } |C\Phi x| > |CH_u|; \\ \pm 1 \text{ произвольно,} & \text{если } CH_v \neq 0 \\ \text{и } |C\Phi x| \leq |CH_u|; \\ \text{произвольно,} & \text{если } CH_v = 0. \end{cases} \quad (24)$$

Формулы (23), (22), (24) совпадают с формулами (14), (16), (13) соответственно для  $m - 1$ . Таким образом, база индукции доказана.

Предположим, что формулы (13), (14), (16) справедливы для любого  $m$ -шагового процесса. Перепишем уравнение предельной ошибки  $g$  (11) для  $m + 1$  шагов:

$$g_{m+1}(x) = \min_{|u| \leq 1} (\max_{|v| \leq 1} g_m(\Phi x + H_u u + H_v v)). \quad (25)$$

Согласно гипотезе индукции, для  $g_m$  справедлива формула (16). Подставляя (16) в (25), получаем

$$g_{m+1}(x) = \min_{|u| \leq 1} \left( \max \left\{ \max_{j=0 \dots m-1} S_j; \max_{|v| \leq 1} |C\Phi^m(\Phi x + H_u u + H_v v)| + S_{m-1} - |C\Phi^{m-1} H_u| \right\} \right). \quad (26)$$

Значение внутреннего максимума по  $v$  вновь легко вычисляется аналитически, и формулу (26) можно записать в виде

$$g_{m+1}(x) = \max \left\{ \max_{j=0 \dots m-1} S_j; \min_{|u| \leq 1} |C\Phi^{m+1} x + C\Phi^m H_u u| + |C\Phi^m H_v| + S_{m-1} - |C\Phi^{m-1} H_u| \right\}. \quad (27)$$

Такое предельное отклонение может быть достигнуто при следующей стратегии противника

$$v_{m+1}(x, u) = \begin{cases} \text{sign} \frac{C\Phi^{m+1}x + C\Phi^m H_u u}{C\Phi^m H_v}, & \text{если} \\ C\Phi^m H_v \neq 0 \text{ и } C\Phi^{m+1}x + C\Phi^m H_u u \neq 0; & (28) \\ \pm 1 \text{ произвольно, если } C\Phi^m H_v \neq 0 \\ \text{и } C\Phi^{m+1}x + C\Phi^m H_u u = 0; \\ \text{произвольно, если } C\Phi^m H_v = 0. \end{cases}$$

Раскрываем минимум по  $u$  в формуле (27):

$$\min_{|u| \leq 1} |C\Phi^{m+1}x + C\Phi^m H_u u| = \max \left\{ \begin{array}{l} 0; \\ |C\Phi^{m+1}x| - |C\Phi^m H_u| \end{array} \right\}. \quad (29)$$

Такое значение может быть достигнуто при стратегии регулятора

$$u_{m+1}(x) = \begin{cases} -\text{sign} \frac{C\Phi^{m+1}x}{C\Phi^m H_u}, & \text{если } C\Phi^m H_u \neq 0 \\ \text{и } |C\Phi^{m+1}x| > |C\Phi^m H_u|; \\ -\frac{C\Phi^{m+1}x}{C\Phi^m H_u}, & \text{если } C\Phi^m H_u \neq 0 \\ \text{и } |C\Phi^{m+1}x| \leq |C\Phi^m H_u|; \\ \text{произвольно, если } C\Phi^m H_u = 0. \end{cases} \quad (30)$$

Подставляя (29) обратно в формулу для  $g_{m+1}$  (27), с учетом того, что  $|C\Phi^m H_v| + S_{m-1} - |C\Phi^{m-1} H_u| = S_m$ , получаем окончательный результат для гарантированного предельного отклонения:

$$g_{m+1}(x) = \max \left\{ \begin{array}{l} \max_{j=0 \dots m} S_j; \\ |C\Phi^{m+1}x| + S_m - |C\Phi^m H_u| \end{array} \right\}. \quad (31)$$

С учетом стратегии регулятора (30) стратегию противника (28) вновь можно получить в виде, явно зависящем только от состояния:

$$v_{m+1}(x) = \begin{cases} \text{sign} \frac{C\Phi^{m+1}x}{C\Phi^m H_v}, & \text{если } C\Phi^m H_v \neq 0 \\ \text{и } |C\Phi^{m+1}x| > |C\Phi^m H_u|; \\ \pm 1 \text{ произвольно, если } C\Phi^m H_v \neq 0 \\ \text{и } |C\Phi^{m+1}x| \leq |C\Phi^m H_u|; \\ \text{произвольно, если } C\Phi^m H_v = 0. \end{cases} \quad (32)$$

Формулы (29), (31), (32) совпадают с формулами (14), (16), (13) соответственно для числа шагов  $m+1$ , что и требовалось доказать.

### Оптимальный по предельному отклонению регулятор

Формула (14) задает закон управления регулятора  $u(x)$ , оптимальный по отклонению в конечный момент времени. Отметим, что этот закон не стационарен, он явно зависит от числа шагов до конца процесса  $m$ . А значит, предельное отклонение системы, замкнутой таким регулятором, будет достигаться не обязательно в конечный момент времени.

Рассмотрим пример. Объектом управления будет линейная модель следящего гидропривода четвертого порядка [2]. Привод должен отслеживать сигналы из множества, описанного ЗУ третьего порядка. Структурная схема линейной разомкнутой расширенной системы приведена на рис. 2.

Система дискретизирована с тактом квантования 0,01 с. На вход ЗУ поступает синусоида единичной амплитуды с частотой 1,26 рад/с. На вход привода поступает управление, вычисляемое по формуле (14). На рис. 3 приведены графики этого управления, а также выходных сигналов ЗУ и привода.

Из рис. 3 видно, что регулятор, как и ожидалось, в конечный момент времени минимизирует рассогласование между ЗУ и объектом управления. Но в силу больших ошибок в переходном процессе такой регулятор непригоден для следящей системы.

Тем не менее, на основе этого результата можно разработать стационарный регулятор, обеспечивающий хорошее значение ГТ. Поскольку закон управления (14) позволяет получить высокую точность в конце процесса ( $m \rightarrow 0$ ), то имеет смысл все время придерживаться закона, соответствующего некоторой малой константе  $m$ , такой чтобы управление

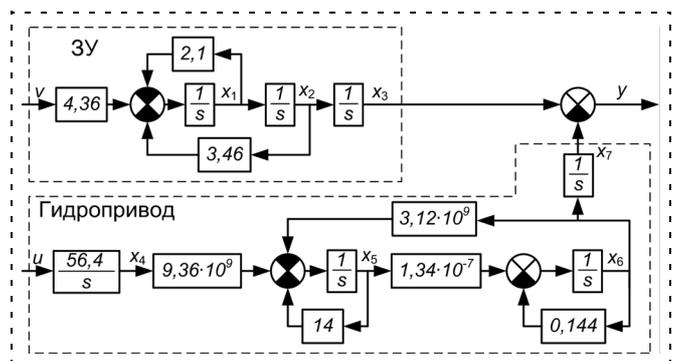


Рис. 2. Пример следящей системы

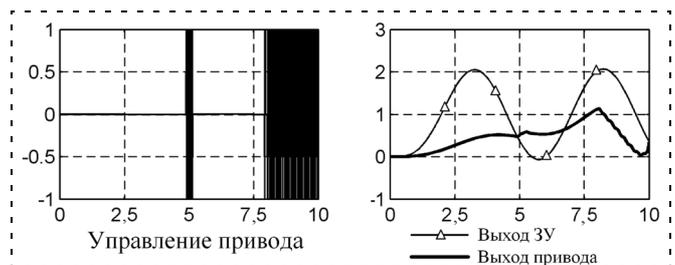


Рис. 3. Движение системы с оптимальным регулятором

было определено однозначно ( $C\Phi^{m-1}H_u \neq 0$ ). Такой регулятор можно реализовать линейными обратными связями с единичным ограничением на выходе:

$$u(x) = \begin{cases} \text{sign}(rx), & \text{если } |rx| > 1; \\ rx, & \text{если } |rx| \leq 1; \end{cases} \quad (33)$$

$$r = -\frac{C\Phi^m}{C\Phi^{m-1}H_u}.$$

Практически интересна ситуация, когда ни при каком входном сигнале из заданного класса ограничение управляющего воздействия не достигается. Для проверки данного факта необходимо рассмотреть систему, замкнутую чисто линейным регулятором

$$u(x) = rx. \quad (34)$$

Уравнение замкнутой системы тогда имеет вид

$$x_{k+1} = (\Phi + H_u r)x_k + H_v v_k. \quad (35)$$

Предельное отклонение управления в такой системе составит

$$u_{\text{пред}} = \sum_{i=0}^{\infty} |r(\Phi + H_u r)^i H_v|. \quad (36)$$

Если предельное отклонение управления меньше максимально допустимого значения ( $u_{\text{пред}} < 1$ ), то ограничитель никогда не сработает, и дальше можно анализировать только полностью линейную систему (35). Гарантированная точность замкнутой системы в этом случае составит

$$\Gamma T = \sum_{i=0}^{\infty} |C(\Phi + H_u r)^i H_v|. \quad (37)$$

Применим закон управления (34) к приводу (см. рис. 2). На рис. 4 приведены зависимости ГТ и предельного отклонения управления  $u_{\text{пред}}$  замкнутой системы от параметра  $m$ .

Из рис. 4 видно, что единичное ограничение по управлению не достигается, и регулятор работает в линейной зоне. При этом обеспечивается высокая точность слежения, ухудшающаяся с ростом параметра  $m$ . Следует отметить, что при  $m = 1$  замкнутая система неустойчива.

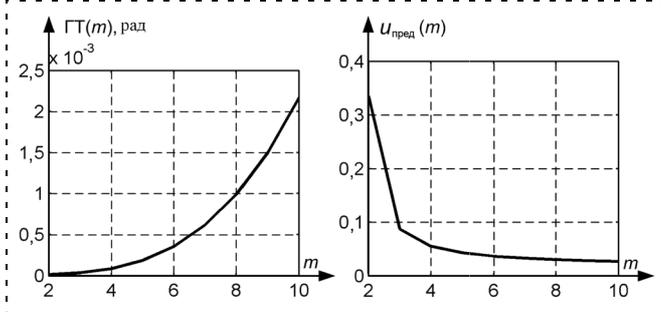


Рис. 4. Зависимость свойств замкнутой системы от параметра  $m$

### Системы с непрерывным временем

Полученные результаты можно обобщить на случай непрерывной по времени системы. Пусть разомкнутая расширенная система описана дифференциальными уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_u u + B_v v; \\ y &= Cx. \end{aligned} \quad (38)$$

Если на ее входах установить экстраполяторы нулевого порядка с тактом  $\tau$ , то состояния в моменты квантования можно описать дискретной системой (1), (8). Ее параметры связаны с параметрами непрерывной системы (38) следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \Phi &= e^{A\tau}; \\ H_u &= \int_0^{\tau} e^{At} B_u dt \approx B_u \tau; \\ H_v &= \int_0^{\tau} e^{At} B_v dt \approx B_v \tau. \end{aligned} \quad (39)$$

Для этой системы будут справедливы формулы предельно достижимой точности и законов управления (12)–(14). Динамика такой системы будет стремиться к динамике непрерывной системы при стремлении такта квантования к нулю. Поэтому выполним в формулах (12)–(14) предельный переход  $\tau \rightarrow 0$ . Вместо числа шагов до конца процесса  $m$  будем рассматривать время до конца процесса  $T$ :

$$\begin{aligned} T &= m\tau; \\ \Phi^m &= e^{AT}. \end{aligned} \quad (40)$$

Вычислим минимальное гарантированное отклонение из состояния  $x$  через время  $T$ . Из формул (39) и (40) следует, что

$$\begin{aligned} \lim_{\tau \rightarrow 0^+} \sum_{i=0}^j |C\Phi^i H_v| - |C\Phi^i H_u| &= \\ &= \int_0^{\theta} |Ce^{At} B_v| - |Ce^{At} B_u| dt, \quad \theta = j\tau; \\ \lim_{\tau \rightarrow 0^+} |C\Phi^j H_u| &= 0; \\ \lim_{\tau \rightarrow 0^+} \sum_{i=0}^{m-1} |C\Phi^i H_v| - |C\Phi^i H_u| &= \int_0^T |Ce^{At} B_v| - |Ce^{At} B_u| dt. \end{aligned} \quad (41)$$

Подставляя (41) в выражение для предельного отклонения дискретной системы (12), получаем выражение для непрерывной системы

$$g(x, T) = \max \left\{ \begin{aligned} &\max_{0 \leq \theta \leq T} \int_0^{\theta} |Ce^{At} B_v| - |Ce^{At} B_u| dt; \\ &|Ce^{AT} x| + \int_0^T |Ce^{At} B_v| - |Ce^{At} B_u| dt, \end{aligned} \right\}. \quad (42)$$

Аналогично вычисляем законы управления стон. Из формул (39) и (40) следует, что

$$\lim_{\tau \rightarrow 0^+} \frac{C\Phi^m x}{C\Phi^{m-1} H} = \begin{cases} +\infty, & \text{если } \frac{Ce^{AT}x}{Ce^{AT}B} > 0; \\ 0, & \text{если } \frac{Ce^{AT}x}{Ce^{AT}B} = 0; \\ -\infty, & \text{если } \frac{Ce^{AT}x}{Ce^{AT}B} < 0. \end{cases} \quad (43)$$

где  $H$  и  $B$  — либо пара  $H_v$  и  $B_v$ , либо  $H_u$  и  $B_u$ .

Подставляя (43) в дискретные законы (13) и (14), получаем оптимальные законы управления непрерывной системы

$$v(x, T) = \begin{cases} \text{sign} \frac{Ce^{AT}x}{Ce^{AT}B_v}, & \text{если } Ce^{AT}B_v \neq 0 \text{ и } |Ce^{AT}x| > 0; \\ \pm 1 \text{ произвольно,} & \text{если } Ce^{AT}B_v \neq 0 \\ \text{и } |Ce^{AT}x| = 0; \\ \text{произвольно,} & \text{если } Ce^{AT}B_v = 0; \end{cases} \quad (44)$$

$$u(x, T) = \begin{cases} -\text{sign} \frac{Ce^{AT}x}{Ce^{AT}B_u}, & \text{если } Ce^{AT}B_u \neq 0; \\ \text{произвольно,} & \text{если } Ce^{AT}B_u = 0. \end{cases} \quad (45)$$

Закон управления (45) повторяет основные свойства закона управления (14). Он не стационарен, и предельное отклонение системы, замкнутой таким регулятором, достигается не обязательно в конечный момент времени.

Так же, как и в случае дискретной системы, в законе управления (45) можно рассмотреть параметр  $T$  просто как малую константу, такую что  $Ce^{AT}B_u \neq 0$ . Тогда получится стационарный релейный регулятор

$$r = -\frac{Ce^{AT}}{Ce^{AT}B_u}; \quad (46)$$

$$u = \text{sign}(rx).$$

Можно показать, что если на поверхности переключения выполняется условие

$$|rAx + rB_v v| < -rB_u, \quad (47)$$

то в системе возможно движение в скользящем режиме. Упростить исследование системы в этом режиме можно путем замены релейного управления на эквивалентное линейное управление

$$u^{\text{э}} = -\frac{rA}{rB_u}x - \frac{rB_v}{rB_u}v. \quad (48)$$

В методе ГТ предполагается, что система движется из нулевых начальных условий, т. е. с поверхности переключения. Поэтому возможен и представляется практически интересным случай, когда ни при каком входном сигнале из заданного класса срыв скользящего режима не происходит. Для проверки данного факта необходимо рассмотреть систему, замкнутую эквивалентным управлением. Ее уравнение имеет вид

$$\dot{x} = \left(A - \frac{B_u r A}{r B_u}\right)x + \left(B_v - \frac{B_u r B_v}{r B_u}\right)v. \quad (49)$$

Предельное отклонение эквивалентного управления в такой системе составляет

$$u_{\text{пред}}^{\text{э}} = \int_0^{\infty} \left| \frac{rA}{rB_u} \left(A - \frac{B_u r A}{r B_u}\right)^t \left(B_v - \frac{B_u r B_v}{r B_u}\right) \right| dt + \left| \frac{rB_v}{rB_u} \right|. \quad (50)$$

Если предельное отклонение эквивалентного управления в замкнутой системе меньше полки реле ( $u_{\text{пред}}^{\text{э}} < 1$ ), то срыв режима невозможен, и эквивалентное управление можно использовать для вычисления ГТ:

$$\text{ГТ} = \int_0^{\infty} \left| C \left(A - \frac{B_u r A}{r B_u}\right)^t \left(B_v - \frac{B_u r B_v}{r B_u}\right) \right| dt. \quad (51)$$

Качественно закон управления (46) повторяет результаты для дискретной системы. Предельное отклонение эквивалентного управления уменьшается с ростом параметра  $T$ , обеспечивается высокая точность слежения, ухудшающаяся с ростом  $T$ .

Факту ухудшения точности с ростом параметра  $T$  можно дать простую трактовку. Если нет срывов скользящего режима, то система все время движется по поверхности переключения, т. е. выполняется  $Ce^{AT}x = 0$ . При малых величинах  $T$  это условие близко к условию идеального слежения  $Sx = 0$ . С ростом  $T$  поверхность переключения, наоборот, отделяется от плоскости  $Sx = 0$ . Поэтому для обеспечения наилучшей точности следует выбирать минимально возможное значение  $T$ , при котором движение еще происходит в скользящем режиме.

#### Список литературы

1. Макаров Н. Н. Метод гарантированной точности следящих систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 11. С. 21–26.
2. Фалдин Н. В., Васютин Е. В. Оптимизация по быстродействию объемного силового гидропривода, работающего от автономного источника энергии // Мехатроника, автоматизация и управление. 2004. № 5. С. 23–28.

УДК 681.51.015

**А. А. Бобцов**, д-р техн. наук, проф.,  
**А. С. Кремлев**, канд. техн. наук, доц.,  
 СПбГУ ИТМО

## Алгоритм компенсации неизвестного синусоидального возмущения для линейного неминимально-фазового объекта

*Предлагается новый алгоритм компенсации параметрически неопределенного синусоидального возмущения, действующего на линейный неминимально-фазовый объект. Усиливая ряд известных результатов, в данной работе рассматривается случай компенсации возмущения, когда измеряются только выходная переменная и сигнал управления, а относительная степень объекта может быть любой.*

**Ключевые слова:** адаптивное управление, компенсация возмущений, управление по выводу.

### Введение

В данной статье развиваются алгоритмы компенсации параметрически неопределенного синусоидального возмущения  $\delta(t) = \sigma \sin \omega t$ , рассмотренные в [1–3]. В статье [1] для линейного устойчивого объекта с известными параметрами предлагается компенсирующий возмущение регулятор размерности  $(2n + 6)$ . Полученный в [1] алгоритм сложен в реализации, и для его построения требуется много вычислений, а также знание нижней границы параметра  $\omega$  гармонического возмущающего воздействия. Также в [1] предполагается, что линейный объект управления имеет единичную относительную степень, что, в свою очередь, сужает применимость алгоритма [1] для более широкого класса систем. В развитие подхода [1], в статье [2] предлагается регулятор размерности  $(n + 4)$ , обладающий более простой структурой (в сравнении с [1]) и не предусматривающий при своем построении знания нижней границы параметра  $\omega$ . Однако в [2] так же, как и в [1], относительная степень объекта управления равна единице, и параметры самого объекта являются известными. В [3] предложен алгоритм компенсации гармонического возмущающего воздействия для случая параметрически неопределенного, но строго минимально-фазового линейного объекта. Алгоритм, предложенный в [3], проще по структуре и меньше по размерности в сравнении с опубликованными в [1, 2]. Также следует отметить, что в отличие от [1, 2], в [3] предполагается, что объект управления может быть неустойчивым, а его параметры неизвестны (в [1, 2] рассматривались только

асимптотически устойчивые объекты с известными параметрами).

В этой статье будет предложен алгоритм компенсации параметрически неопределенного гармонического возмущения, действующего на линейный неминимально-фазовый объект управления (в отличие от [2, 3]), относительная степень которого может быть любой (в отличие от [1–3]).

### Постановка задачи

Как и в работах [1, 2], рассмотрим линейный объект вида

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + g(u(t) + \delta(t)), y(t) = h^T x(t), \quad (1)$$

где вектор переменных состояния  $x(t) \in R^n$  не изменяется;  $u(t)$  — скалярный сигнал управления,  $y(t)$  — скалярная регулируемая переменная.

Входное возмущение  $\delta(t)$  представлено в виде синусоидальной функции

$$\delta(t) = \sigma \sin \omega t$$

с неизвестными амплитудой  $\sigma$  и частотой  $\omega$ .

Наряду с моделью вход—состояние—выход (1) рассмотрим модель вход—выход вида

$$y(t) = \frac{b(p)}{a(p)} (u(t) + \delta(t)), \quad (2)$$

где  $p = d/dt$ ;  $a(p) = p^n + a_{n-1}p^{n-1} + \dots + a_1p + a_0$  и  $b(p) = b_m p^m + \dots + b_1p + b_0$ ,  $m < n$  — соответствующие полиномы, полученные в результате перехода от модели вход—состояние—выход к модели вход—выход

$$\frac{b(p)}{a(p)} = h(pI - F)^{-1}g.$$

Рассмотрим следующие допущения относительно системы (1), (2).

- Будем полагать, что измеряются только сигналы  $y(t)$  и  $u(t)$ .
- Коэффициенты матриц  $F$ ,  $g$  и  $h$  известны.
- Пара  $F$ ,  $g$  полностью управляема и пара  $F$ ,  $h$  полностью наблюдаема.
- Полином  $a(p)$  гурвицев.
- Полином  $b(p)$  может быть не гурвицевым и не имеет корней  $\pm j\omega$ , где  $\omega$  — частота возмущающего воздействия.

Сформулируем задачу как задачу синтеза закона управления, обеспечивающего при любых начальных состояниях объекта выполнение условия

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 0. \quad (3)$$

### Синтез закона управления

Легко показать, что в силу гурвицевости матрицы  $F$  цель (3) будет достигнута при выборе сигнала управления

$$u(t) = -\delta(t). \quad (4)$$

Однако переменная  $\delta(t)$  не измеряется и, следовательно, закон управления (4) не реализуем. Выберем закон управления в виде

$$u(t) = -\hat{\delta}(t), \quad (5)$$

где функция  $\hat{\delta}(t) = \hat{\sigma} \sin \hat{\omega} t$  является оценкой возмущения  $\delta(t) = \sigma \sin \omega t$ , а  $\hat{\sigma}$  и  $\hat{\omega}$  — оценки, соответственно, параметров  $\sigma$  и  $\omega$ .

Таким образом, требуется построить наблюдатель, обеспечивающий оценку неизвестного возмущения  $\delta(t)$ . Решение задачи синтеза наблюдателя возмущающего воздействия  $\delta(t) = \sigma \sin \omega t$  представлено в следующем разделе.

### Синтез наблюдателя возмущения

Для синтеза наблюдателя возмущающего воздействия  $\delta(t) = \sigma \sin \omega t$  потребуется идентификация параметров  $\sigma$  и  $\omega$ . Сначала построим идентификатор параметра  $\omega$ . Для этого преобразуем уравнение (2) следующим образом:

$$y(t) - \frac{b(p)}{a(p)} u(t) = \frac{b(p)}{a(p)} \delta(t) = \sigma \frac{b(p)}{a(p)} \sin \omega t. \quad (6)$$

Обозначим

$$w(t) = \sigma \frac{b(p)}{a(p)} \sin \omega t.$$

В силу гурвицевости полинома  $a(p)$  функция  $w(t)$  является синусоидальной с частотой  $\omega$ .

Следуя [4], для генерирования сигнала  $w(t)$  будем использовать дифференциальное уравнение вида

$$\frac{d^2 w(t)}{dt^2} = -\omega^2 w(t) = \theta w(t), \quad (7)$$

где  $\theta = -\omega^2$  — постоянный параметр.

Следуя результатам леммы 1 из [4], перепишем (7) следующим образом:

$$w(t) = 2\zeta(t) + \varsigma(t) + \theta\varsigma(t) + \varepsilon_y(t), \quad (8)$$

где  $\varepsilon_y(t)$  — экспоненциально затухающая функция времени, определяемая ненулевыми начальными

условиями, а функция  $\varsigma(t)$  является решением следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\zeta}_1(t) = \varsigma_2(t); \\ \dot{\zeta}_2(t) = -2\varsigma_2(t) - \zeta_1(t) + w(t); \\ \zeta(t) = \varsigma_2(t) \end{cases}$$

или

$$\zeta(t) = \frac{1}{(p+1)^2} w(t).$$

Следуя работе [4], для синтеза идентификатора неизвестного параметра  $\theta$  введем новую переменную — измеряемый сигнал вида

$$z(t) = \zeta(t) = w(t) - 2\dot{\zeta}(t) - \zeta(t).$$

Пренебрегая экспоненциально затухающим членом для модели (8), имеем

$$z(t) = \theta\varsigma(t). \quad (9)$$

Построим адаптивный наблюдатель для сигнала (9)

$$\hat{z}(t) = \hat{\theta}(t)\varsigma(t),$$

где  $\hat{z}(t)$  — оценка сигнала  $z(t)$ , а  $\hat{\theta}(t)$  — настраиваемый параметр, одновременно являющийся оценкой параметра  $\theta$ .

**Утверждение** [4]. Пусть параметр  $\hat{\theta}(t)$  настраивается следующим образом:

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = k_\zeta(t)(z(t) - \hat{z}(t)). \quad (10)$$

Тогда

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\hat{\theta}(t) - \theta| = 0.$$

*Доказательство.* Рассмотрим ошибку

$$\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}. \quad (11)$$

Дифференцируя (11), получаем

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\theta}} &= \dot{\theta} - \dot{\hat{\theta}} = 0 - k_\zeta(z - \hat{z}) = \\ &= -k_\zeta(\theta\varsigma - \hat{\theta}\varsigma) = -k_\zeta^2 \tilde{\theta}. \end{aligned} \quad (12)$$

Рассмотрим функцию Ляпунова вида

$$V = \frac{\tilde{\theta}^2}{2}. \quad (13)$$

Дифференцируя (13) с учетом уравнения (12), получаем

$$\dot{V} = -2k_\zeta^2 V. \quad (14)$$

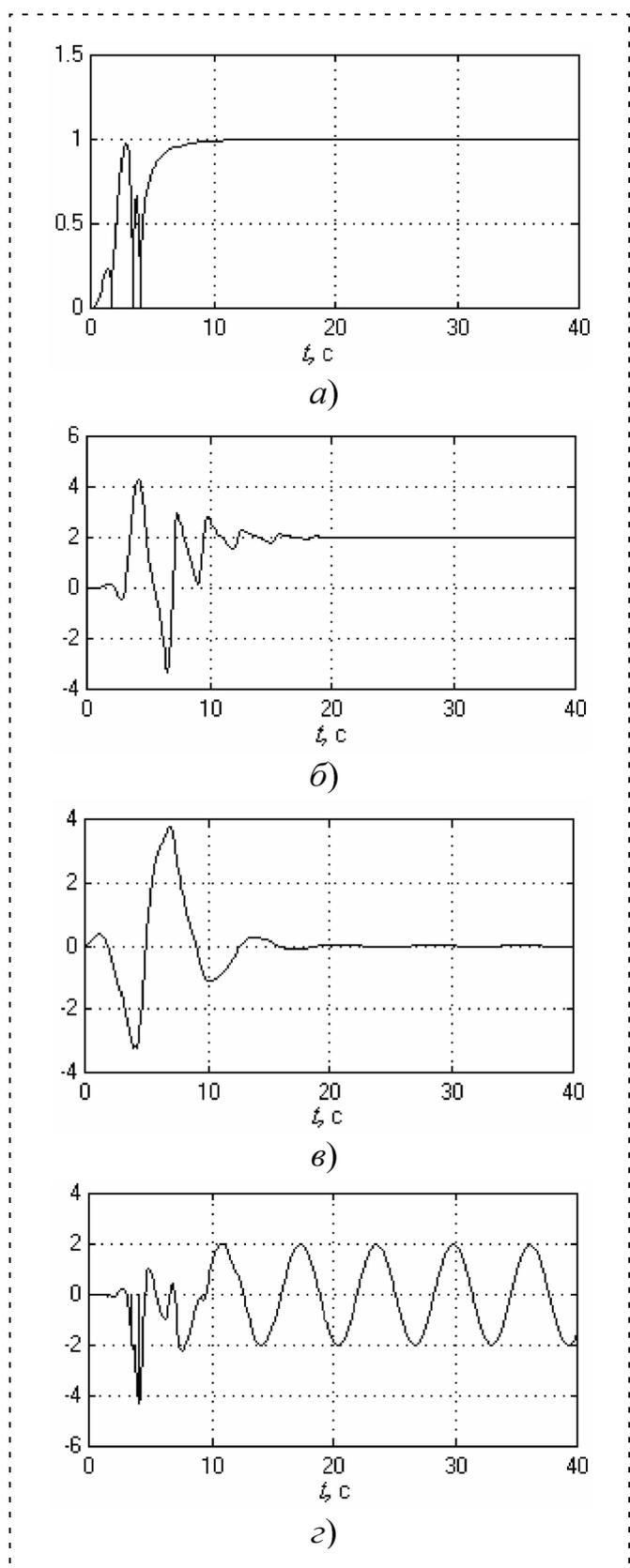


Рис. 1. Переходный процесс при возмущающем воздействии  $\delta(t) = 2\sin t$ ,  $\gamma = 10$  и  $k = 20$  для:  
 $a - \hat{\delta}(t)$ ;  $б - \hat{\sigma}(t)$ ;  $в - y(t)$ ;  $г - u(t)$

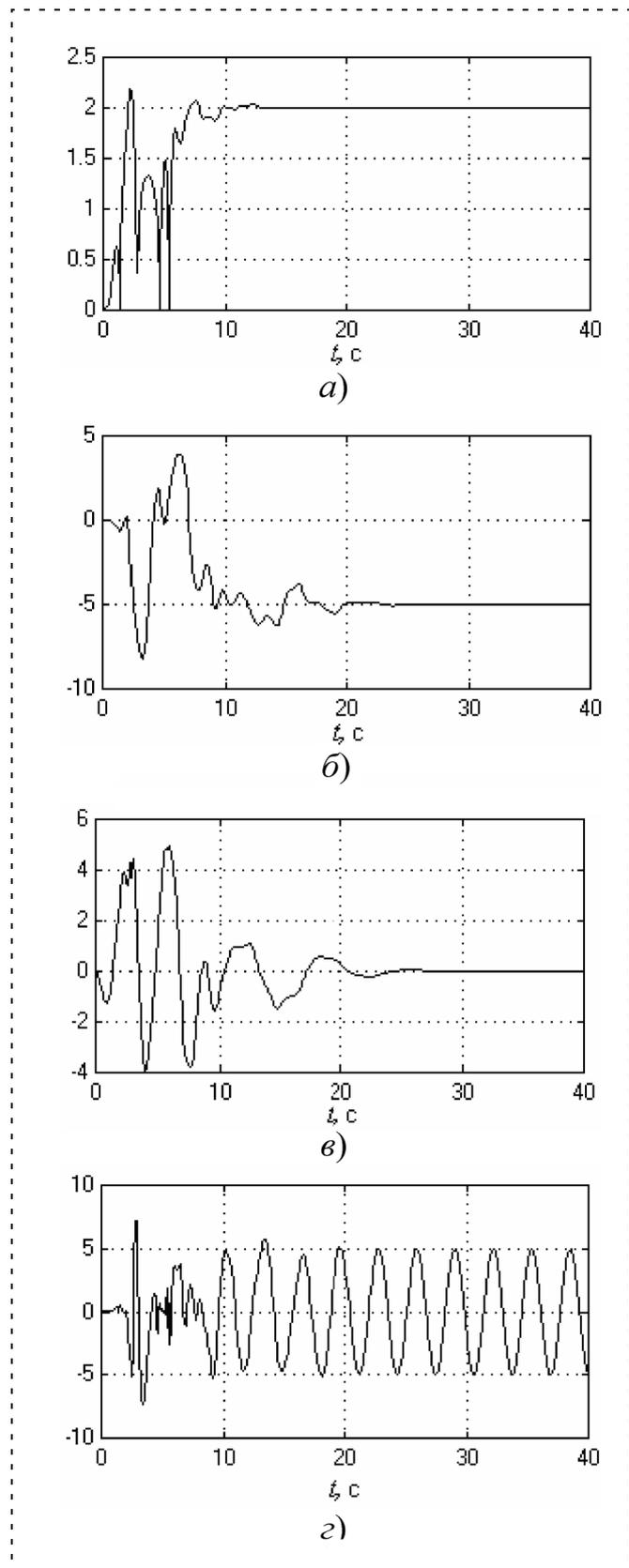


Рис. 2. Переходный процесс для  $\hat{\delta}(t)$  при возмущающем воздействии  $\delta(t) = -5\sin 2t$ ,  $\gamma = 10$  и  $k = 20$  для:  
 $a - \hat{\delta}(t)$ ;  $б - \hat{\sigma}(t)$ ;  $в - y(t)$ ;  $г - u(t)$

Интегрируя (14), имеем

$$V(t) = V(t_0) e^{-k\gamma(t, t_0)}, \quad (15)$$

где функция  $\gamma(t, t_0) = \int_{t_0}^t \zeta^2(\tau) d\tau$  и  $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_{t_0}^t \zeta^2(\tau) d\tau \rightarrow \infty$ .

Из уравнения (15) легко показать, что  $\lim_{t \rightarrow \infty} |\hat{\theta}(t) - \theta| = 0$ . Утверждение доказано.

Частоту гармонического возмущения будем рассчитывать следующим образом:

$$\hat{\omega}(t) = \sqrt{|\hat{\theta}(t)|}. \quad (16)$$

*Замечание 1.* Из доказательства утверждения можно получить, что, увеличивая коэффициент  $k$  в алгоритме (10), можно достичь увеличения скорости сходимости параметра  $\hat{\theta}(t)$  к  $\theta$ .

Теперь построим идентификатор параметра  $\sigma$  возмущающего воздействия  $\delta(t) = \sigma \sin \omega t$ . Для этого построим адаптивный наблюдатель для сигнала  $w(t)$ . Поскольку

$$w(t) = \sigma \frac{b(p)}{a(p)} \sin \omega t = \sigma \varphi(t),$$

то для наблюдателя сигнала  $w(t)$  выберем алгоритм

$$\hat{w}(t) = \hat{\sigma} \frac{b(p)}{a(p)} \sin \hat{\omega} t,$$

где  $\sin \hat{\omega} t = \sin((\omega - \tilde{\omega}) t) = \sin \omega t \cos \tilde{\omega} t - \cos \omega t \sin \tilde{\omega} t$  и, в силу  $\lim_{t \rightarrow \infty} |\tilde{\theta}(t)| = 0$ , имеем  $\lim_{t \rightarrow \infty} |\tilde{\omega}(t)| = 0$ .

Поскольку  $\lim_{t \rightarrow \infty} |\tilde{\omega}(t)| = 0$ , то  $\lim_{t \rightarrow \infty} \sin \hat{\omega} t = \sin \omega t$  и, следовательно,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{w}(t) = \hat{\sigma} \frac{b(p)}{a(p)} \sin \omega t = \hat{\sigma} \varphi(t).$$

Для настройки параметра  $\hat{\sigma}$  воспользуемся стандартной процедурой (см., например, [5]) вида

$$\dot{\hat{\sigma}} = \gamma \varphi(t) (w(t) - \hat{w}(t)) = \gamma \left( \frac{b(p)}{a(p)} \sin \hat{\omega} t \right) (w(t) - \hat{w}(t)). \quad (17)$$

Таким образом, для наблюдателя возмущающего воздействия  $\delta(t)$  имеем следующий алгоритм:

$$\hat{\delta}(t) = \hat{\sigma} \sin \hat{\omega} t,$$

где параметры  $\hat{\sigma}$  и  $\hat{\omega}$  находятся из уравнений (16), (17).

### Пример

Для иллюстрации работоспособности алгоритма управления рассмотрим задачу стабилизации линейного стационарного объекта вида

$$y(t) = \frac{p-1}{p^2+p+1} (u(t) + \delta(t)), \quad (18)$$

где возмущающее воздействие  $\delta(t) = \sigma \sin \omega t$  имеет неизвестные параметры  $\sigma$  и  $\omega$ .

Для стабилизации объекта (18) воспользуемся алгоритмом управления (5) с процедурами настройки неизвестных параметров  $\sigma$  и  $\omega$  вида (16), (17). Промоделируем систему управления (18), (5) для различных значений  $\sigma$  и  $\omega$ . На рис. 1, 2 представлены результаты моделирования системы управления (18), (5).

Результаты компьютерного моделирования иллюстрируют параметрическую сходимость, а также достижение цели управления (3) для различных параметров  $\sigma$  и  $\omega$  возмущающего воздействия  $\delta(t) = \sigma \sin \omega t$ .

### Заключение

В данной статье предложен новый алгоритм компенсации (5), (16), (17) параметрически неопределенного синусоидального возмущения, действующего на линейный объект управления (1). В развитие результатов [1–3] допускалось, что относительная степень объекта управления может быть любой, а числитель передаточной функции модели (2) не обязательно гурвицев, последнее, в свою очередь, расширяет область применения предложенного результата.

### Список литературы

1. Marino R., Santosuosso G. L., Tomei P. Robust adaptive compensation of biased sinusoidal disturbances with unknown frequency // Automatica. 2003. V. 39. P. 1755–1761.
2. Bobtsov A., Kremlev A. Adaptive compensation of biased sinusoidal disturbances with unknown frequency // 16<sup>th</sup> IFAC World Congress, Prague, 2005.
3. Бобцов А. А. Алгоритм управления по выходу с компенсацией гармонического возмущения со смещением // АИТ. 2008. № 9.
4. Арановский С. В., Бобцов А. А., Кремлев А. С., Лукьянова Г. В. Робастный алгоритм идентификации частоты синусоидального сигнала // Известия РАН. Теория и системы управления. 2007. № 3. С. 1–6.
5. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.

# АВТОМАТИЧЕСКОЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК 621.398-501

**О. С. Колосов**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.,  
**В. Б. Гармаш**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, ген. директор,  
**Р. В. Деев**<sup>2</sup>, нач. отдела, **Р. Б. Морозов**<sup>1</sup>, аспирант  
<sup>1</sup> Московский энергетический институт (ТУ)  
<sup>2</sup> ООО "НПА Вира Реалтайм"

## Повышение помехоустойчивости и эффективности алгоритма регулирования температуры горячего водоснабжения на центральных тепловых пунктах

*Рассматривается задача повышения помехоустойчивости и эффективности алгоритма регулирования температуры горячего водоснабжения (ГВС) на центральных тепловых пунктах. Проводится анализ работы действующего регулятора, идентификация составных частей системы регулирования температуры ГВС, разрабатывается математический имитатор системы регулирования температуры ГВС. Приводятся результаты апробации модифицированного алгоритма регулирования температуры ГВС.*

**Ключевые слова:** центральный тепловой пункт, горячее водоснабжение, алгоритм регулирования температуры ГВС.

Одной из проблем промышленной автоматики является низкая помехоустойчивость систем с ПИД-регуляторами на базе микроконтроллеров, когда управление приводными двигателями заслонок или кранов осуществляется с помощью механических реле [1]. Частота срабатывания таких реле в окрест-

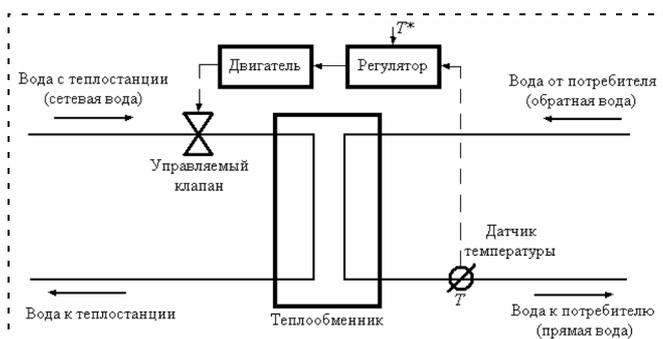


Рис. 1. Функциональная схема системы регулирования температуры ГВС на ЦТП



Рис. 2. Блок-схема системы регулирования температуры ГВС на ЦТП

ностях рабочего режима напрямую зависит от уровня шумов сигнала ошибки, усилению которого способствует операция дифференцирования, реализуемая в алгоритме ПИД-регулятора. Именно чрезмерно частое срабатывание механического реле уменьшает срок безотказной работы регулирующей аппаратуры. К таким системам относится система регулирования температуры горячего водоснабжения (ГВС) на центральных тепловых пунктах (ЦТП).

### Особенности системы регулирования температуры ГВС на ЦТП

Основными составляющими системы ГВС являются трубопроводы сетевой воды, трубопроводы к потребителю и от потребителя, теплообменник, исполнительные механизмы, управляемый клапан, датчик температуры и регулятор (рис. 1).

Управление клапаном, контролирующим подачу горячей воды с теплостанции, осуществляется с помощью механических реле. Сложность системы заключается в том, что срок безотказной службы реле и регулирующей аппаратуры существенно уменьшается из-за чрезмерно частого срабатывания реле под действием возмущений, причиной которых является случайный характер потребления горячей воды, и колебаний температуры сетевой воды, поступающей с теплостанции.

Регулирование температуры в системе ГВС происходит по следующей схеме. Датчик температуры, представляющий собой термосопротивление, измеряет температуру прямой воды  $T$ , поступающей к потребителю. Сигнал с датчика поступает в регулятор, и в зависимости от измеренной температуры и уставки  $T^*$  регулятором вырабатывается управляющее воздействие, которое преобразуется широтно-импульсным модулятором в импульс на открытие или закрытие клапана [2]. Управление приводным двигателем, изменяющим положение клапана, осуществляется с помощью механических реле. Передача тепла от сетевой воды к воде, поступающей к потребителю, происходит посредством теплообменника.

Таким образом, блок-схема системы регулирования температуры ГВС на ЦТП имеет вид, показанный на рис. 2.

### Исследование эффективности существующего алгоритма регулирования температуры ГВС

На данный момент в качестве алгоритма регулирования используется классический алгоритм ПИД-регулирования. В дискретной форме алгоритм может быть представлен следующим образом:

$$u_n = k_{\text{П}} \varepsilon_n + k_{\text{И}} \sum_{i=0}^n \varepsilon_i + k_{\text{Д}} (\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}), \quad (1)$$

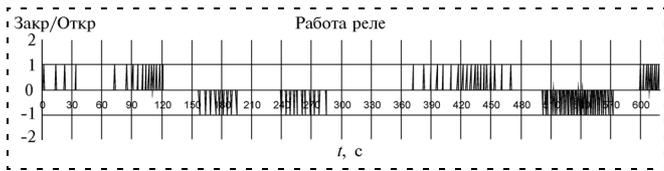


Рис. 3. Регулирование температуры прямой воды

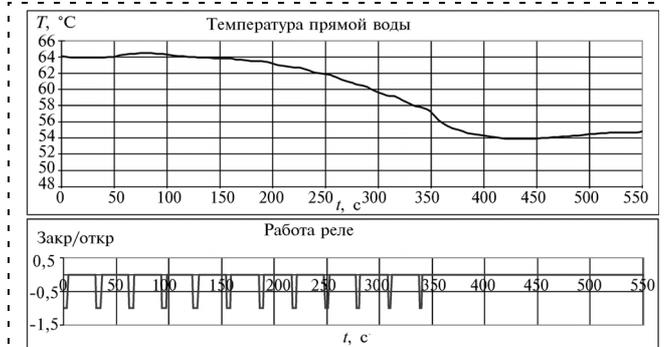


Рис. 4. Работа регулятора при изменении значения уставки

где  $u_n$  — управляющее воздействие в текущий  $n$ -й дискретный момент времени;  $\varepsilon_n$  — рассогласование уставки и регулируемой переменной в соответствующий момент времени;  $k_P, k_I, k_D$  — коэффициенты усиления соответственно пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих алгоритма.

Ниже представлены результаты анализа работы существующего регулятора. На рис. 3 изображена работа реле, управляющего приводным двигателем клапана, при поддержании системой заданной уставки температуры.

Видно, что работа регулятора не является эффективной в смысле частоты срабатывания реле. Однако не удастся улучшить работу существующего регулятора путем настройки его коэффициентов, не выходя за рамки допустимого диапазона на отклонения регулируемой температуры от задаваемой уставки.

На рис. 4 изображена работа реле при изменении уставки температуры прямой воды и соответствующий переходный процесс.

Из графика работы управляющего реле видно, что регулятор не эффективно рассчитывает длительность импульсов на закрытие клапана. Отсюда имеем многократное срабатывание механического реле и большую длительность переходного процесса в системе.

### Исследование и выбор помехоустойчивого метода численного дифференцирования в алгоритме регулирования температуры ГВС

Следует отметить, что усилению уровня шумов сигнала ошибки во многом способствует операция дифференцирования, реализуемая в алгоритме ПИД-регулятора.

В среде *Simulink* пакета *MatLab* была реализована структурная схема системы регулирования температуры ГВС и исследовалось влияние алгоритмов численного дифференцирования на точность и помехоустойчивость системы при наличии аддитивной помехи, имитирующей случайное потребление горячей воды. Было показано, что при реализации алгоритма численного дифференцирования в ПИД-регуляторе для достижения компромисса между точностью системы и частотой срабатывания исполнительных механизмов целесообразно несколько усложнить алгоритм численного дифференцирования за счет введения дополнительных отсчетов и индивидуального подбора интервала дискретизации дифференциальной составляющей должен быть увеличен по сравнению с интервалами при реализации интегрирующей и пропорциональной составляющих в ПИД-законе регулирования.

Например, расчет производной составляющей ПИД-алгоритма можно выполнять на основе интерполяционного полинома Ньютона. Этот метод вычисления производной заключается в том, что производная сигнала рассчитывается не по двум, а по нескольким отсчетам, причем каждому отсчету присваивается свой весовой коэффициент:

$$\hat{y}' [n\Delta t] = \frac{11y_0 - 18y_{-1} + 9y_{-2} - 2y_{-3}}{6\Delta t} \quad (2)$$

На рис. 5 изображена структурная схема, реализующая в пакете *MatLab* расчет производной по приведенной формуле.

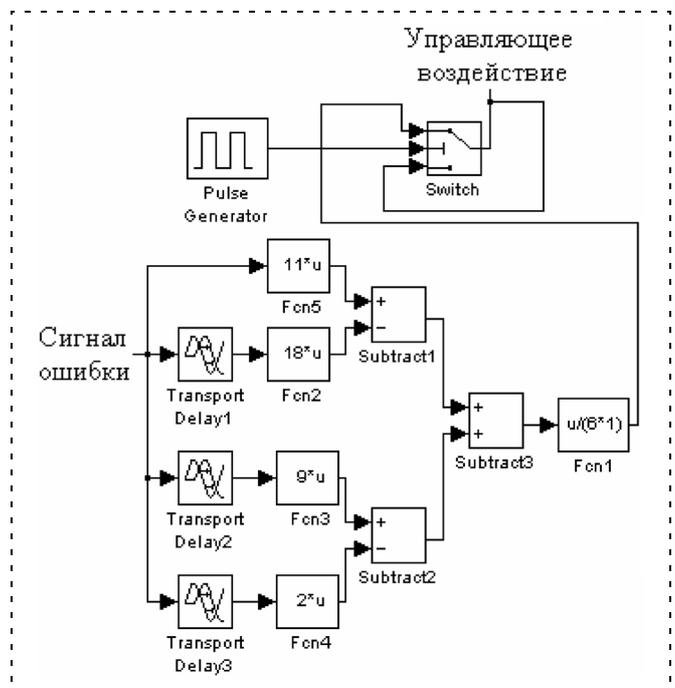


Рис. 5. Реализация вычислений производной на основе полинома Ньютона в среде *Simulink* пакета *MatLab*

Моделирование показало, что введение дополнительных отсчетов и индивидуальный подбор интервала дискретизации производной составляющей ПИД-алгоритма регулирования могут существенно улучшить помехоустойчивость алгоритма.

**Структурно-параметрическая идентификация элементов системы регулирования температуры ГВС**

Структурно-параметрическая идентификация элементов системы необходима для создания математического имитатора системы для апробации и сравнительного анализа работы различных алгоритмов регулирования.

Основными элементами системы ГВС, требующими идентификации, являются теплообменник и управляемый клапан. Двигатель и датчик температуры, представляющий собой термосопротивление, имеют намного меньшие постоянные времени по сравнению с постоянными времени теплообменника, поэтому на данной стадии влияние этих элементов на динамику системы можно не учитывать.

Эксперимент по идентификации теплообменника проводили по следующей схеме. Отключали автоматический регулятор, управляющий клапаном подачи сетевой воды с теплостанции. Таким образом, активировали ручной режим управления клапаном. После этого клапан вручную открывали (или закрывали) на некоторый угол по сравнению с его текущим положением и записывали изменения температуры прямой воды. Результаты идентификации теплообменника (рис. 6, см. вторую сторону обложки) на одном из ЦТП г. Москвы представлены на рис. 7.

Из анализа полученных на различных ЦТП переходных процессов было установлено, что все они имеют схожий характер. Также можно сделать вывод, что теплообменник может быть приближенно описан звеном второго порядка (двумя последовательно соединенными инерционными звеньями с различными постоянными времени) или звеном запаздывания, последовательно соединенным с инерционным звеном. Для удобства последующего анализа системы и ее моделирования был выбран вари-

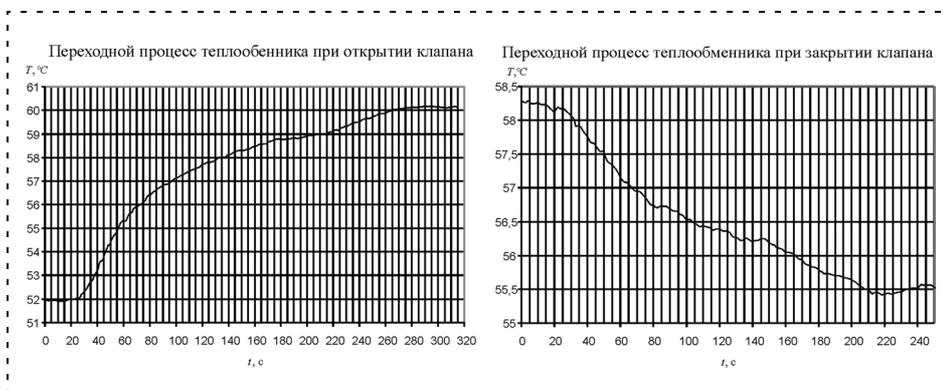


Рис. 7. Идентификация теплообменника

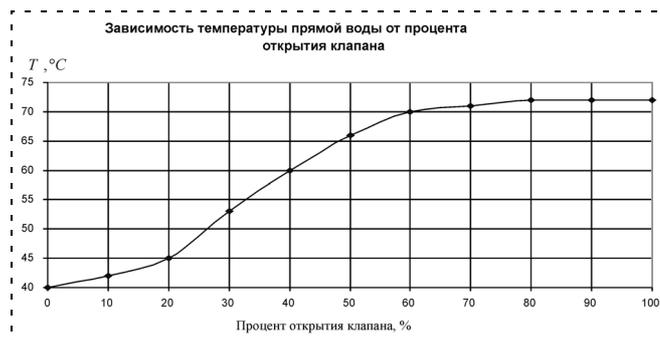


Рис. 9. Результаты идентификации управляемого клапана

ант представления теплообменника в виде двух инерционных звеньев

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} \tag{3}$$

и выведено разностное уравнение

$$y[mT] = \frac{KT}{T_1 + T_2 + T_1 T_2 + T} x[mT] + \frac{2T_1 T_2 + T_1 + T_2}{T_1 + T_2 + T_1 T_2 + T} y[(m - 1)T] - \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2 + T_1 T_2 + T} y[(m - 2)T]. \tag{4}$$

Для разработки математического имитатора системы необходимо знать зависимость регулируемой температуры прямой воды от процента открытия клапана. Эксперимент по идентификации клапана проводился по следующей схеме. Из полностью закрытого состояния клапан открывался постепенно, на 10 % за каждое открытие. После каждого открытия после окончания переходного процесса замерялась температура прямой воды, соответствующая текущему положению клапана. Таким образом, была найдена зависимость температуры прямой воды от процента открытия клапана. Результаты идентификации клапана (рис. 8, см. вторую сторону обложки) представлены на рис. 9.

При моделировании процессов на ЦТП зависимость температуры прямой воды от процента открытия клапана на отрезке от 0 до 70 % с достаточно хорошей точностью можно аппроксимировать линейной зависимостью.

**Математический имитатор системы регулирования температуры ГВС на ЦТП**

Моделирование системы регулирования температуры ГВС в среде *MatLab* позволило сле-

лать общие выводы о влиянии численного нахождения производной сигнала на качество переходных процессов, точность и помехоустойчивость систем. Однако дальнейшее исследование системы, в том числе настройка коэффициентов ПИД-регулятора для конкретного ЦТП, в среде *MatLab* является затруднительной и трудоемкой процедурой. К тому же после апробации модифицированного алгоритма регулирования требуется перевести на новый алгоритм функционирования большое число ЦТП. Так как параметры теплообменников, клапанов, времена транспортных задержек на различных ЦТП могут различаться, то необходимо создание удобного и универсального инструмента по настройке параметров регулятора для каждой системы. Стоит также принимать во внимание, что настройкой регуляторов могут заниматься люди, не владеющие пакетом моделирования *MatLab*.

Исходя из этих соображений на языке программирования *Delphi 7.0* был реализован математический имитатор системы ГВС, позволяющий делать выводы о качестве переходных процессов в системе при использовании П-, PI- и PID-регуляторов с различными параметрами настройки и различными алгоритмами численного дифференцирования [4]. В имитаторе предусмотрена возможность моделирования возмущения, имитирующего случайное потребление горячей воды. Моделирование процессов в системе может проводиться как в режиме реального времени, так и в ускоренном режиме в целях экономии времени и обеспечения большей эффективности имитатора. Универсальность имитатора и возможность его применения для настройки различных систем ГВС достигается за счет возможности изменения всех параметров системы и регулятора.

Эксперименты, проведенные на имитаторе системы регулирования температуры ГВС на ЦТП, показали, что для достижения компромисса между точностью системы и частотой срабатывания исполнительных механизмов целесообразно использовать ПД-закон регулирования, причем производную составляющую необходимо вычислять по нескольким отсчетам, используя, например, алгоритм на основе полинома Ньютона:

$$u_n = k_{\text{П}} \varepsilon_n + k_{\text{Д}} \frac{11y_n - 18y_{n-1} + 9y_{n-2} - 2y_{n-3}}{6\Delta T},$$

где  $u_n$  — управляющее воздействие в текущий  $n$ -й дискретный момент времени;  $\varepsilon_n$  — рассогласование уставки и регулируемой переменной в соответ-

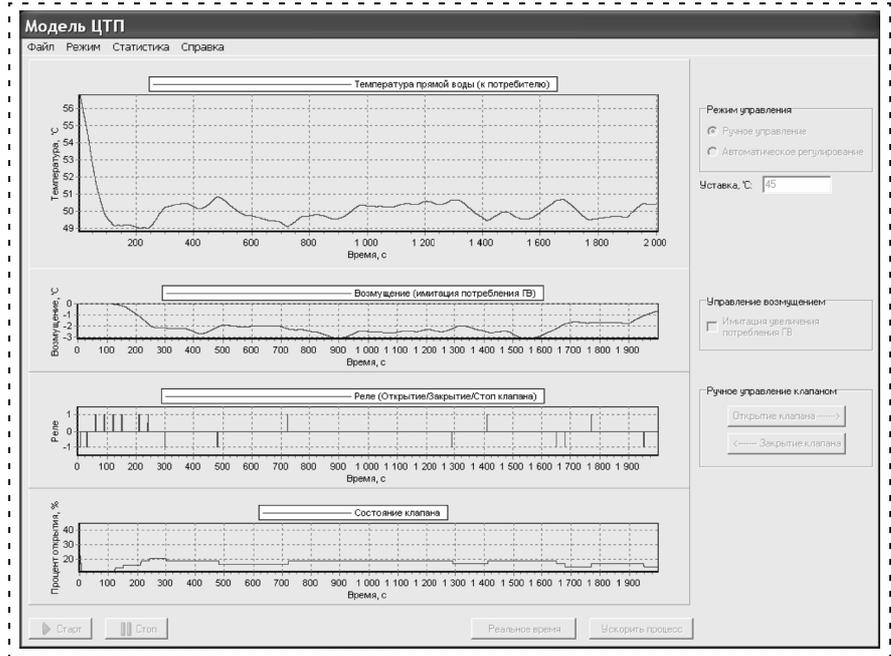


Рис. 10. Основное окно моделирования процессов

ствующий момент времени;  $k_{\text{П}}$ ,  $k_{\text{Д}}$  — коэффициенты усиления, соответственно, пропорциональной и дифференциальной составляющих алгоритма;  $y_n$  — значение контролируемого параметра в  $n$ -й момент времени.

При использовании регулятора такого типа без существенной потери в точности система регулирования становится более помехоустойчивой, число срабатываний исполнительных реле уменьшается примерно на 30 % по сравнению с системой, где регулирование ведется по классическому закону PID-регулирования.

На рис. 10 представлено основное окно, в котором проводится моделирование процессов.

#### Апробация и особенности промышленной реализации алгоритма регулирования температуры ГВС на ЦТП

При апробации выбранного алгоритма регулирования на реальном объекте основная задача заключалась в том, чтобы, не нарушая работы действующего шкафа автоматики, проверить работу модифицированного алгоритма регулирования температуры.

На шкафы автоматики, устанавливаемые на ЦТП, кроме регулирования температуры ГВС возложено множество других функций, например, управление группами насосов холодного водоснабжения, горячей воды, водоснабжения и отопления, подпиточными насосами, измерение параметров: температур, давлений, расхода воды, тепла и электроэнергии, циклическое переключение насосов по расписанию и т. д.

В ходе апробации алгоритма проведение экспериментов на действующей системе может нарушить

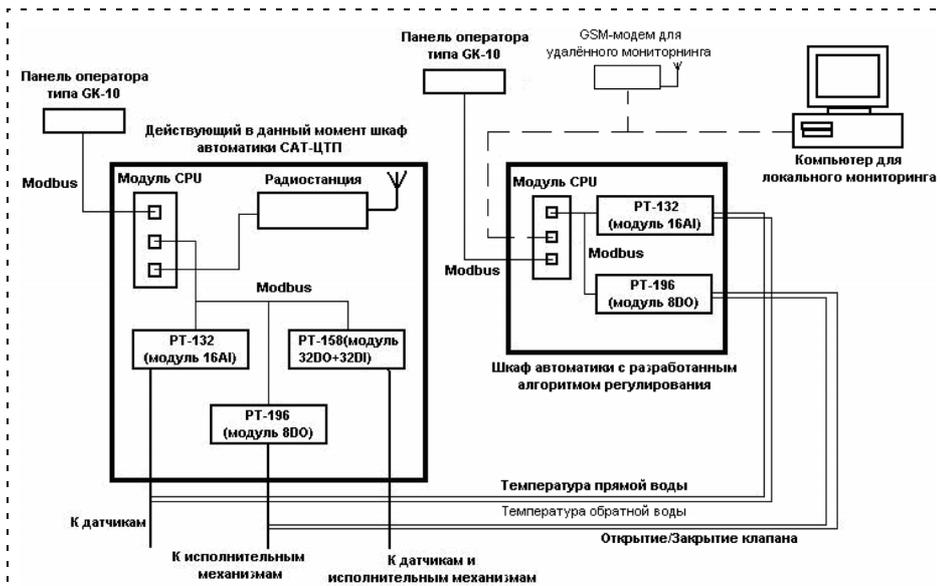


Рис. 12. Дополнительный модуль и схема его подключения к действующему шкафу автоматики

ее работу и повлечь за собой возникновение аварийных ситуаций.

С целью предотвратить подобные ситуации был сконструирован дополнительный модуль (рис. 11, см. вторую сторону обложки) и разработано необходимое программное обеспечение на основе контроллера MOSCAD для реализации в нем новых модифицированных алгоритмов регулирования [5].

В состав модуля входят блок центрального процессора MOSCAD-L, GSM-модем, блоки питания различных типов, ЖК-панель для наглядного отображения и ввода данных, розетка 220 В. Для сопряжения процессора с датчиками и исполнительными механизмами объекта управления используются платы на 16 аналоговых входов, 32 дискретных входа, 32 дискретных выхода и блок реле-повторителей на 8 дискретных выходов. Также в модуле предусмотрены средства для сохранения истории контролируемых параметров и накопления статистики по работе алгоритма, средства для изменения

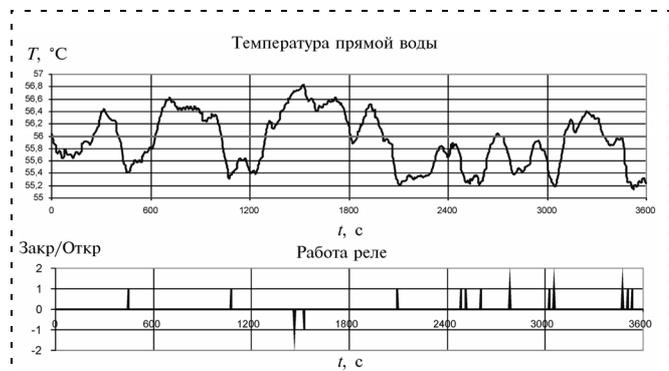


Рис. 13. Процесс регулирования температуры прямой воды при использовании модифицированного алгоритма управления

типе управляемого клапана, контролирующего подачу сетевой воды с теплостанции. На рис. 12 схематично представлены сконструированный дополнительный модуль и схема его подключения к действующему шкафу автоматики.

На рис. 13 изображена работа реле, управляющего приводным двигателем клапана, при поддержании системой регулирования заданной уставки температуры в случае использования модифицированного алгоритма регулирования температуры.

На рис. 14 изображена работа реле при изменении уставки температуры прямой воды и соответствующий переходный процесс.

Из рис. 13 видно, что частота срабатывания реле при работе модифицированного алгоритма регулирования температуры ГВС составляет в среднем 3...10 мин, при этом температура прямой воды удерживается в допустимом диапазоне. Из сравнения с процессом регулирования, изображенным на рис. 3, где применен классический ПИД-алгоритм

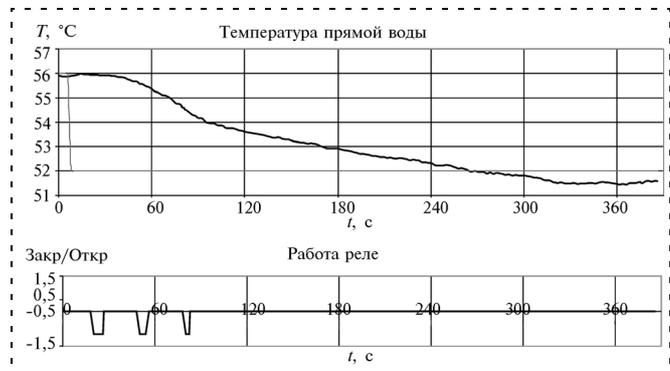


Рис. 14. Переходный процесс в системе с модифицированным алгоритмом управления при изменении значения уставки

алгоритма управления или параметров алгоритма без перепрограммирования контроллера, средства, позволяющие при некорректной работе внедряемого алгоритма быстро перевести систему в режим ручного управления, избежав возникновения аварийных ситуаций, и т. д. GSM-модем позволяет осуществлять удаленное управление всеми функциями модуля и дает возможность удаленного доступа к базе данных контроллера.

С действующего шкафа автоматики на дополнительный модуль были заведены сигналы, необходимые для регулирования температуры ГВС, а именно, температура прямой воды (контролируемый параметр) и сигналы на открытие/закрытие

регулирования, видно, что достигнуто существенное сокращение числа срабатываний реле фактически без потери в точности регулирования. Из сравнения рис. 4 и рис. 14 также видно, что модифицированный алгоритм обеспечивает меньшую длительность переходного процесса в системе при изменении уставки за счет более эффективного расчета длительности импульсов на открытие/закрытие клапана подачи сетевой воды.

В настоящее время на базе выбранного алгоритма ведется разработка адаптивного алгоритма регулирования, который предоставит возможность автоматической настройки коэффициентов регулятора в зависимости от характеристик элементов системы ГВС. Разработка такого алгоритма является актуальной задачей, так как постоянные времена теплообменников, транспортные задержки, характеристики клапанов и других элементов на различных ЦТП могут отличаться. Предварительная идентификация элементов каждой такой системы затруднительна и может занимать большое количество времени. Автоматическая настройка регулятора позво-

лит адаптировать алгоритм управления к конкретной системе без предварительной идентификации ее элементов и избавит от трудоемкой работы по настройке регулятора.

#### Список литературы

1. Горшков В. А., Соколов Е. Я. Пути повышения эффективности теплофикации и централизованного теплоснабжения // Теплоэнергетика. 1984.
2. Берендс Д. А., Кукулиев Р. М., Филиппов К. К. Приборы и системы с широтно-импульсной модуляцией. Л.: Машиностроение, 1982.
3. Колосов О. С., Фон Ч. Л. Особенности численного дифференцирования в задачах управления // Вестник МЭИ. 1996. № 2. С. 42—45.
4. Морозов Р. Б., Колосов О. С. Динамическая модель системы горячего водоснабжения // Тр. 13-й междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика". М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
5. Колосов О. С., Морозов Р. Б., Гармаш В. Б., Деев Р. В. Независимый модуль для внедрения алгоритма управления в опытную промышленную эксплуатацию // Тр. XVII междунар. науч.-техн. сем. "Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации", 2008.
6. Кулаков Г. Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования. Минск: Высшая школа, 1984.

УДК 621.01

**А. Е. Блинников**, канд. техн. наук, доц.,  
Всероссийский заочный финансово-экономический  
институт (филиал в г. Орле)

## Разработка новых методов организационного и технологического управления в литейном производстве

*Рассмотрены новые методы организационного и технологического управления в литейном производстве, основанные на использовании статических и динамических нейронных сетей, отличающиеся отсутствием необходимости сложных формализованных описаний объектов управления, преимуществами параллельных вычислений, простотой реализации на ПЭВМ.*

**Ключевые слова:** литейное производство, статические нейронные сети, динамические нейронные сети, организационное и технологическое управление, синаптическая матрица, технологический процесс, структурно-компоновочная схема, топологическая структура, нейросетевая математическая модель, кластеризация.

### Проблематика организационного и технологического управления в литейном производстве

Решение задач организационного и технологического управления в литейном производстве (ОТУЛП) характеризуется высокой системной сложностью, что обусловлено особенностями применяемых тех-

нологий и оборудования, в частности, вариативностью и необходимостью параллельной реализации различных физико-химических процессов. При этом указанные особенности литейного производства ограничивают возможность использования формализованных подходов к решению задач ОТУЛП, поскольку во многих случаях адекватное формализованное описание задачи просто не может быть получено [1].

Вместе с тем, актуальность повышения качества решения задач ОТУЛП требует разработки новых методологических подходов, основанных на современных методах формализации данных и процессов их обработки, поскольку традиционные методы решения указанных задач не удовлетворяют возрастающим требованиям, в частности, требованию формирования оптимального решения.

### Нейросетевые алгоритмы как основа решения задач ОТУЛП

В качестве методологического подхода к решению задач формирования решений ОТУЛП предлагается применение нейросетевых алгоритмов, основу которых составляют искусственные статические (СНС) и динамические (ДНС) нейронные сети, построенные на принципах строения мозга человека и являющиеся параллельными вычислительными структурами, не требующими программирования при функционировании.

Использование нейросетевых технологий базируется на возможности самообучения нейронной сети на примерах, формируемых пользователем. Преимущество данного подхода состоит в том, что, в принципе, не требуется знание закономерностей, описывающих анализируемые процессы и объекты.

Основа обучения нейросети включает формирование по специальному алгоритму модифицированной синаптической (связывающей значения параметров) матрицы, содержащей "образы" обучения в виде матричного представления параметров исследуемых объектов и процессов литейного производства, модифицированных коэффициентами весоности, которые нейросеть рассчитывает самостоятельно на основе обучающих последовательностей. Результатом обучения нейронной сети является возможность генерации сетью выходных значений, минимально отличающихся от контрольных.

Функционирование нейронной сети сводится к формированию выходных значений факторов на основе входных последовательностей данных. В качестве как входных, так и выходных могут использоваться числовые, логические и текстовые данные.

В качестве базовых вариантов нейронных сетей применены [2, 3]:

- многослойный персептрон, функционирование которого основано на получении каждым нейроном определенного набора входных сигналов, интеграции входных сигналов с учетом их неравнозначности, характеризующейся синаптическим весом (весовым коэффициентом), формировании выходного сигнала, интенсивность которого зависит от значения интегрированного значения входного показателя;
- динамическая нейронная сеть Хопфилда, особенностью которой является наличие обратных связей между нейронами. При функционировании сети изменение состояния одного нейрона отражается на всей сети вследствие обратной связи. В сети возникает переходный процесс, который завершается формированием нового устойчивого состояния, отличающегося от предыдущего. При этом состоянию сети может быть поставлена в соответствие энергетическая функция Ляпунова. Данная функция в процессе функционирования сети при изменении состояния нейронов имеет тенденцию изменения в направлении минимума энергии сети до его достижения;
- нейронная сеть Кохонена (самоорганизующаяся карта) подразумевает использование упорядоченной структуры нейронов (двумерные сетки). Нейроны располагаются в узлах сетки и взаимодействуют друг с другом. Величина этого взаимодействия определяется расстоянием между нейронами. В процессе обучения из исходного набора данных случайно выбирается один из входных векторов, а затем выполняется поиск наиболее похожего на него вектора коэффициентов ней-

ронов. При этом выбирается нейрон-победитель, который наиболее похож на вектор входов. После того, как найден нейрон-победитель, корректируются веса нейросети. При этом вектор, описывающий нейрон-победитель, и векторы, описывающие его соседей в сетке, перемещаются в направлении входного вектора.

### Решаемые задачи

Концептуальными направлениями использования нейронных сетей названных видов в области литейного производства являются следующие основные группы решаемых задач.

1. *Анализ свойств объектов литейного производства на основе решения задач их формализованной кластеризации и классификации.* Решение данных задач основано на формировании и анализе нейросетевой модели объекта исследования, реализуемой с применением нейронной сети Кохонена, и отнесении объектов к соответствующим кластерам и классам по совокупности правил, приведенных выше. Пример кластеризации отливок по видам дефектов и по соответствующим им параметрам технологического процесса литья под давлением приведен на рис. 1.

Анализ свойств объектов литейного производства включает возможности:

- описания данных: карты Кохонена позволяют хранить в компактной форме данные, точно описывающие объекты;
- формирования правил отнесения анализируемого объекта к соответствующему классу по совокупности его свойств;
- прогнозирования состояний объекта исследования посредством формирования системы вариативных значений данных по принципу "что, если";
- выявления новизны объекта исследования в случае невозможности его отнесения к соответствующему классу;

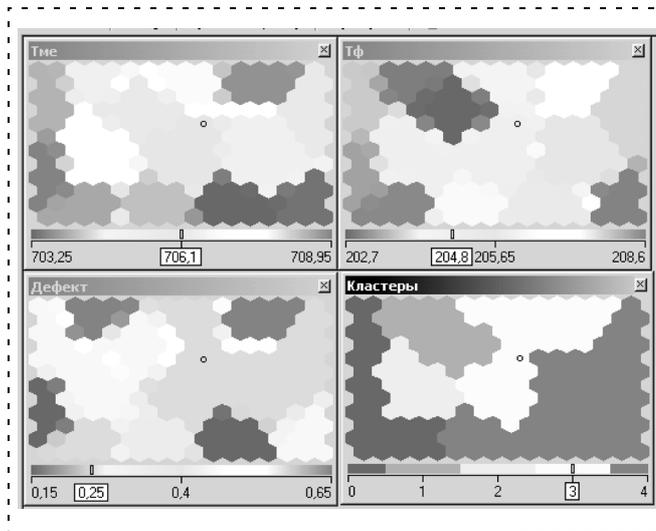


Рис. 1. Пример решения задачи кластеризации

- решения задач регрессии: карты Кохонена позволяют установить зависимость целевой переменной, имеющей непрерывные значения, от независимых (входных) переменных.

2. *Формирование проектных решений технологических процессов и оборудования литейного производства.* Соответствующее обращение к сети позволяет с минимальными временными затратами сформировать адекватные показатели качества технологического процесса, максимально отвечающие конкретным условиям производства и исключающие тот или иной вид дефекта отливок.

Подзадачами данной группы задач являются следующие:

2.1. *Формирование параметров технологического процесса производства отливок.* Обучающая выборка включает данные реализуемых технологических процессов производства некоторой совокупности отливок. Например, при решении подзадачи формирования параметров технологического процесса литья под давлением для отливки в качестве входных данных могут быть использованы вид дефектов отливок (кодовое обозначение), масса, средняя толщина стенки отливки, технологичность (1 — хорошая, 2 — плохая). Выходными данными являются усилие запираения формы, давление прессования, температура металла и пресс-формы, площадь питателя, время выдержки.

2.2. *Формирование структурно-компоновочных схем (СКС) автоматического литейного оборудования,* в частности автоматических литейных линий (АЛЛ), по требуемым показателям качества СКС. Формируемые решения в данном случае включают топологические структуры вариантов АЛЛ, отличающиеся новыми свойствами.

2.3. *Выбор приемлемого варианта СКС АЛЛ,* максимально отвечающего конкретным условиям производства. Реализуемые варианты решений данной задачи включают приемлемые для существующих условий производства варианты СКС АЛЛ и их показатели качества.

2.4. *Формирование СКС АЛЛ по значениям параметров отливок.* Решения задачи включают СКС оборудования и их показатели качества, ориентированные на производство конкретных классов отливок заданного вида литья.

3. *Формирование адекватных формализованных представлений объектов и процессов литейного производства.* Подзадачами данной группы задач являются следующие:

3.1. *Формирование адекватного аналитического описания,* которое реализовано на основе декомпозиции нейронной сети, в частности, конкретизации значений коэффициентов весомости синаптических связей, смещений и функции активации нейронов. Результатом решения задачи является формирование нейросетевой математической мо-

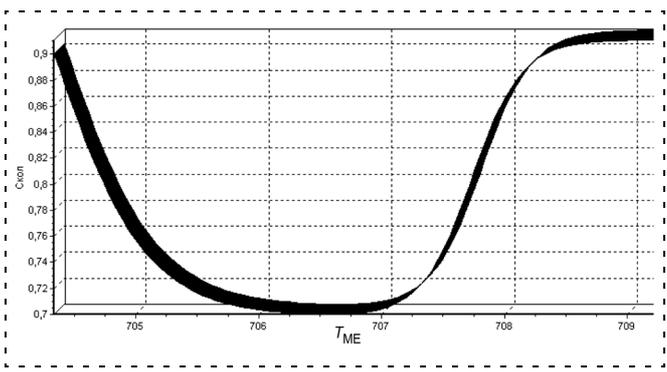


Рис. 2. Зависимость дефекта отливки "скол" от температуры металла

дели (НСММ), адекватность которой определяется адекватностью обучения нейронной сети.

3.2. *Формирование нетривиальных графических представлений,* включающих графические интерпретации поверхностей отклика нейросетевых зависимостей для получения дополнительной информации об исследуемых объектах литейного производства. В частности, возможно формирование "среза" поверхности отклика, формируемого НСММ в случае многомерного представления данных при выбираемых фиксированных и изменяемых значениях данных.

На рис. 2 приведена типовая зависимость дефекта отливки "скол" от температуры металла (диапазон кодирования дефекта "скол" 0—1).

4. *Оперативно-технологическое управление качеством отливок* определяется возможностью формирования оперативно-технологических управленческих решений и их активизации в периоды подготовки и реализации технологического процесса производства отливок для любого вида литья в целях оперативного устранения проявляющихся дефектов в производимых отливках. Актуальность данного метода обусловлена значительными материальными издержками, сопутствующими простоям автоматического литейного оборудования при внезапном проявлении дефектов отливок.

Метод оперативного управления качеством отливок базируется на системном синтезе и анализе НСММ, включающих формализованные описания зависимостей любых видов дефектов отливок от параметров реализуемого технологического процесса и других факторов.

Обобщенный алгоритм оперативно-технологического управления качеством отливок приведен на рис. 3.

5. *Оптимизация конструкторских и технологических решений технологических процессов и оборудования литейного производства* реализуется на основе анализа энергетической функции сети, посредством которой описываются исследуемые объекты и процессы. В пространстве состояний локальные энер-

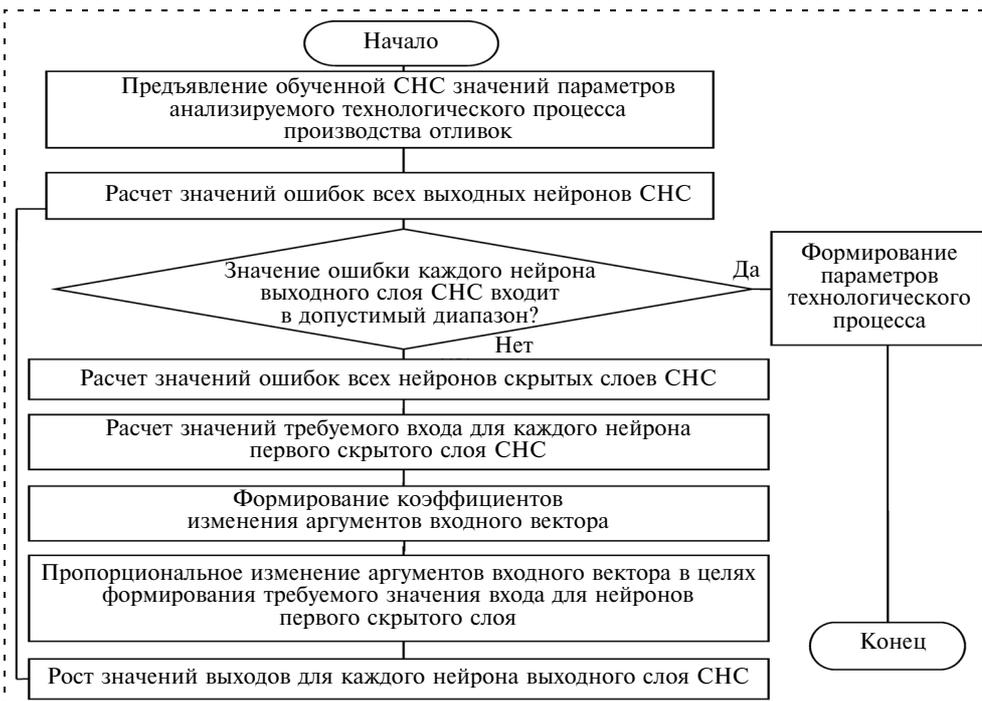


Рис. 3. Алгоритм оперативно-технологического управления качеством отливок

гетические минимумы (аттракторы) представлены точками устойчивых состояний. ДНС, минимизирующая свою энергию, при стремлении к одному из своих устойчивых состояний, решает задачу оптимизации — поиск минимума определенной функции своего состояния — энергии.

6. *Прогнозирование состояний автоматического литейного оборудования, технологических процессов и качества отливок на основе использования ДНС, отличающейся наличием двунаправленной ассоциативной памяти.*

Решение задачи основано на способности сети сохранять связи между различными фактами и затем устанавливать их соответствие друг другу.

Подав на входы сети вектор с известными параметрами-фактами, получаем прогнозируемые состояния остальных параметров в соответствии с ассоциацией, порожденными сетью.

На рис. 4 приведен результат решения задачи прогнозирования качества отливок с применением ДНС.

**Выводы**

Приведенные элементы практики применения нейросетевых технологий в области литейного производства свидетельствуют о перспективности данного направления, которое обусловлено:

- высоким качеством НСММ, поскольку нейросети нелинейны по своей природе и представляют собой исключительно мощный аппарат моделирования, позволяющий воспроизводить чрезвычайно сложные зависимости, что является

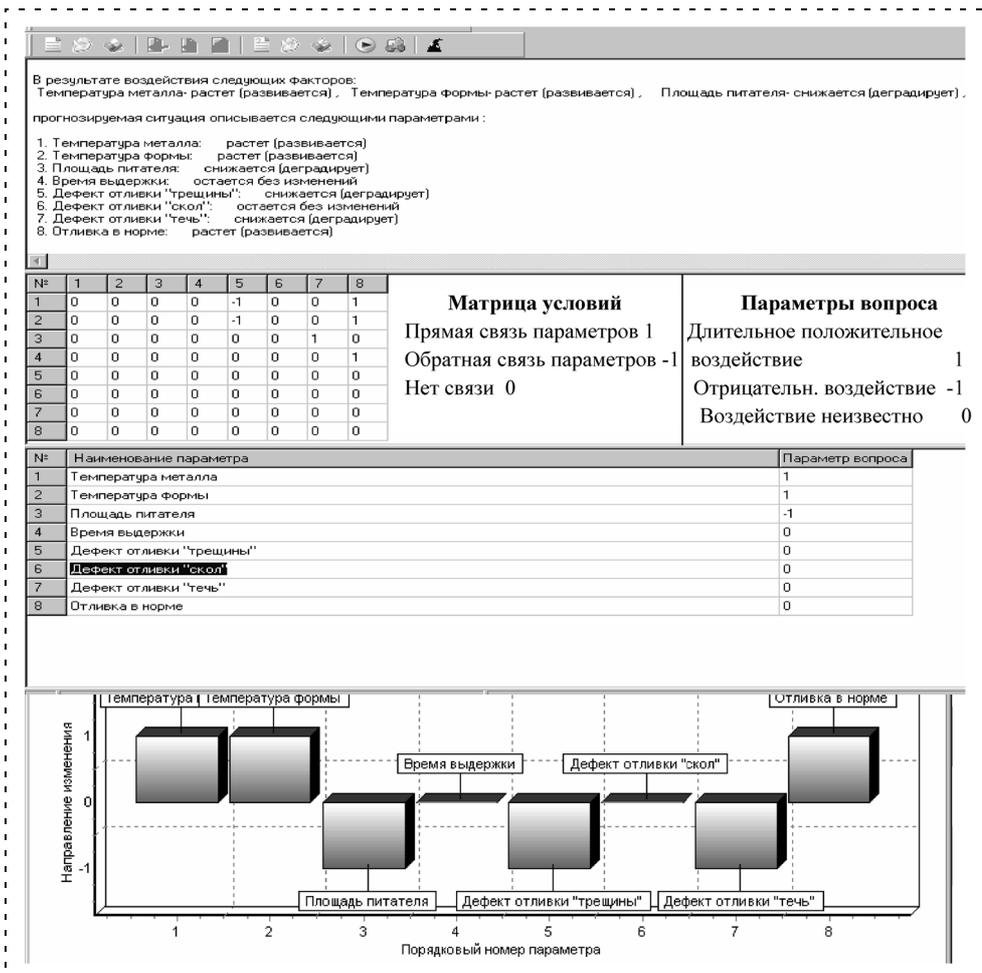


Рис. 4. Результаты решения задачи прогнозирования качества отливок

весьма востребованным в области литейного производства в современных условиях;

- простотой использования НСММ, поскольку отсутствует необходимость строгой адекватной формализации решаемой задачи, при возможности формирования многомерных моделей, что значительно повышает их функциональность.
- возможностью формирования и изучения нетривиальных моделей ОТУЛП, в частности включающих скрытые, ранее не изученные закономерности, формируемые по типу "отливка — технологический процесс", "отливка — оборудование" или их комбинаторику, когда входными данными являются только параметры отливки,

а выходными, соответственно, технологические процессы или конструкторские решения.

- возможностью параллельной обработки данных;
- высокой скоростью получения результата при эмуляции на ПЭВМ.

#### Список литературы

1. **Беликов О. А.** Основные положения системно-структурного проектирования технических объектов // Механика машин. 1997. № 5.
2. **Круглов В. В., Борисов В. В.** Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия — Телеком, 2001. 382 с.
3. **Осовский С.** Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И. Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.

УДК 533.735

**Ю. И. Кудинов**, д-р техн. наук, проф.,  
**К. С. Иванченко**, аспирант,  
**И. Ю. Кудинов**, аспирант,  
 Липецкий государственный  
 технический университет

### Разработка нечеткой системы прогнозирования качества металлопродукции\*

*Рассматриваются этапы разработки нечеткой системы прогнозирования дефектов металлопродукции, включающие анализ технологических процессов, постановку задачи прогнозирования, построение нечетких моделей и алгоритмов обучения, а также опытную проверку системы на одном из металлургических предприятий.*

**Ключевые слова:** нечеткая система, прогнозирование дефектов, нечеткие модели и алгоритмы обучения, металлургические предприятия.

#### Описание и анализ технологических процессов

В настоящее время крупнотоннажные и многоассортиментные производства химической и металлургической промышленности работают в условиях очень жестких требований к качеству выпускаемой продукции. Типичным представителем таких предприятий является конвертерное производство (рис. 1), предназначенное для передела низкомарганцовистого чугуна в семь марок сталей.

Сыпучие материалы и ферросплавы из бункеров по трактам подачи направляются в конвертер. После отбора пробы и проведения химического анализа в экспресс-лаборатории (ЭЛ) жидкий чугун с температурой 1580 °С из заливочного ковша

направляется в три конвертера вместимостью по 400 т. В конвертере с использованием фурмы осуществляется дутьевой режим плавки при расходе кислорода от 700 до 1750 м<sup>3</sup>/мин. После завершения плавки металл из конвертера выливается в сталеразливочный ковш (стальковш), а шлак — в ковш для шлака. В стальковше с помощью установки доводки металла (УДМ) сталь продувается аргоном для усреднения химического состава и температуры металла и, при необходимости, кислородом для снижения содержания углерода.

Сталь из стальковша выливается в промежуточный ковш (промковш) до определенного уровня, а затем в два кристаллизатора двухручьевого установки непрерывной разливки стали (УНРС). После наполнения кристаллизатора жидкой сталью из него вытягивают два слитка, которые затем проходят зоны вторичного охлаждения, где через форсунки по большому (нижняя поверхность слитка) и малому (верхняя поверхность слитка) радиусу вода подается на слитки и происходит их окончательное затвердевание. В клетях слитки газорезкой разрезаются на мерные длины, именуемые слябами. Качество получаемых слябов оценивается значениями в баллах от 0 до 3 пронумерованных от 1 до 13 дефектов (1, 2 — сетчатая трещина по малому и большому радиусу; 3 — ребровая трещина; 4, 5 — поперечная трещина по малому и большому радиусу и т. д.).

Качество получаемых слябов, определяемое наличием одного или нескольких из 13 дефектов, оцениваемых в баллах от 0 до 3, зависит от двух групп переменных:

- статических  $z$ , не меняющихся в течение одной плавки (включающих параметры конвертерной плавки  $z^{КП}$ , доводки металла  $z^Д$  и шлакообразующей смеси  $z^{Ш}$ , образующих вектор  $z^G$ , имеющий 18 элементов, и вектор конструктивных параметров кристаллизатора  $z^K$ , имеющий два элемента);

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту 08-08-00052.

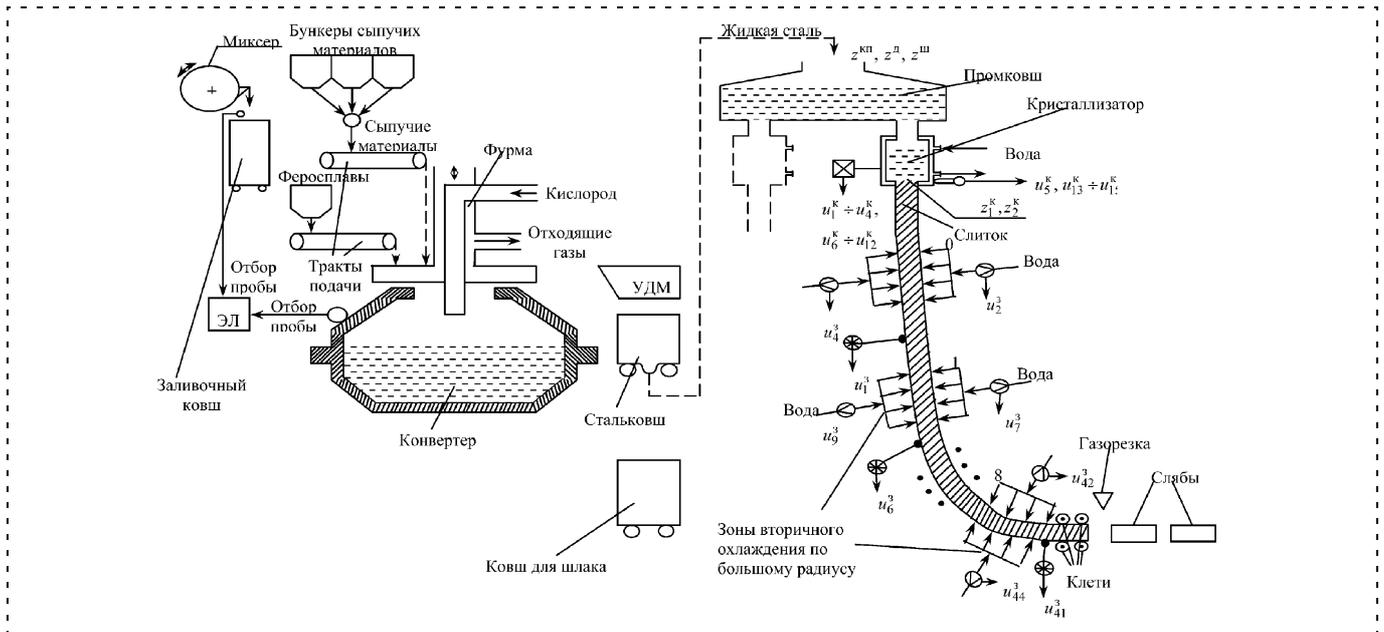


Рис. 1. Схема конвертерного производства

динамических  $u$  (41 параметр), меняющихся в пределах одной плавки и связанных в основном с УНРС (включающих параметры кристаллизатора, скорости перемещения слитка, расходы воды в форсунках зон вторичного охлаждения). Надежное прогнозирование дефектов возможно лишь с помощью математической модели, учитывающей их зависимость от технологических параметров.

Отличительными особенностями таких производств являются нестационарность, исключительная сложность и нелинейность связей между переменными, огромный объем информации, подверженной влиянию помех и погрешностей измерения. В этих условиях высокую эффективность показали нечеткие многосвязные модели, построенные и обученные по данным, накопленным в ходе эксплуатации производственных установок.

В данной статье рассматривается разработка системы прогнозирования дефектов металлопродукции с использованием нечеткой модели и алгоритмов идентификации, представленных в работе [1].

### Постановка задачи прогнозирования

В целях формализации обозначений приведем рис. 1 к упрощенной схеме конвертерного производства (рис. 2), состоящего из двух отделений: подготовки сырья и выплавки стали (ПСВС), а также технологических процессов (ТП<sub>1</sub>, ТП<sub>2</sub>, ..., ТП<sub>r</sub>, ..., ТП<sub>p</sub>) в УНРС, перерабатывающих в  $r$ -м ручье жидкую сталь в слябы.

Для получения  $g$ -й марки стали требуется  $g$ -й состав сырья, который характеризуется компонентами  $z_1^g, z_2^g, \dots, z_{n_g}^g, g = \overline{1, N_c}, N_c = 7$ . Жидкая сталь

поступает и обрабатывается в ТП<sub>r</sub>,  $1 \leq r \leq p, p = 2, 4, 6, 8, 10$ , начиная с момента времени  $t_{v-1}^r$  и до момента времени  $t_v^r, r = \overline{1, p}$ . На интервале времени  $[t_{v-1}^r, t_v^r]$  в моменты времени  $t_1^r = t_{v-1}^r, \dots, t_k^r, \dots, t_{N_v}^r = t_v^r$  получают  $N_v$  слябов, имеющих баллы дефектов  $y_r(k) = (y_{r1}(k), y_{r2}(k), \dots, y_{ri}(k), \dots, y_{rq}(k))$  в моменты времени  $t_k, k = \overline{1, N_v}$ .

Обозначим вектор входных переменных  $x_r^g = (x_{1r}^g, x_{2r}^g, \dots, x_{jr}^g, \dots, x_{mr}^g) = (z^g, u_r, z_r)$  и исключим из рассмотрения вектор ненаблюдаемых входных переменных  $\varepsilon_r$ , учитываемых при идентификации нечеткой модели.

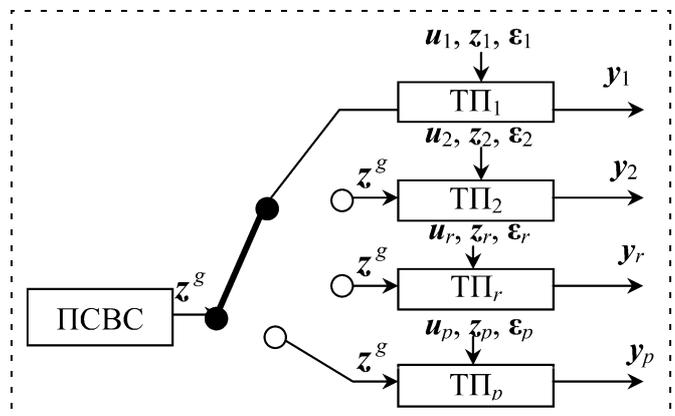


Рис. 2. Схема конвертерного производства

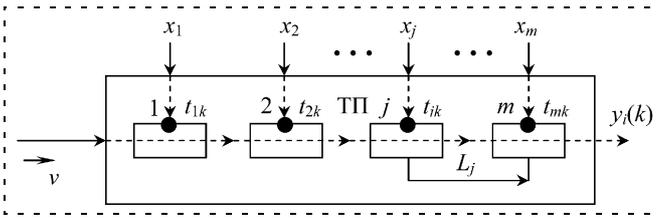


Рис. 3. Схема технологического процесса

Продолжая рассуждения для  $i$ -го дефекта сляба, изготовленного из  $g$ -й марки стали в  $r$ -м ручье, упрости́м обозначения, исключив индексы  $g, r$ . Теперь проанализи́руем компоненты вектора  $x$ , используя более подробную схему ТП, изображенную на рис. 3.

Пусть  $x(k) = (x_1(t_{1k}), x_2(t_{2k}), \dots, x_m(t_{mk}))$  — вектор входных переменных, действующих в точках  $j = \overline{1, m}$  на продукцию в моменты времени  $t_{jk}$  и оказывающих влияние на формирование дефекта  $y_i(k)$ ,  $i = \overline{1, q}$ , в момент времени  $t_k$  на выходе ТП. Моменты времени  $t_{j, k}$ ,  $j = \overline{1, m}$ , связаны с  $t_k$  соотношениями

$$t_{jk} = t_k - \frac{L_j}{v}, j = \overline{1, m},$$

где  $v$  — скорость передвижения продукции;  $L_j$  — расстояние от точки  $j$ -го воздействия до конца ТП.

Входные воздействия  $x_j(t_{jk})$ ,  $j = \overline{1, m}$ , действующие в моменты времени  $t_{jk}$  и формирующие дефект  $y_i(k)$  в момент времени  $t_k$ , можно записать в виде вектора  $x(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_m(k)) = (x_1(t_{1k}), x_2(t_{2k}), \dots, x_m(t_{mk}))$ , показывая связь входов  $x_j(k)$ ,  $j = \overline{1, m}$ , и выхода  $y_i(k)$  в момент времени  $t_k$ .

Таким образом, для прогнозирования качества металлопродукции требуется разработать нечеткие многосвязные модели, рассчитывающие значения дефектов  $y_i(k)$  слябов, полученных в  $r$ -м ручье из  $g$ -й марки стали в моменты времени  $t_k$ ,  $k = \overline{1, N}$ :

$$\hat{y}_i(k) = f(x(k), \xi_i), \forall i = \overline{1, q}, \quad (1)$$

где  $\xi_i$  — вектор параметров и структурных элементов модели.

Точность прогноза, т. е. близость расчетного  $\hat{y}_i(k)$  к измеренному  $y_i(k)$  значению  $i$ -го дефекта после  $r$ -го ТП, оценивается критерием

$$J_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |y_i(k) - \hat{y}_i(k)|, \forall i = \overline{1, q}. \quad (2)$$

Модели (1) обладают требуемой точностью прогнозирования дефекта  $y_i$ ,  $1 \leq i \leq q$ , если удовлетворяют условиям адекватности

$$J_i < J_i^{\Delta}, \forall i = \overline{1, q}, \quad (3)$$

выполнение которых обеспечивается алгоритмом идентификации

$$\xi_i = \Psi(\hat{y}_i, y_i, x), \quad (4)$$

где  $y_i = (y_i(1), y_i(2), \dots, y_i(N))$  — вектор показателей качества;  $x = \{x_j(k)\}$  — матрица размерности  $m \times N$ .

### Нечеткие модели прогнозирования дефектов

В работах [1, 2] показано, что для прогнозирования дефектов целесообразно использовать нечеткие модели, состоящие из совокупности продукционных правил, в правой части которых находятся линейные уравнения:

$$\begin{aligned} R_i^{\theta}: \text{если } x_1(k) \text{ есть } X_{i1}^{\theta}, x_2(k) \text{ есть } X_{i2}^{\theta}, \dots, \\ x_j(k) \text{ есть } X_{ij}^{\theta}, \dots, x_m(k) \text{ есть } X_{im}^{\theta}, \\ \text{то } y_i^{\theta}(k) = c_{i0}^{\theta} + c_{i1}^{\theta} x_1(k) + \dots + c_{ij}^{\theta} x_j(k) + \dots + \\ + c_{im}^{\theta} x_m(k), \theta = \overline{1, n_i}, i = \overline{1, q}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $X_{ij}^{\theta}$  — нечеткие множества, описываемые функциями принадлежности (ФП)  $X(x_j, d_{ij}^{\theta})$  — аналитическими выражениями, зависящими от входных переменных  $x_j$  и векторов параметров  $d_{ij}^{\theta} = (d_{ij1}^{\theta}, d_{ij2}^{\theta}, \dots, d_{ij\sigma}^{\theta})$ ,  $\theta = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ,  $i = \overline{1, q}$ ;  $\theta, n_i$  — номер и число продукционных правил нечеткой модели, прогнозирующей  $i$ -й показатель качества  $y_i$ ;  $c_{ij}^{\theta}$  — коэффициенты линейных уравнений.

Продукционные правила (5), оснащенные операциями фаззификации, нечеткого вывода и фаззификации, образуют нечеткую модель, имеющую следующую аналитическую форму [1]:

$$y_i(k) = \sum_{\theta=1}^{n_i} (c_i^{\theta})^T x_i^{\theta}(k, d_i^{\theta}), \quad (6)$$

где  $(c_i^{\theta})^T = (c_{i0}^{\theta}, c_{i1}^{\theta}, \dots, c_{im}^{\theta})$  — вектор коэффициентов линейного уравнения  $\theta$ -го правила,  $\theta = \overline{1, n}$ ;  $\tilde{x}_i^{\theta}(k) = (\beta_i^{\theta}, \beta_i^{\theta} x_1(k), \dots, \beta_i^{\theta} x_m(k))$  — расширенный входной вектор  $\theta$ -го правила, содержащий в качестве множителя нелинейную нечеткую функцию параметров  $d_i^{\theta}$  ФП

$$\beta^{\theta}(d_i^{\theta}) = \frac{w_i^{\theta}}{\sum_{\theta=1}^{n_i} w_i^{\theta}},$$

где  $w_i^\theta$  — значение истинности  $\theta$ -го правила, равное произведению ФП

$$w_i^\theta = X_i^\theta(x_1)X_i^\theta(x_2) \cdot \dots \cdot X_i^\theta(x_m).$$

Теперь в векторе  $\xi$ , уточняемом алгоритмом идентификации, можно указать параметрические (коэффициенты линейных уравнений  $c = \{c_{ij}^\theta\}$  и параметры ФП  $d = \{d_{ij}^\theta\}$ ,  $\theta = \overline{1, n}$ ,  $i = \overline{1, q}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ) и структурные (число правил  $n$  и число  $m$  и состав переменных) элементы.

### Разработка алгоритмов параметрического и структурного обучения

Создание алгоритма идентификации, воздействующего одновременно на все компоненты вектора  $\xi$ , является исключительно сложной и практически неразрешимой задачей. Поэтому предлагается применение частных алгоритмов идентификации  $\Psi_c, \Psi_d, \Psi_n, \Psi_m$ , определяющих соответствующие значения  $c, d, n, m$ , минимизирующих критерий (2), и алгоритма  $\Psi$ , организующего условия функционирования и последовательность запуска П этих алгоритмов

$$\Psi = \Pi(\Psi_c, \Psi_d, \Psi_n, \Psi_m). \quad (7)$$

Рассмотрим некоторые принципы построения такой последовательности П.

Выражение (6) представляет собой семейство функций  $\tilde{x}_i^\theta(k, d_k^\theta)$ , линейно зависящих от параметров  $c_i^\theta$ , поэтому параметры  $c_i^\theta$  определяются рекуррентным методом наименьших квадратов [1] до тех пор, пока не выполнится условие адекватности (3) или условия сходимости на  $\gamma$ -й итерации

$$\Delta J^\gamma = J^\gamma - J^{\gamma-1} \leq \Delta J^D, \quad (8)$$

где  $\Delta J^D$  — нижний (допустимый) предел скорости сходимости.

Если условия адекватности не выполняются и скорость сходимости  $\Delta J^\gamma$  ниже допустимой  $\Delta J^D$ , осуществляется переход к алгоритму  $\Psi_d$ , определяющему или уточняющему параметры ФП  $d$ . Обозначим  $\Psi_y$  алгоритм, который на основании анализа условий адекватности (3) и сходимости (8) осуществляет продолжение работы алгоритма, переход к следующему алгоритму или окончание обучения.

Поскольку критерий адекватности является интегральным, то для его минимизации по  $d$  используется генетический алгоритм  $\Psi_d$ , приведенный в [1].

Итак, вначале нечеткие модели подвергаются параметрическому обучению с помощью алгоритмов  $\Psi_c, \Psi_d$  и  $\Psi_y$  (рис. 4).

Порядок работы алгоритмов  $\Psi_c$  и  $\Psi_d$  параметрического обучения можно отобразить стрелками 1, 2, исходящими из алгоритма  $\Psi_y$ .

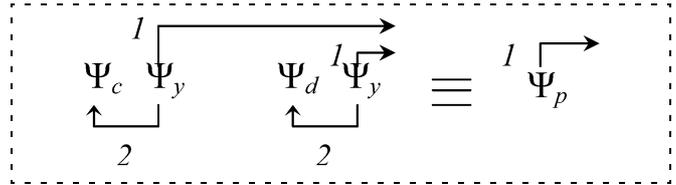


Рис. 4. Алгоритмы параметрического обучения

Стрелка 1 соответствует выполнению условий адекватности (условие сходимости может быть любым) и окончанию обучения; стрелка 2 — нарушению условий адекватности и сходимости и продолжению обучения алгоритмами  $\Psi_c$  или  $\Psi_d$ . При нарушении условия адекватности и выполнении условия сходимости осуществляется переход к следующему находящемуся справа от  $\Psi_y$  алгоритму. Приведем последовательность алгоритмов  $\Psi_c\Psi_y\Psi_d\Psi_y$  к более компактному виду  $\Psi_p$  (рис. 4) и назовем ее алгоритмом параметрического обучения.

Алгоритмы, определяющие число правил  $\Psi_n$  и переменных  $\Psi_m$  нечеткой модели, осуществляют преобразование пространств правил

$$\Psi_n : R^n \rightarrow R^{n'}$$

и входных переменных

$$\Psi_m : X^m \rightarrow X^{m'},$$

сопровождающееся изменением числа коэффициентов линейных уравнений и параметров ФП как в первом

$$\begin{aligned} n \times (m + 1) &\neq n' \times (m + 1); \\ n \times m \times \sigma &\neq n' \times m \times \sigma, \end{aligned}$$

так и во втором случаях

$$\begin{aligned} n \times (m + 1) &\neq n \times (m' + 1), \\ n \times m \times \sigma &\neq n \times m' \times \sigma. \end{aligned}$$

Следовательно, после преобразования пространств  $R^n$  и  $X^m$  алгоритмами  $\Psi_n$  и  $\Psi_m$  за каждым из них должны следовать алгоритмы  $\Psi_c, \Psi_d$  и  $\Psi_y$  параметрического обучения  $\Psi_p$ , уточняющие коэффициенты линейных уравнений  $c$  и параметры ФП  $d$ .

По аналогии получим последовательность алгоритмов  $\Psi_n\Psi_p\Psi_m\Psi_p$ , составляющих алгоритм структурно-параметрического обучения  $\Psi_{sp}$ .

В условиях конвертерного производства на нескольких интервалах времени наблюдается избыток информации по одним видам и недостаток по другим видам дефектов. И в том, и в другом случаях требуется ограниченный по объему массив и алгоритм заполнения, удаления и замены данных в этом массиве.

Такой массив  $A$  представлен в виде двумерной табл. 1, содержащей  $H$  строк данных. Алгоритм формирования данных этой таблицы осуществляет преобразование производственных данных  $\langle t_k, x(k), y(k) \rangle$ ,  $k = \overline{1, K}$ , с  $k \rightarrow \infty$  в табличные  $\langle t_h, x(h), y(h) \rangle$ ,  $h = \overline{1, H}$ :

$$\Psi_T: \langle t_k, x(k), y(k), k = \overline{1, K} \rangle \rightarrow \langle t_h, x(h), y(h), h = \overline{1, H} \rangle.$$

Массив  $A$  состоит из  $q + 1$  подмассивов  $A_1, A_2, \dots, A_{q+1}$ , причем первые  $q$  подмассивов содержат данные с соответствующими дефектами  $y_1, y_2, \dots, y_q$ , а подмассив  $A_{q+1}$  — бездефектные данные. Каждый из подмассивов  $A_1, A_2, \dots, A_q$  состоит из трех групп данных с дефектом, имеющим значения баллов  $\lambda = 3, 2, 1$ .

Формирование табл. 1 осуществляется путем заполнения пустых и замены непустых строк производственными данными соответствующих  $i, \lambda$ -групп табличных данных, имеющих дефекты  $y_i, i = \overline{1, q}$ , и балл  $\lambda = 3, 2, 1$ , руководствуясь понятиями близости входных и выходных переменных и старения информации. Количественными характеристиками такой близости являются меры сходства строк табличных входных

$$J_x(h, \tilde{h}') = \min_{h'} \left\{ \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{|x_j(h) - x_j(h')|}{x_j(h)} \right\} \quad (9)$$

и выходных данных

$$J_y(h, \tilde{h}') = \min_{h'} \left\{ \frac{1}{q-i+1} \sum_{l=i}^q \frac{|y_l(h) - y_l(h')|}{y_l(h)} \right\}, \quad (10)$$

где  $h = \overline{1, H_i^\lambda}, h' = \overline{1, H_i^\lambda}, h' \neq h$ ; производственных входных

$$J_x(k, \tilde{k}') = \min_{k'} \left\{ \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{|x_j(k) - x_j(k')|}{x_j(k)} \right\} \quad (11)$$

и выходных данных

$$J_y(k, \tilde{k}') = \min_{k'} \left\{ \frac{1}{q-i+1} \sum_{l=i}^q \frac{|y_l(k) - y_l(k')|}{y_l(k)} \right\}, \quad (12)$$

где  $k = \overline{1, K_i^\lambda}, k' = \overline{1, K_i^\lambda}, k' \neq k$ ;

а также табличных и производственных входных

$$J_x(h, \tilde{k}) = \min_k \left\{ \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{|x_j(h) - x_j(k)|}{x_j(h)} \right\} \quad (13)$$

и выходных данных

$$J_y(h, \tilde{k}) = \min_k \left\{ \frac{1}{q-i+1} \sum_{l=i}^q \frac{|y_l(h) - y_l(k)|}{y_l(h)} \right\}, \quad (14)$$

где  $h = \overline{1, H_i^\lambda}, k = \overline{1, K_i^\lambda}$ .

Строка  $k$  с избыточными производственными данными подлежит удалению, если меры сходства (11) и (12) удовлетворяют условиям

$$J_x(k, \tilde{k}') \leq J_x^D \text{ и } J_y(k, \tilde{k}') \leq J_y^D,$$

где  $J_x^D, J_y^D$  — предельно допустимые значения критериев.

Таблица 1

Номер строки $h$	$t_h$	$x(h)$	$y_1(h)$	$y_2(h)$	...	$y_q(h)$	$J_x(h, \tilde{h}')$	$J_y(h, \tilde{h}')$
1	$t_1$	$x(1)$	3	0	...	0	$J_x(1, \tilde{h}')$	$J_y(1, \tilde{h}')$
2	$t_2$	$x(2)$	3	1	...	0	$J_x(2, \tilde{h}')$	$J_y(2, \tilde{h}')$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$H_1^3$	...	...	3	0	...	2	...	...
$H_1^3 + 1$	...	...	2	0	...	0	...	...
$H_1^3 + 2$	...	...	2	0	...	2	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$H_1^3 + H_1^2$	...	...	2	0	...	0	...	...
$H_1^3 + H_1^2 + 1$	...	...	1	1	...	0	...	...
$H_1^3 + H_1^2 + 2$	...	...	1	0	...	1	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$H_1 = H_1^3 + H_1^2 + H_1^1$	...	...	1	0	...	0	...	...
$H_1 + 1$	...	...	0	3	...	0	...	...
$H_1 + 2$	...	...	0	3	...	0	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$H_1 + H_2^3$	...	...	0	3	...	0	...	...
$H_1 + H_2^3 + 1$	...	...	0	2	...	1	...	...
$H_1 + H_2^3 + 2$	...	...	0	2	...	0	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$H_1 + H_2^3 + H_2^2$	...	...	0	2	...	0	...	...
$H_1 + H_2^3 + H_2^2 + 1$	...	...	0	1	...	0	...	...
$H_1 + H_2^3 + H_2^2 + 2$	...	...	0	1	...	1	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$H_1 + H_2 = H_1 + H_2^3 + H_2^2 + H_2^1$	...	...	0	1	...	0	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$H_1 + \dots + H_{q-1} + H_q^3 + H_q^2 + 1$	...	...	0	0	...	1	...	...
$H_1 + \dots + H_{q-1} + H_q^3 + H_q^2 + 2$	...	...	0	0	...	1	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$H_1 + \dots + H_{q-1} + H_q$	...	...	0	0	...	1	...	...
$H_1 + \dots + H_q + 1$	...	...	0	0	...	0	...	...
$H_1 + \dots + H_q + 2$	...	...	0	0	...	0	...	...
...	...	...	...	...	...	...	$J_x(H-1, \tilde{h}')$	$J_y(H-1, \tilde{h}')$
$H = H_1 + \dots + H_q + H_{q+1}^0$	$t_H$	$x(H)$	0	0	...	0	—	—

Замена строки  $h$  в  $i$ ,  $\lambda$ -группе на строку  $k$  осуществляется в тех случаях, когда значения критериев (9) и (10) удовлетворяют условиям

$$J_x(h, \tilde{h}') \leq J_x^D \text{ и } J_y(h, \tilde{h}') \leq J_y^D,$$

когда меры сходства (13) и (14) удовлетворяют условиям

$$J_x(h, \tilde{k}) \leq J_x^D \text{ и } J_y(h, \tilde{k}) \leq J_y^D$$

и когда устаревает табличная информация, т. е. моменты времени измерения табличных  $t_h$  и производственных  $t_k$  данных удовлетворяют условию

$$t_k - t_h > \Delta t^D,$$

где  $\Delta t^D$  — допустимое время старения информации.

Таким образом, с учетом алгоритмов формирования данных  $\Psi_T$ , параметрического  $\Psi_p$  и структурно-параметрического  $\Psi_{sp}$  обучения представим на рис. 5 схему организующего алгоритма.

Здесь обучение нечеткой модели прогноза  $i$ -го дефекта заканчивается переходом к обучению нечеткой модели прогноза  $(i + 1)$ -го дефекта.

Таблица 2

Сталь	Ручей	Дефект	Балл	Количество данных ( $N_{\Pi}$ )	Совпадение		Точность прогноза балла	Точность прогноза дефекта
					полное ( $N_{\text{ПС}}$ )	по дефекту ( $N_{\text{СД}}$ )		
1	1	5	0	0	0	0	0	0,95
			1	0	0	0	0	
			2	5	4	1	0,95	
			3	0	0	0	0	
3	2	5	0	0	0	0	0	0,89
			1	0	0	0	0	
			2	11	6	5	0,89	
			3	0	0	0	0	
6	5	3	0	0	0	0	0	0,86
			1	20	17	2	0,92	
			2	160	51	100	0,79	
			3	0	0	0	0	
6	7	6	0	3	3	0	1	0,87
			1	11	5	6	0,86	
			2	1	0	1	0,75	
			3	0	0	0	0	

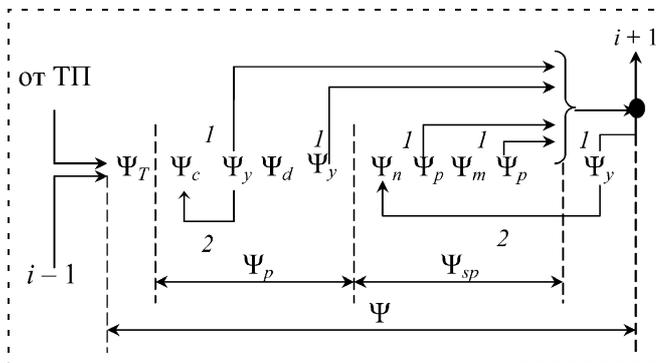


Рис. 5. Схема организующего алгоритма

### Заключение

Все описанные алгоритмы были реализованы в рамках комплекса программ, написанных на языке программирования С++ и работающих под управлением операционной системы Windows 2000 SP4 или Windows XP SP2 совместно с системой управления базами данных Oracle 9.1 [2].

Программный комплекс (ПК) без участия человека осуществляет построение, обучение более 900 нечетких моделей прогнозирования 13 дефектов слябов, изготовленных из семи групп марок сталей в 10 ручьях.

В течение двух недель в АСУ "Качество" конвертерного производства ОА "Северсталь" проводилась опытная проверка ПК на основании разработанной программы испытаний. ПК признается пригодным для прогнозирования дефекта  $i$ , если точность его прогноза  $J_{\Pi}^r(i)$  не ниже допустимого значения  $J_{\Pi}^D = 0,8$ , т. е. удовлетворяет условию

$$J_{\Pi}^r(i) \geq J_{\Pi}^D.$$

Точности прогноза дефекта  $i$  вычисляются по формуле

$$J_{\Pi}^r(i) = \frac{1}{N_{\Pi}^r(i)} \sum_{y_i=0}^3 (N_{\text{ПС}}^r(i, y_i) + 0,75 N_{\text{СД}}^r(i, y_i)),$$

а точность прогноза  $J_{\Pi}^r(i, y_i)$  балла дефекта  $y_i$  — по формуле

$$J_{\Pi}^r(i, y_i) = \frac{1}{N_{\Pi}^r(i, y_i)} (N_{\text{ПС}}^r(i, y_i) + 0,75 N_{\text{СД}}^r(i, y_i)),$$

где  $N_{\Pi}^r$  — число слябов из  $r$ -го ручья, прошедших контроль;  $N_{\text{ПС}}^r$  — число слябов, у которых совпадают расчетные и измеренные значения баллов дефектов (полное совпадение — ПС);  $N_{\text{СД}}^r$  — число слябов, у которых расчетные и измеренные значения баллов дефекта отличаются на 1 (совпадение по дефекту с ошибкой в 1 балл — СД).

Из нее следует, что при достаточном количестве данных ПК можно считать пригодным для прогнозирования дефектов 3, 5, 6 слябов, изготовленных из трех марок сталей 1, 3, 6 в ручьях 1, 2, 5, 7.

### Список литературы

1. Кудинов Ю. И., Иванченко К. С., Кудинов И. Ю. Разработка и идентификация нечетких моделей прогнозирования качества // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 12. С. 12–15.
2. Кудинов Ю. И., Кудинов И. Ю., Иванченко К. С. Моделирование технологических процессов выплавки сталей в конвертерном производстве // Отчет о НИР по х/д № 05008. ЛГТУ. № г. р. 06501, 2007. 164 с.

УДК 621.865.8.001.24

**О. Д. Егоров**, канд. техн. наук, доц.,  
МГТУ "СТАНКИН"

## Особенности расчета преобразователей движения мехатронных и роботизированных систем

*Рассматривается методика определения величины и размерности передаточного отношения мехатронных модулей при различных случаях преобразования движения.*

**Ключевые слова:** мехатронные модули, передаточное отношение, преобразователь движения.

В мехатронных и роботизированных системах для осуществления движения звеньев применяют различные типы мехатронных модулей (ММ) и приводов: электрических, гидравлических, пневматических и комбинированных, которые преобразуют энергию двигателя и информацию устройства управления в требуемое движение выходного звена. Выбор типа ММ или привода зависит от функционального назначения системы, условий ее эксплуатации, вида устройства управления и т. д. В большинстве случаев используют мехатронные модули движения (ММД) или управляемые электроприводы, которые состоят из электромеханической, управляющей и информационной подсистем, силового преобразователя, интерфейсов и коммуникаций, необходимых для передачи энергии, сигналов управления и обратной связи.

Рассмотрим электромеханическую подсистему мехатронного модуля движения и электропривода, состоящую из электромеханического преобразователя (электродвигателя) и механического преобразователя (МП), включающего в себя преобразователи движения (передачи), механизмы выборки мертвого хода, тормозные устройства, направляющие и т. д., преобразующего параметры движения электродвигателя в требуемые параметры движения его выходного звена.

В зависимости от вида двигателя (углового или линейного движения) его выходное звено может совершать вращательное или поступательное движение. Механический преобразователь осуществляет преобразование этого движения в требуемое (вращательное или поступательное) движение своего выходного звена. При этом также происходит преобразование скорости и усилия двигателя за счет передаточного отношения преобразователя движения.

В научной и учебной литературе принимается, что передаточное отношение не имеет размерности. Дело в том, что большинство существовавших ранее и существующих сейчас механических преоб-

разователей, конструктивно оформленных из тел вращения (колес), осуществляют преобразование вращательного движения во вращательное с изменением направления и скорости движения, а также вращающего момента. Поэтому передаточное отношение и определяли как отношение только угловых скоростей входа  $\omega_{\text{ВХ}}$  и выхода  $\omega_{\text{ВЫХ}}$ , имеющих одинаковые размерности. В этом случае у передаточного отношения механического преобразователя размерность отсутствует.

В настоящее время существует большое число механических преобразователей, которые осуществляют преобразование вращательного движения в поступательное и наоборот. В этом случае передаточное отношение, определяемое как отношение скорости входа (угловой  $\omega_{\text{ВХ}}$  или линейной  $V_{\text{ВХ}}$ ) к скорости выхода (линейной  $V_{\text{ВЫХ}}$  или угловой  $\omega_{\text{ВЫХ}}$ ) механического преобразователя, будет иметь размерность, так как размерности входного и выходного параметров различные.

Покажем, как в общем случае можно определить передаточное отношение механического преобразователя.

На рис. 1 представлен механический преобразователь, на вход которого от двигателя поступает требуемое усилие  $M_{\text{ВХ.тр}}$  и скорость  $\Omega_{\text{ВХ}}$  движения, а на выходе возникает усилие  $M_{\text{ВЫХ}}$  и скорость  $\Omega_{\text{ВЫХ}}$ . Следует отметить, что требуемое усилие  $M_{\text{ВХ.тр}}$  двигателя, необходимое для преодоления усилия сопротивления  $M_{\text{ВЫХ}}$ , в большинстве случаев меньше его номинального значения  $M_{\text{н}}$ .

В общем случае усилие и скорость движения можно представить в виде

$$M = \begin{cases} T - \text{вращающий момент при вращательном движении;} \\ F - \text{сила при поступательном движении;} \end{cases}$$

$$\Omega = \begin{cases} \omega - \text{угловая скорость при вращательном движении;} \\ V - \text{линейная скорость при поступательном движении.} \end{cases}$$

Передаточное отношение механического преобразователя запишем в виде

$$U = \frac{\Omega_{\text{ВХ}}}{\Omega_{\text{ВЫХ}}} = \frac{M_{\text{ВЫХ}}}{M_{\text{ВХ.тр}} \eta}, \quad (1)$$

где  $\eta$  — коэффициент полезного действия механического преобразователя.



Рис. 1. Схема механического преобразователя с входными и выходными параметрами

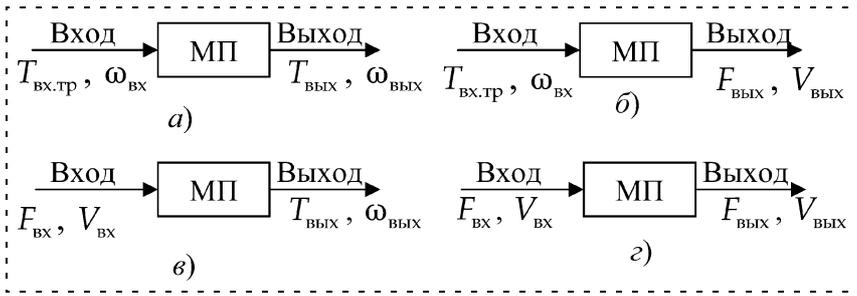


Рис. 2. Схемы механических преобразователей с входными и выходными параметрами

Из формулы (1) видно, что передаточное отношение механического преобразователя может быть выражено четырьмя способами в зависимости от характера движения его входного и выходного звеньев и передаваемых усилий:

- при вращательном движении входного и выходного звеньев механического преобразователя (рис. 2, а)

$$U_{ВВ} = \frac{\omega_{ВХ}}{\omega_{ВЫХ}} = \frac{M_{ВЫХ}}{T_{ВХ.тр} \eta};$$

- при вращательном движении входного звена и поступательном движении выходного звена (рис. 2, б)

$$U_{ВП} = \frac{\omega_{ВХ}}{V_{ВЫХ}} = \frac{F_{ВЫХ}}{T_{ВХ.тр} \eta} \text{ (М}^{-1}\text{)};$$

- при поступательном движении входного звена и вращательном движении выходного звена (рис. 2, в)

$$U_{ПВ} = \frac{V_{ВХ}}{\omega_{ВЫХ}} = \frac{T_{ВЫХ}}{F_{ВХ.тр} \eta} \text{ (М)};$$

- при поступательном движении входного и выходного звеньев (рис. 2, г)

$$U_{ПП} = \frac{V_{ВХ}}{V_{ВЫХ}} = \frac{F_{ВЫХ}}{F_{ВХ.тр} \eta}.$$

Таким образом, можно сделать вывод, что в общем случае передаточное отношение имеет размерность.

Для подтверждения этого вывода рассмотрим определение передаточного отношения различных преобразователей движения (передач).

Передаточное отношение реечного преобразователя движения (рис.3), состоящего из шестерни 1 диаметром  $d_1$ , вращающейся с угловой скоростью  $\omega_1$ ,

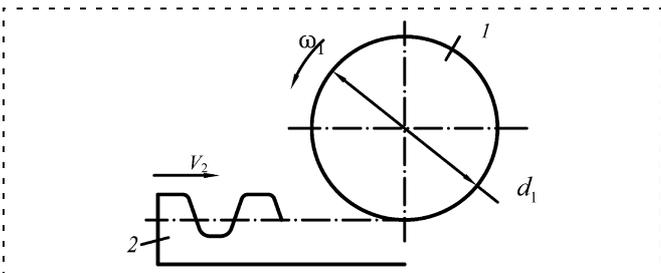


Рис. 3. Реечный преобразователь движения

и рейки 2, перемещающейся с линейной скоростью  $V_2$ , определим в зависимости от того, какое из указанных звеньев является ведущим, какое ведомым, т. е. какое осуществляется преобразование движения — вращательное в поступательное или поступательное во вращательное.

При преобразовании вращательного движения шестерни 1 в поступательное движение рейки 2 передаточное отношение записывается в виде [1]

$$U_{ВП} = \frac{\omega_1}{V_2} = \frac{2V_2}{d_1 V_2} = \frac{2}{d_1} = \frac{2}{m z_1} \text{ (М}^{-1}\text{)},$$

где  $\omega_1$  — угловая скорость шестерни ( $c^{-1}$ ):

$$\omega_1 = \frac{2V_2}{d_1};$$

$V_2$  — линейная скорость рейки (м/с);  $m$  — модуль зуба зубчатого колеса (м);  $z_1$  — число зубьев зубчатого колеса.

При преобразовании поступательного движения рейки 2 во вращательное движение шестерни 1 передаточное отношение равно

$$U_{ПВ} = \frac{V_2}{\omega_1} = \frac{\omega_1 d_1}{2\omega_1} = \frac{d_1}{2} = \frac{m z_1}{2} \text{ (М)},$$

где линейная скорость рейки

$$V_2 = \frac{\omega_1 d_1}{2}.$$

Передаточное отношение желательно принимать в пределах  $U_{ВП} \approx (10...200) \text{ М}^{-1}$  и  $U_{ПВ} \approx (0,005...0,1) \text{ М}$ .

Для преобразователя движения с гибкой связью (рис. 4), состоящего из шкива (барабана) 1 и гибкой связи (ремня, стальной ленты, троса) 2, передаточное отношение без учета проскальзывания гибкой связи определяют аналогично реечному преобразователю движения:

- при преобразовании вращательного движения барабана в поступательное движение гибкой связи (рис. 4, а)

$$U_{ВП} = \frac{2}{d_1} \text{ (М}^{-1}\text{)}; \tag{2}$$

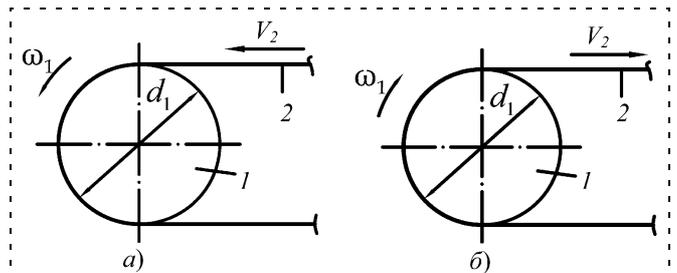


Рис. 4. Преобразователь движения с гибкой связью

- при преобразовании поступательного движения гибкой связи во вращательное движение барабана (рис. 4, б)

$$U_{пв} = \frac{d_1}{2} \text{ (м)}. \quad (3)$$

Если гибкой связью является цепь, то шкив (барабан) заменяют на звездочку, делительный диаметр  $D_3$  (м) которой определяют в виде

$$D_3 = \frac{Pz}{\pi}, \quad (4)$$

где  $P$  — шаг между зубьями звездочки (цепи) (м);  $z$  — число зубьев звездочки. Затем в формулы (2) и (3) вместо диаметра  $d_1$  барабана подставляют делительный диаметр  $D_3$  звездочки и определяют передаточное отношение цепного преобразователя движения.

Передаточное отношение механизма наматывания (смазывания) гибкого элемента (рис. 5), состоящего из блока 1, на котором закреплен гибкий элемент 2, определяют указанным выше способом. Следует только отметить, что в этом случае передаточное отношение будет переменным из-за изменения диаметра  $d_1$  блока вследствие наматывания (смазывания) на него гибкого элемента. Соответственно будет изменяться и линейная скорость  $V_2$  (угловая скорость  $\omega_1$ ) гибкого элемента.

Передаточное отношение шарико-винтового преобразователя (ШВП) движения (рис. 6), состоящего из винта 1, гайки 2 и шариков 3, определяют следующим образом:

- при преобразовании вращательного движения винта (гайки) в поступательное движение гайки (винта)

$$U_{вп} = \frac{\omega_1}{V_2} = \frac{2\pi V_2}{PKV_2} = \frac{2\pi}{PK} \text{ (м}^{-1}\text{)},$$

где  $\omega_1$  — угловая скорость винта (гайки) ( $c^{-1}$ ):

$$\omega_1 = \frac{2\pi V_2}{PK};$$

$V_2$  — линейная скорость гайки (винта) (м/с);  $P$  — шаг резьбы (м);  $K$  — число заходов резьбы;

- при преобразовании поступательного движения гайки (винта) во вращательное движение винта (гайки)

$$U_{пв} = \frac{V_2}{\omega_1} = \frac{\omega_1 PK}{2\pi\omega_1} = \frac{PK}{2\pi} \text{ (м)},$$

где линейную скорость гайки (винта) определяют в виде

$$V_2 = \frac{\omega_1 PK}{2\pi} \text{ (м/с)}.$$

Желательно принимать  $U_{вп} = (3...20) \cdot 10^2 \text{ м}^{-1}$ ,  $U_{пв} = (5...33) \cdot 10^{-4} \text{ м}$ .

Найдем передаточное отношение механического преобразователя, состоящего из двух преобразовате-

лей движения (рис. 7). Первый преобразователь движения включает в себя ведущий шкив 1 и ведомую гибкую связь 2, второй преобразователь движения — ведущую гибкую связь 2 и ведомый шкив 3.

Передаточное отношение такого механического преобразователя равно

$$U = U_{12}U_{23} = \frac{\omega_1}{\omega_3}, \quad (5)$$

где  $U_{12}$  — передаточное отношение преобразователя движения при преобразовании вращательного движения шкива 1 в поступательное движение гибкой связи 2, которое на основании формулы (2) равно

$$U_{12} = \frac{\omega_1}{V_2} = \frac{2}{d_1};$$

$U_{23}$  — передаточное отношение преобразователя движения при преобразовании поступательного движения гибкой связи 2 во вращательное движения шкива 3, которое на основании формулы (3) равно

$$U_{23} = \frac{V_2}{\omega_3} = \frac{d_3}{2};$$

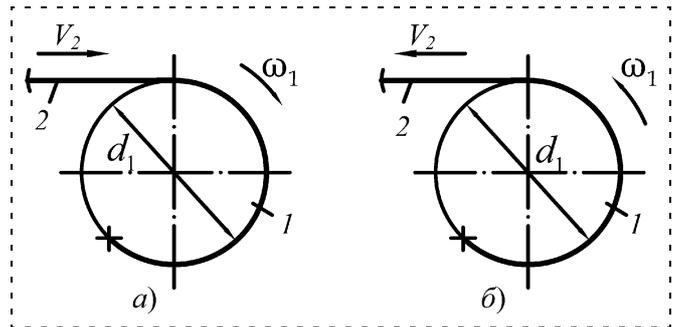


Рис. 5. Механизм наматывания (а) и сматывания (б) гибкого элемента

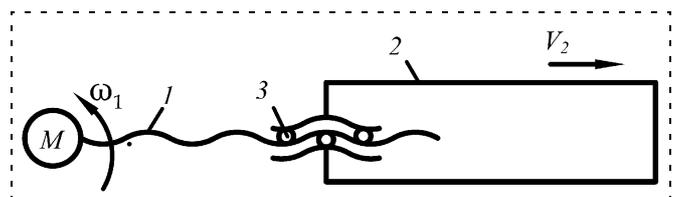


Рис. 6. Шарико-винтовой преобразователь

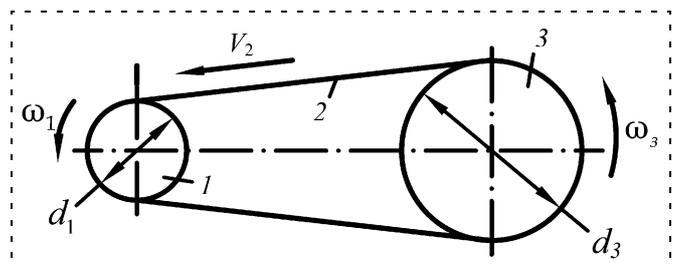


Рис. 7. Преобразователь движения с двумя шкивами и гибкой связью

$\omega_1$  и  $\omega_3$  — угловые скорости шкивов 1 и 3 соответственно;  $V_2$  — линейная скорость гибкой связи 2.

Подставляя значения  $U_{12}$  и  $U_{23}$  в зависимость (5), получим передаточное отношение механического преобразователя

$$U = \frac{\omega_1}{\omega_3} = \frac{2}{d_1} \frac{d_3}{2} = \frac{d_3}{d_1}.$$

Найдем передаточное отношение захватного устройства робота (рис. 8), состоящего из электродвигателя 1, выходной вал которого вращается с угловой скоростью  $\omega_{дв}$ , шарико-винтового преобразователя, включающего в себя винт 2, жестко скрепленный с валом электродвигателя, гайку 3 и шарики 4, реечного преобразователя, в состав которого входят рейка 5 и зубчатое колесо 6 и звенья 7 длиной  $l$ , образующие параллелограммы, на которых подвижно

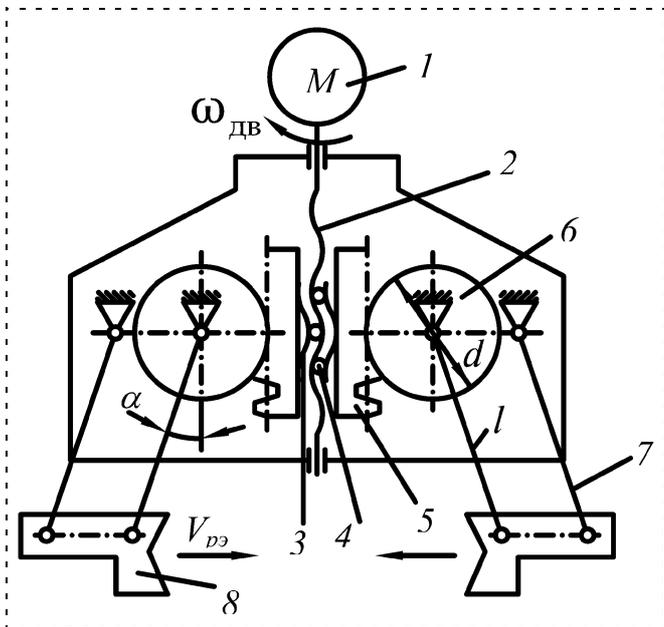


Рис. 8. Захватное устройство робота

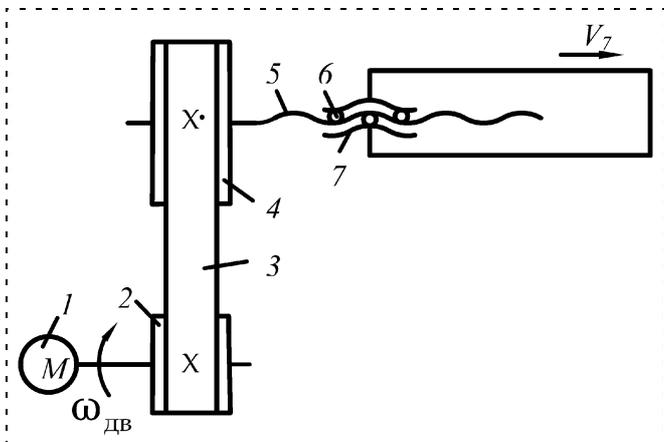


Рис. 9. Привод токарного станка

закреплены рабочие элементы 8, совершающие плоскопараллельное движение с линейной скоростью  $V_{рз}$ .

Передаточное отношение захватного устройства с учетом приведенных выше формул можно определить в виде

$$U = U_{в.вп} U_{р.пв} U_{рз} = \frac{2\pi}{PK} \frac{d}{2} \frac{1}{l \cos \alpha} = \frac{\omega_{дв}}{V_{рз}} \text{ (м}^{-1}\text{)},$$

где  $U_{в.вп}$  — передаточное отношение шарико-винтового преобразователя при преобразовании вращательного движения винта (вала двигателя) 2 в поступательное движение гайки 3;  $U_{р.пв}$  — передаточное отношение реечного преобразователя при преобразовании поступательного движения рейки 5 во вращательное движение зубчатого колеса 6;  $U_{рз}$  — передаточное отношение между звеньями 7 параллелограмма и рабочим элементом 8.

Зная, в каких пределах могут находиться передаточные отношения этих преобразователей движения, их выбирают такими, чтобы массогабаритные параметры захватного устройства были минимальными.

Определим передаточное отношение привода токарного станка, упрощенная схема которого показана на рис. 9, состоящего из электромеханического преобразователя (электродвигателя) 1, вал которого вращается с угловой скоростью  $\omega_{дв}$ , ременного преобразователя, включающего в себя ведущий шкив 2, ремень 3 и ведомый шкив 4, и шарико-винтовой преобразователь, в состав которого входят винт 5, шарики 6 и гайка 7, жестко соединенная со шпинделем и совершающая поступательное движение со скоростью  $V_7$ .

Передаточное отношение с учетом приведенных выше формул определяют в виде

$$U = U_p U_{в.вп} = \frac{\omega_{дв}}{V_7} \text{ (м}^{-1}\text{)}, \quad (6)$$

где  $U_p$  — передаточное отношение ременного преобразователя при преобразовании вращательного движения ведущего шкива (вала электродвигателя) 2 во вращательное движение ведомого шкива 4 и винта 5;  $U_{в.вп}$  — передаточное отношение шарико-винтового преобразователя при преобразовании вращательного движения винта 5 в поступательное движение гайки 7.

При проектировании привода одно передаточное отношение задается в рекомендуемом интервале его значений, а другое передаточное отношение находят по формуле (6).

Рассмотрим определение передаточного отношения электромеханического привода ленточного транспортного устройства робототехнического комплекса холодной штамповки (рис. 10), состоящего из электромеханического преобразователя (ЭМП) (электродвигателя) 1, МП, включающего в себя многоступенчатый преобразователь движения

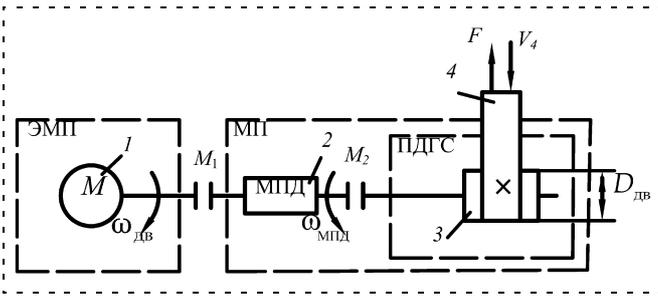


Рис. 10. Схема электромеханического привода ленточного конвейера

(МПД) (редуктор) 2 и преобразователь движения с гибкой связью (ПДГС) (ленточный преобразователь движения) на основе барабана 3 и ленты 4, движущейся со скоростью  $V_4$ , а также двух муфт  $M_1$  и  $M_2$ , соединяющих вал ЭМП с входным валом МПД и выходной вал МПД с валом ПДГС.

Если исходными данными при проектировании ленточного транспортного устройства являются выходные данные привода, т. е. сила  $F$  сопротивления, скорость  $V_4$  ленты 4 и диаметр  $D_б$  барабана 3, то требуемую мощность двигателя определяют по известным методикам расчета [2], а затем по стандартам выбирают двигатель. Частота  $n_{дв}$  (угловая скорость  $\omega_{дв}$ ) вращения вала двигателя указывается в стандартах. Таким образом, общее передаточное отношение привода определяют в виде

$$U = U_{МПД} U_б = \frac{\omega_{дв}}{V_4} \text{ (м}^{-1}\text{)},$$

где  $U_б$  — передаточное отношение ленточного преобразователя движения (передаточное отношение между выходным валом многоступенчатого преобразователя движения и лентой):

$$U_б = \frac{\omega_{МПД}}{V_4} = \frac{2V_4}{D_б V_4} = \frac{2}{D_б} \text{ (м}^{-1}\text{)};$$

$\omega_{МПД}$  — угловая скорость выходного вала многоступенчатого преобразователя движения (угловая скорость барабана)

$$\omega_{МПД} = \frac{2V_4}{D_б} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$D_б$  — диаметр барабана (м);  $U_{МПД}$  — передаточное отношение многоступенчатого преобразователя движения:

$$U_{МПД} = \frac{U}{U_б}.$$

Общее передаточное отношение распределяют по отдельным ступеням многоступенчатого преобразователя движения по известным методикам [3].

В процессе расчета многоступенчатого преобразователя движения фактическое передаточное от-

ношение  $U_{МПД ф}$  может отличаться от исходного (теоретического)  $U_{МПД}$ . В этом случае общее передаточное отношение изменится, и скорость движения ленты транспортного устройства будет отличаться от заданной. Для ликвидации этой погрешности необходимо изменить передаточное отношение  $U_б$  ленточного преобразователя движения так, чтобы общее передаточное отношение привода осталось прежним:

$$U = U_{МПД ф} U_{б.ф} = U_{МПД ф} \frac{2}{D_{б.ф}}, \quad (7)$$

где  $U_{б.ф}$  — фактическое (измененное) передаточное отношение ленточного преобразователя движения;  $D_{б.ф}$  — фактический диаметр барабана.

Из формулы (7) определяем фактический диаметр барабана:

$$D_{б.ф} = \frac{2U_{МПД ф}}{U} \text{ (м)}.$$

Таким образом, изменяя диаметр барабана, можно добиться заданной скорости движения ленты транспортного устройства.

В цепном транспортном устройстве вместо барабана установлена звездочка, делительный диаметр  $D_з$  которой определяют по формуле (4).

Для определения передаточного отношения привода цепного транспортного устройства в приведенных выше формулах для ленточного транспортного устройства заменяют диаметр  $D_б$  барабана на диаметр  $D_з$  звездочки. Весь остальной расчет аналогичен расчету ленточного транспортного устройства.

В заключение можно сказать, что передаточное отношение механического преобразователя движения есть отношение скоростей его входа к выходу независимо от вида их движения. Следовательно, передаточное отношение в общем случае имеет размерность.

Предложенная методика расчета передаточного отношения как отдельных преобразователей движения, так и механического преобразователя в целом, позволяет упростить расчеты мехатронных модулей и электрических приводов, что особенно актуально при автоматизированных методах расчета сложных мехатронных и роботизированных систем.

#### Список литературы

1. Бурдаков С. Ф., Дьяченко В. А., Тимофеев А. Н. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов: Учеб. пособ. для студ. вузов. М.: Высш. шк. 1986. 264 с.
2. Дунаев П. Ф., Леликов О. П. Конструирование узлов и деталей машин: Учеб. пособ. для машиностроит. вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1985. 416 с.
3. Жуков К. П., Гуревич Ю. Е. Проектирование деталей и узлов машин: Учебн. для вузов. М.: Изд-во "Станкин", 1999. 615 с.

УДК 528.063

**В. Е. Пряничников**, канд. физ.-мат. наук,  
директор Международной лаборатории "Сенсорика",  
Институт прикладной математики  
имени М. В. Келдыша РАН

## Алгоритмическое обеспечение дистанционных сенсоров мобильных роботов

*Рассмотрено применение на мобильных роботах дистанционных сенсоров, работающих в условиях помех и задержек. Построены программно-аппаратные комплексы для очувствления мобильных, подводных и буровых роботов, для построения программных симуляторов и диагностики роботов специального назначения. Предложена организация верхнего уровня алгоритмического обеспечения для унификации систем управления мобильных роботов с дистанционными сенсорами.*

**Ключевые слова:** дистанционные и ультразвуковые сенсоры, мобильные роботы, алгоритмическое обеспечение информационно-управляющих систем.

Применение дистанционных сенсоров в робототехнике связано с возникновением существенных для управления задержек в измерительных каналах, а также искажений и помех, вносимых средой распространения сигналов. Для преодоления этих проблем нами разработан комплекс математических моделей работы ультразвуковых и оптических сенсоров в составе систем управления движением мобильных роботов. Анализ моделей позволил построить и верифицировать новые способы обработки и сопоставления сенсорных и управляющих данных в режиме реального времени, а также навигационные алгоритмы на основе экспертных схем и с учетом динамики движения. В статье рассматриваются основные типы мобильных роботов, и для них предложено алгоритмическое обеспечение верхнего уровня, позволяющее унифицировать системы управления, использующие дистанционные сенсоры в контуре обратных связей.

### Объекты управления

В последнее время существенно расширяется применение мобильных роботов (МР) для аварийно-спасательных операций, в боевых условиях, под водой. Во всех развитых странах действуют робототехнические центры, оснащенные десятками роботов специального назначения; в Ираке, Израиле и других горячих точках применяются сотни и тысячи МР. Ведущие производители таких роботов, используемых в России, — Ковровский механический завод — МГТУ им. Баумана, ЦНИИРТК (роботы для радиационной и химической разведки), НИИМВС (Таганрог), Волгоградский ГТУ (шагающие машины), ВНИИТрансМаш — "Ровер" (роботы для кос-

моса, поставляемые в ряд стран), МГТУ "Станкин", а также фирмы TeleRob (Германия), Brokk (Швеция), Kentree (Ирландия). Эти роботы имеют разветвленное навесное оборудование, поисковые системы, однако их перемещение контролируется только оператором по телекамерам, без необходимой сенсорной поддержки. Имеется большой риск потери таких роботов в случае нарушения связи с ними, отсутствуют элементы автономности. Над усовершенствованием и сенсорным оснащением таких роботов работают в Международной лаборатории "Сенсорика", ИМП им. М. В. Келдыша РАН [1—5] и других организациях [6—9]. Подводные роботы, например разработанные ИМТ ДВО РАН, решают задачи автономного обследования дна морей и океанов по программным траекториям; для них актуально расширение возможностей гидролокаторов и более гибкое планирование маршрута [10—13].

Для качественного решения возникающих новых задач требуется усовершенствование средств навигации и управления МР, построение нового математического обеспечения, в том числе для реализации одной из главных целей программного управления — решения так называемой локомоционной задачи. Ключевая проблема — получение данных о внешней среде как для адаптивного управления, так и для супервизорного режима. Такую информацию доставляют преимущественно дистанционные сенсоры (ДС). В сложных условиях (задымление, вода) круг эффективных сенсоров существенно сужается, на первый план выходят именно ультразвуковые, а также оптические методы формирования обратных связей. В результате появляется необходимость построения интеллектуального программного обеспечения, разработки для этого специальных, новых моделей, методов и средств логической фильтрации помех.

Приведем классификацию объектов программного управления — мобильных роботов с дистанционными сенсорами для обеспечения обратных связей, которые представляют собой программно-аппаратные системы с мультисенсорным оснащением и действуют в условиях неустраняемой неопределенности внешней обстановки и сильных помех, вносимых средой распространения сигналов [6—9]. Цели управления: патрулирование, обследование местности и помещений, поиск объектов на дне морей, перемещение рабочих органов в режиме автоматического и супервизорного управления при решении локомоционных задач. Классификация необходима для выявления основных типов алгоритмов мобильных роботов, оценки потоков данных и задержек в информационно-управляющих системах. Затем на ее основе строится достаточно универсальная программная система, позволяющая унифицировать реализацию управления различных мобильных роботов на распределенной вычислительной среде. Классификационные признаки пяти типов

рассматриваемых мобильных роботов ( $Mr_1, \dots, Mr_5$ ) показаны в табл. 1. Они определяют, в каком навигационном пространстве функционируют роботы (детерминированном или недетерминированном) и какова размерность этого пространства (1, 2 или 3). Навигационные данные входят в операционное пространство — совокупность данных, определяющих функционирование робота.

На рис. 1—4 (см. третью сторону обложки) приведены фотографии тех реальных роботов перечисленных в таблице типов, для которых нами разрабатывались различные программно-аппаратные средства и алгоритмы. Все эти объекты и их математические модели без особых ограничений общности укладываются в достаточно очевидную схему, показанную на рис. 5.

Рис. 5 отражает взаимодействие роботов с реальным миром через сенсорные системы, эффекторы и соответствующее математическое обеспечение, которое разделяется на следующие группы (как правило, реализованные на различных вычислительных машинах):

- бортовые программные системы, реализующие алгоритмы  $As, An, Au$ ;
- интерфейс  $Vi$  с оператором  $Mu$ , осуществляющим супервизорное управление (выносной пульт на основе отдельного процессора);
- исследовательские программные системы, реализующие алгоритмы  $Vr, Vs, Ve$ , обеспечивающие разработку и анализ систем управления мобильных роботов, в режиме имитации работы реальных сенсоров и/или реального робота и его внешней среды. Данное программное обеспечение (ПО) служит как для математического моделирования, так и для обучения операторов, для отработки сценариев применения роботов в соответствующем компьютерном тренажере. Бортовые программы обеспечивают реализацию алгоритмов управления целенаправленными действиями мобильных роботов, постановка целей выполняется оператором

или самим роботом в автономном режиме. Мобильный робот, сенсоры и внешняя среда для построения ПО должны быть параметризованы и описаны в моделях  $Mr, Ms, Me$ , на базе которых и строится управление. Здесь  $Mr, Ms, Me$  — модели робота, сенсоров и внешнего мира соответственно. Информация, поступающая от сенсоров, вместе с управляющими сигналами и параметрами роботов, составляет операционную среду. Исследовательское программное обеспечение  $Vr, Vs, Ve$  появляется только на этапе разработки системы управления робота или при работе всего комплекса в качестве тренажера, при этом оно замещает реальные объекты программно синтезированными.

Таблица 1

Основные типы мобильных роботов, операционная среда и размерность навигационной задачи

Основные типы мобильных роботов	Внешняя среда		Размерность навигационной задачи		
	Детерминированная	Недетерминированная	1	2	3
<b>Mr1.</b> Роботы для бездорожья, военные применения, мобильное патрулирование, для чрезвычайных ситуаций с функцией обеспечения автоматического возврата		+		+	+
<b>Mr2.</b> Автоматизированные транспортные системы для детерминированных и размеченных сред передвижения (внутрирешетчатые роботы, линейный привод и т. п.)	+		+	+	
<b>Mr3.</b> Гибкие транспортные системы для недетерминированной среды (движение по коридорам в больницах, офисах, при патрулировании помещений, автовождение)		+		+	
<b>Mr4.</b> Тренажеры, учебные и домашние роботы (газонокосилки, пылесосы, сиделки, игровые, футболисты и т. п.)	+			+	
<b>Mr5.</b> Подводные роботы для поисковых, технологических и исследовательских задач		+			+

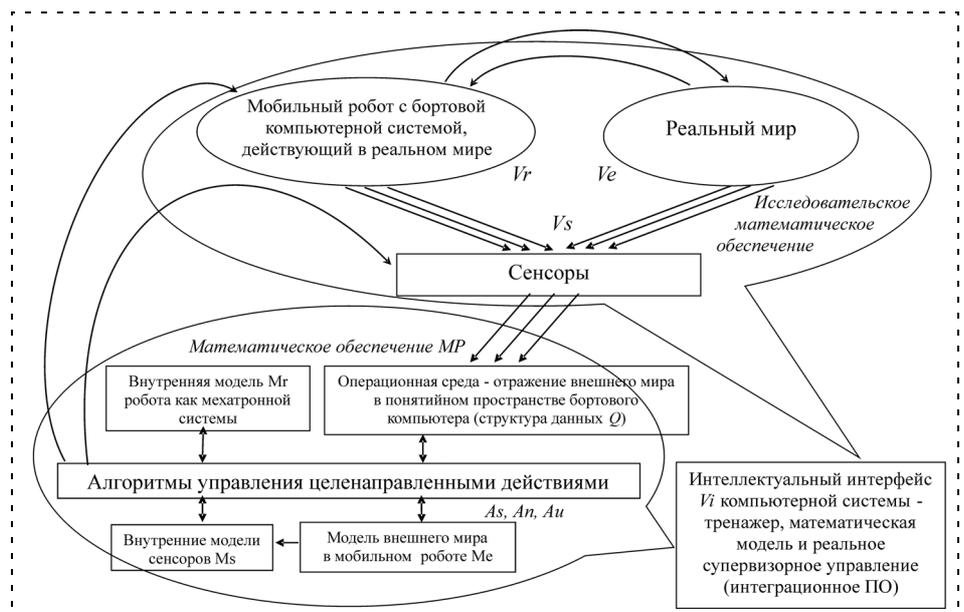


Рис. 5. Система распределенного управления и обработки данных для навигации мобильных роботов с дистанционными сенсорами

### Структура интеграционного программного обеспечения

Рассмотрим подробнее реализуемые алгоритмы  $As$ ,  $An$ ,  $Au$ ,  $Vr$ ,  $Vs$ ,  $Ve$ ,  $Vi$  функции, определим их взаимосвязь и потоки данных  $Q$ , лежащие в основе интеграционного программного обеспечения.

- ♦  $Q$  — операционная среда мобильного робота, представляющая собой совокупность данных, которые определяют функционирование конкретного робота с дистанционными сенсорами в составе системы управления и отображаются (полностью или частично) через интерфейс  $Vi$  с оператором  $Mu$ . Назовем операционную среду  $Q$  одно-, двух- или трехмерной в зависимости от того, какие перемещения робота являются доминирующими — линейные, или перемещения по местности, которая адекватно представляется в виде плоской карты, или перемещения в некотором объеме (например, как у манипуляторов или подводных роботов). Заметим, что размерность пространства обобщенных координат  $X(t)$ , определяющих движение роботов как электромеханических систем, может быть существенно выше, чем размерность 1, 2 или 3 в зависимости от конструкции таких роботов. Однако в пространстве координат  $X(t)$  мобильного робота локомоционная задача ставится на некотором подпространстве, имеющем размерность 1, 2 или 3 (будем называть его подпространством локомоционной задачи или навигационным подпространством).
- ♦  $Au$  — алгоритм формирования управляющих команд  $U(t)$  на основе внутреннего представления  $Mr$  (модель динамических возможностей робота и его параметры). Размерность вектора управления  $U(t)$  соответствует размерности вектора обобщенных координат  $X(t)$ . То есть предполагается, что часть обобщенных координат робота является управляемой, а остальные координаты либо вычисляются в виртуальной модели робота  $Vr$  (например, на основе решения дифференциальных уравнений движения), либо изменяются в процессе движения реального робота в соответствии с его кинематическими связями.
- ♦  $As$  — алгоритм обработки измерений и формирования результатов определения  $Xs(t)$  по первичным измерениям  $Ls$  (накопленным в шлейф или изображении), прошедших фильтрацию с привлечением модели сенсоров  $Ms$ .
- ♦  $An$  — алгоритм навигации для определения положения  $Xm(t)$  и формирования целевой функции  $Xp(t)$  на основе  $Xs(t)$  и карты внешнего мира  $Me$  (представленной в памяти робота).  $Xp(t)$  может передаваться в алгоритм  $Au$  и через интерфейс  $Vi$  от оператора  $Mu$ .
- ♦  $Vs$ ,  $Vr$ ,  $Ve$  — виртуальные представления о сенсорах, роботе и внешней среде для замещения

реальных устройств при тестировании алгоритмов робота в рамках математического моделирования или в процессе работы тренажера. В случае работы в реальном мире  $Vs$ ,  $Vr$  обозначают драйверы дистанционных сенсоров и робота, а  $Ve$  — непосредственно внешняя среда.

- ♦  $X$  — реальное положение робота в пространстве его обобщенных координат. Как отмечалось, особое внимание необходимо обратить на координаты, по которым ведется навигация робота (локомоционное подпространство), так как в работе рассматриваются мобильные роботы, решающие именно локомоционную задачу. Эти данные непосредственно не доступны системе управления (рис. 5). В случае тестирования алгоритма или при работе тренажера они программно строятся моделирующей подсистемой  $Vr$  на основе модели внешней среды  $Ve$ .
- ♦  $Xp$  — целевая программная траектория, формируемая либо через интерфейс интеграционного программного обеспечения  $Vi$  оператором супервизорного управления  $Mu$ , либо вычисляемая алгоритмом  $An$  по данным  $Xm$  (например, формируемая на основе правил достижения цели).
- ♦  $t$  — текущее время, изменяемое с шагом  $dt$ ,  $t_k = t - kdt$ ,  $k = 0, 1, \dots$ , — моменты времени наблюдения системы и формирования цифровых команд управления; синхронизация работы алгоритмов рассмотрена далее подробнее.
- ♦  $Ms$ ,  $Mr$ ,  $Me$  — данные (структуры данных, модели, параметры), которые положены в основу соответствующих алгоритмов.

Взаимосвязь разработанных алгоритмов и программ, потоков данных можно представить более наглядно в виде диаграммы (рис. 6).

В скобках на рис. 6 показаны параметры процедур (структуры данных), рядом со стрелками подписаны передаваемые данные. Для наглядности запи-

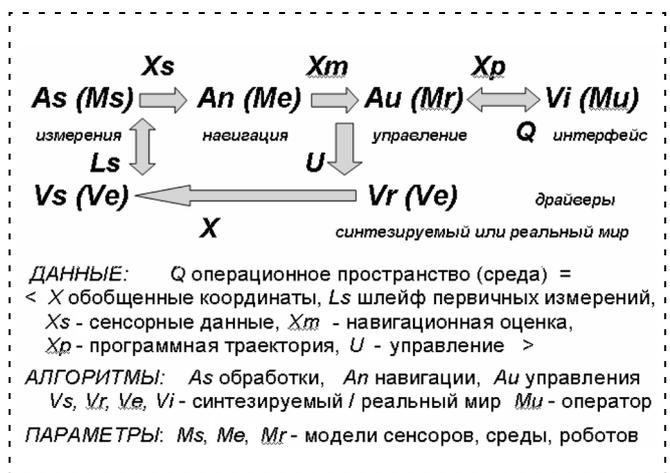


Рис. 6. Основные потоки данных в системе управления

шем эту диаграмму в виде цепочки функциональных связей по типу вызова программ (процедур):

$$\begin{aligned} X(t) &= Vr(Ve, U(t)); \\ Ls(t) &= Vs(Ve, X(t)); \\ Xs(t) &= As(Ms, Ls(t, t - dt, \dots, t - kdt)); \\ Xm(t) &= An(Me, Xs(t)); \\ Xp(t) &= Vi(Mu, Xm); \\ U(t) &= Au(Mr, Xm(t) - Xp(t)). \end{aligned}$$

Создание единого программного комплекса, условно показанного на рис. 5 и детализированного в виде структуры (рис. 6), очень актуально. Для этого требуется разработка соответствующего интеграционного математического обеспечения и создание многофункциональных интерфейсных программ, виртуальных пультов управления. Такая система должна обеспечивать формирование шлейфов всех данных (текущих и архивных) в операционном пространстве  $Q$  и доступ к ним в распределенном режиме работ. Сравним два подхода к реализации такого программного обеспечения — MS robotic studio и систему IAR, разработанную в лаборатории "Сенсорика". Первая система обеспечивает удобные решения, но при этом потребляет существенные ресурсы (от 500 Мбайт) и не всегда обеспечивает работу в реальном масштабе времени из-за применения общих сетевых подходов. Система IAR позволяет радикально оптимизировать ресурсы, вписаться в сравнительно малые мощности бортовых вычислительных систем и, самое главное, допускает модернизацию структуры работающих модулей, вплоть до их замены, непосредственно во время исполнения программ. Это дает принципиально новые возможности разработки, тестирования, диагностики, самодиагностики и эксплуатации мобильных роботов, что подтверждается работами по модернизации роботов для МЧС.

Однако для создания мобильных роботов с дистанционными сенсорами ключевыми моментами являются разработка самих алгоритмов работы отдельных модулей и решение принципиальных вопросов реализуемости алгоритмов для обработки сенсорной информации, оценки достаточности получаемых данных для управления, навигации и проблемы формирования операционной среды мобильных роботов. Для ультразвуковых сенсоров необходимо предложить алгоритмы извлечения максимума информации из эхосигналов (максимума для принятого эхолокационного способа получения данных о внешней среде при ограничениях на аппаратуру). Эти проблемы решаются в работах [1, 2], а полученные результаты исследований позволяют при их применении строить эффективные мобильные системы с ультразвуковыми и оптическими сенсорами в рамках рассмотренной схемы организации вычислений. Далее рассмотрим примеры формирования операционных сред, в которых размерность пространства навигационной задачи равна 1, 2 и 3.

## Операционная среда и формирование управления

Операционная среда мобильного робота

$$Q = \langle X, Ls, Xs, Xm, Xp, U \rangle$$

заполняется асинхронно в виде шлейфов данных различных уровней обработки измерений. Например,

$$Xs(t) = As(Ms, Ls(t - T), \dots, Ls(t - T - k dt)),$$

где  $dt$  — интервал времени поступления данных в шлейф  $Ls$ ;  $T$  — запаздывание, время обработки данных;  $Ls$  — шлейф первичных измерений или изображений, поступающих от дистанционных сенсоров в вычислитель  $As$  по запросам от  $An$  с интервалом времени  $dt$ , т. е. по шлейфу  $Ls$  с помощью  $As$  формируется шлейф  $Xs$ . При этом оба шлейфа имеют фиксированную длину, соответствующую размеру применяемых скользящих окон для обработки данных. Другой уровень шлейфов формируется в виде архивов прореженных первичных шлейфов и позволяет хранить данные за все время выполнения миссии мобильным роботом. Программная поддержка такой технологии должна минимизировать процессы передачи массивов данных, особенно на распределенной вычислительной среде.

При вычислении команд управления  $U(t)$  необходимо учитывать суммарную задержку поступления данных, проводить их экстраполяцию (интерполяцию, ретрополяцию [12]), фильтрацию и обеспечивать синхронизацию всех вычислительных процессов. На диаграмме (рис. 6) показаны три цикла — основной для формирования команд управления и два других (показаны двойными стрелками) — асинхронный цикл взаимодействия с супервизором  $Mu$  и цикл управления сенсорами (с более высокой частотой опроса датчиков и управления сканирующими устройствами). Эти особенности учитывает разработанная нами система IAR.

Внутреннее представление данных  $Q$  не является наглядным для человека, оно нацелено только на задачу обеспечения обратной связи для управления МР. Рассмотрим примеры одно-, двух- и трехмерной операционной среды механических объектов с ультразвуковыми сенсорами. Такие задачи управления относятся к новому классу задач построения информационно-измерительных систем и задач теоретической механики, в которых обеспечение поступления информации о движении механических объектов играет решающую роль для управления в режиме реального времени.

Наиболее эффективным и дешевым средством для всех трех типов объектов управления являются ультразвуковые сенсоры. Их максимальные дальности работы в локационном режиме — 2,5; 8 и 50 м, а в режиме запрос-ответ от маяка для навигации роботов — до нескольких километров в воде. При этом 10...70 % измерений могут оказаться недостоверными, искаженными средой распространения волн (показание нулевой или максимальной дальности, скачки на величину 3...10 длин волн, удвое-

ние дальности и т. п.). Результаты экспериментов и исследования математических моделей  $V_s$  проявили интерференционные эффекты и особенности работы пороговых схем измерений. Потребовалось построение логических фильтров  $A_s$ , обеспечивших разделение данных и их сглаживание на скользящем окне измерений размером от 20 до 100 измерений (длительность интервалов наблюдения 1,5...10 с). Если подать выходной сигнал  $X_s$  с такого алгоритма  $A_s$  на вход алгоритма  $A_u$  с простейшим ПИД-регулятором для отслеживания программной траектории  $X_p$ , то интегральная составляющая в сигнале  $X_s$  проинтегрируется вторично, и управление будет некорректным. В работе [1] нами предложен метод совмещения таких вычислений в рекурсивном алгоритме реального времени.

Применение технологии одноканальной фильтрации ультразвуковых данных для большего числа каналов имеет свою специфику в двух- и трехмерной операционной среде.

Опорная поверхность движения колесных и гусеничных роботов простирается вдоль плоскости и соответственно аппроксимируется. Такие объекты описываются "двумерными моделями" — в пространстве обобщенных координат  $X$  локомоторное подпространство составляют две координаты  $X_m$  центра масс (ЦМ) робота (декартовы или геодезические). Ориентация корпуса робота относительно центра масс связана с вектором скорости его ЦМ (кинематическая связь). Программное движение  $X_p(t)$  определяет поточечную траекторию перемещения ЦМ робота или целевые точки его движения. Управление должно обеспечивать огибание известных заранее или выявляемых сенсорами в процессе движения препятствий, а также обеспечивать выход из тупиков. Одной из целей управления может быть эквидистантное следование линейным ориентирам-препятствиям. Эти вопросы разрабатываются также в [14–19].

Построение управления таким роботом предполагает не только фильтрацию данных по восьми каналам, но и закругление измерений пороговой схемой (четыре зоны) и затем применение экспертных схем принятия решений. Математическое моделирование показало реализуемость такого алгоритма, обеспечивающего достижение целевых точек в неизвестном лабиринте в предположении использования помимо локаторов одометров и компаса. В этом алгоритме, как показали эксперименты и с макетами роботов, существенен пересчет измерений в индикаторы попадания препятствий в некоторые зоны (близко-далеко-, ...). Небольшое число ( $4 \times 8$ ) состояний датчиков позволило в экспертных схемах логически разобрать эти ситуации и построить необходимые действия робота, а главное, демпфировать нестабильность показаний локаторов.

Для подводных аппаратов принципиально пространственное движение, определяемое тремя декартовыми или географическими координатами (третья координата — глубина погружения аппарата). При автономном движении программная траектория  $X_p$  определяет район обследования района (только пара координат на карте), в то время как глубина перемещения робота устанавливается по принципу эквидистантного следования дну на расстоянии, измеряемом сенсорной системой. Важнейшей задачей при этом является навигация подводного аппарата — определение сенсорной системой трех координат  $X_m$  по измеряемым ультразвуковым данным  $X_s$  (т. е. по наклонным дальностям до маяков) и передача их в систему управления (СУ) аппарата и на обеспечивающее судно. Проведение триангуляции предполагает одномоментное получение измерений, что на практике не реально. Поэтому потребовалось дальнейшее развитие одномерных фильтров и построение системы правил интерпретации неполных данных, интерполяции и экстраполяции. Построенные программы были ап-

Таблица 2

Основные алгоритмы мобильных роботов

Типы мобильных роботов	Ключевые алгоритмы (комментарии)
Mr1. Роботы для бездорожья	$A_s, A_n, A_u, M_s, M_r, M_e$ — необходимы новые алгоритмы распознавания и навигации по данным ДС, обеспечивающие повышение скорости перемещения, устойчивости, для задач типа соревнования DARPA
Mr2. Автоматизированные транспортные системы для детерминированных и размеченных сред передвижения (внутрицеховые роботы, линейный привод и т. п.)	$M_s, A_s, M_r, A_u$ — необходимы новые способы маркировки маршрутов и работы ДС для обхода непредвиденных препятствий, повышения точности движений
Mr3. Гибкие транспортные системы для недетерминированной среды (движение по коридорам в больницах, офисах, при патрулировании помещений)	$A_n, M_e, A_s, M_r$ — необходимо решение проблемы локальной навигации с одновременным построением карты — simultaneous localization and mapping SLAM, повышение информативности дистанционных сенсоров
Mr4. Тренажеры, учебные и домашние роботы типа газонокосилки, пылесосы, сиделки, игровые, футболисты и т. п.	$V_e, V_i, V_r, V_s, A_n, M_s$ — необходимо решение проблемы группового поведения: совмещение виртуальной реальности с фактическими данными от робота, отсутствие жестких требований по соблюдению маршрутов движения
Mr5. Подводные роботы для поисковых и исследовательских задач	$A_n, M_s, A_s$ — необходимо учитывать повышенный уровень помех, существенные требования к автономности

робированы во время рейса на НИС "Академик М. Келдыш" для подводной навигации аппаратов [2].

Разработки, связанные с тепловизионными, визуальными, радиолокационными сенсорами, рассмотрены в [20–25], их использование также возможно на мобильных роботах, но связано в меньшей степени с решением локомоционных задач.

### Заключение

При создании математического обеспечения и алгоритмов управления мобильных роботов, решающих локомоционные задачи, прежде всего необходимо учесть условия эксплуатации, в то время как конкретный тип движителя (колесный, гусеничный, шагающий, подводный) не столь существенен. В табл. 2 приведены условия работы и основные проблемы мобильных роботов (по типам), которые соотнесены со списком алгоритмов, входящих в разработанную интеграционную программную структуру и упорядоченных в порядке их значимости для данной задачи (выделены основные алгоритмы для данной задачи).

Эта таблица дает представление о том, какие алгоритмы необходимо разрабатывать в первую очередь для дистанционных сенсоров в составе систем управления мобильных роботов. Применение этих алгоритмов снижает риск потери роботов в сложных условиях, при нарушении связи с оператором. Разработанное интеграционное математическое обеспечение позволяет проводить глубокую модернизацию и переделки перечисленных алгоритмов без нарушения работоспособности системы в целом за счет корректного управления потоками данных в системе управления и замещения отлаживаемых программ их моделями.

### Список литературы

1. Пряничников В. Е. Дистанционные сенсоры в составе систем управления движением мобильных роботов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. № 1. Т. 6. С. 5–18.
2. Пряничников В. Е. Информационное обеспечение и навигация робототехнических систем с дистанционными ультразвуковыми и оптическими сенсорами. М.: Изд. Ин-та прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской АН, 1993. 264 с.
3. Пряничников В. Е., Павлов В. А. и др. Интеллектуализация супервизорного управления мобильным роботом // Искусственный интеллект. 2000. № 3.
4. Клюев В. В., Кондратьев Ю. А., Охоцимский Д. Е., Попов Е. П., Пряничников В. Е. и др. Системы осязания и адаптивные промышленные роботы. — М.: Машиностроение, 1985, 256 с. (гл. 3–5, с. 56–172).
5. А. с. № 1367715 от 27.12.83, выд. 15.09.87. Способ определения дальности до объекта ограниченной протяженности и его параметров. Пряничников В. Е.
6. Лопота В. А., Юревич Е. И. Экстремальная робототехника и мехатроника. Принципы и перспективы развития // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 4. С. 37–42.
7. Интегральный робот. Кн. 20 / Сб. статей под ред. А. А. Харламова. М.: Радиотехника, 2006.
8. Подураев Ю. В. Актуальные проблемы мехатроники // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 4. С. 50–54.
9. Подводные роботы и их системы / Под ред. М. Д. Агеева. — Владивосток: Ин-т пробл. морских технологий ДВНЦ АН СССР, 1990.
10. Золотарев В. В., Касаткин Б. А., Косарев Г. В., Кулинченко С. И., Матвиенко Ю. В. Гидроакустический комплекс для глубоководного автономного необитаемого подводного аппарата // Сб. тр. X сессии Российского акустического общества. Т. 2. М.: ГЕОС-АКИН, 2000. С. 59.
11. Freedman A. Transient Field of Acoustic Radiator // Journal of the Acoust. Soc. of Am. 1970. Vol. 48. N 112. P. 135–138.
12. Дмитриев В. О., Макаров Г. В. Повышение точности позиционирования автономных подводных аппаратов методом ретропозиции // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 12. С. 27–31.
13. Маркович И. И., Семеняк П. Л., Ковалев Э. П. Цифровая пространственно-временная обработка сигналов в многоканальной гидроакустической системе // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. № 3.
14. Воротников С. А., Михайлов Б. Б., Ющенко А. С. Дистанционное управление адаптивными роботами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 12. С. 6–16.
15. Носков В. П., Рубиов И. В. Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 12. С. 21–24.
16. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Кадочников М. В., Ситников М. С. Использование генетических алгоритмов для автоматического формирования базы знаний интеллектуальной системы управления автономным мобильным роботом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 6. С. 18–22.
17. Баранов Д. Н., Ермолов И. Л., Плешаков Р. В., Подураев Ю. В. Повышение автономности мобильного робота "Вездеход-ТМЗ" на основе бортовой системы навигации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 5. С. 49–54.
18. Макаров М. И., Королев А. Н. Организация управления транспортными средствами при использовании навигационно-связных, информационных и телекоммуникационных технологий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 10. С. 35–40.
19. Поляхов Н. Д., Приходько И. А., Карачев А. А., Вейнмейстер А. В., Беспалов А. В. Интеллектуальное управление в технических системах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 10. С. 11–15.
20. Ивченко В. Д., Канадзе С. С. Обзор современных технологий тепловизионного контроля // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 2. С. 50–52.
21. Ивченко В. Д., Болдырев А. Г. Получение информационно-диагностических признаков на основе применения вейвлет-преобразований // Тр. XII междунар. науч.-техн. семина. Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации, Алушта, 2003.
22. Попов В. В., Мелихов М. В. Алгоритм скелетизации в задачах видеонаблюдения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 11. С. 47–53.
23. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 2004.
24. Лукьянов А. А. Локальный метод визуальной навигации мобильного робота на основе совмещения фрагментов изображений трехмерных сцен // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 5. С. 28–36.
25. Петухов А. С., Рачков М. Ю., Петухов С. В. Применение алгоритмов постобработки сжатых изображений при дистанционном управлении мобильными роботами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 1. С. 17–24.

УДК 681.51:004.896

**М. М. Аршанский**, д-р техн. наук, проф.,  
МГУПИ,

**Д. Е. Королев**, аспирант МГУПИ, нач. сектора,  
ЗАО "МНИТИ"

## Разработка специальной базы знаний на основе данных инспекционной системы в задачах управления мобильными роботами

*Предлагается один из вариантов решения класса задач, перед выполнением которых необходимо уменьшение существующей энтропии. Для решения задач данного класса предлагается использовать систему сбора данных и информационную подсистему на основе специальной базы знаний. Рассмотрен вариант построения информационного взаимодействия систем, различных по характеру выполняемых операций. Приведен состав и назначение сенсорных устройств, обеспечивающих сбор данных для наполнения специальной базы знаний. Предложена структура специальной базы знаний, позволяющая использовать знания нескольких классов.*

**Ключевые слова:** база знаний, информационное обеспечение, информационная подсистема, инспекционная система, технологическая система, информационное взаимодействие, робототехнические системы, мобильные роботы.

### Введение

Технологии (системы), основанные на знаниях, находят все большее применение в различных областях техники и, в частности, в робототехнических системах (РТС). В настоящее время во многих РТС применяются мобильные роботы с интеллектуальными системами управления. Главная архитектурная особенность интеллектуальных систем управления связана с подключением механизмов хранения и обработки знаний для выполнения требуемых функций в неполнозаданных условиях. При этом структура системы интеллектуального управления сложным динамическим объектом (и, в частности, мобильным роботом) должна соответствовать иерархическому принципу построения и включать стратегический, тактический и исполнительный уровни, а также комплекс измерительно-информационных средств [3]. Требование к наличию измерительно-информационных средств, механизмов хранения и обработки знаний делает актуальным разработку различного информационного обеспечения для систем управления мобильными роботами.

### Использование инспекционной системы в задачах управления

На сегодняшний день с помощью РТС выполняется большое число работ, таких как производство изделий и материалов, перемещение грузов, охрана окружающей среды, борьба с терроризмом и т. д. По характеру выполняемых операций все входящие в РТС средства (роботы, различные технические системы, специальное технологическое оборудование и т. д.) можно объединить в две группы: инспекционные (разведчики) и технологические [8]. Вместе с тем, существуют задачи, при решении которых целесообразно (с точки зрения некоторого критерия) или единственно возможно использовать инспекционные и технологические средства (системы) в информационной связке.

Примером может служить задача, при выполнении которой роботу (РТС или другой мобильной системе) необходимо заранее знать расположение определенного типа объектов в рабочей зоне.

К этому типу задач относится и задача скрытого перемещения робота.

Информационное взаимодействие между инспекционной и технологической системами может осуществляться напрямую. В таком случае функции обработки данных, полученных средствами инспекционной системы (ИС), должны быть разделены между системами (инспекционной и технологической). Это может привести, с одной стороны, к ухудшению качества обработки, а с другой стороны, к увеличению энергопотребления, массогабаритных характеристик и повышению сложности системы управления, что в некоторых задачах не приемлемо.

В связи с этим, практический интерес представляет разработка информационного обеспечения

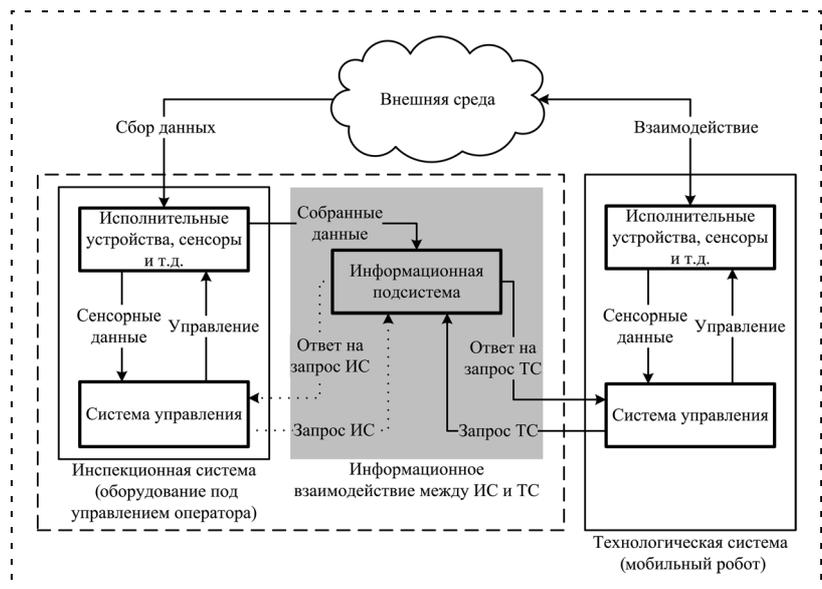


Рис. 1. Обобщенная схема взаимодействия ИС и ТС

(информационной подсистемы), которая позволила бы обеспечить обработку данных, получаемых от ИС, и информационное взаимодействие между системами (рис. 1). Информационная подсистема (ИП) должна обеспечить накопление, хранение, первичную обработку данных от ИС, обработку запросов технологической системы (ТС) с использованием современных интеллектуальных технологий и выдачу ей информации в требуемом виде. Кроме того, ИС также сможет использовать ИП, например, для выбора траекторий (маршрутов) при проведении новых инспекций.

Автором предлагается автоматизированная ИС, управляемая оператором, и ИП на основе специальной базы знаний. Одной из особенностей специальной базы знаний является использование в качестве фактов данных, полученных от ИС и составляющих вместе с прочим (правилами, алгоритмами и фактами) наполнение специальной базы знаний.

### Структурные и функциональные особенности инспекционной подсистемы

При решении задач скрытного перемещения мобильного робота необходимо заранее знать расположение определенных объектов в требуемой области и, в частности, оптических и оптико-электронных приборов (ООЭП). Предложенная ИП предназначена для получения информации о требуемой области и находящихся в ней ООЭП.

На сегодняшний день задача обнаружения ООЭП решается с помощью устройств, работа которых основана на использовании эффекта световозвращения. Все известные на данный момент устройства работают под управлением оператора (человека), который выполняет функции обнаружения ООЭП [5]. Также во всех подобных устройствах отсутствуют сенсоры, позволяющие осуществить регистрацию обнаруженных ООЭП, и средства записи полученных данных. Применение таких устройств оправдано при необходимости оперативного принятия решения по обнаруженным ООЭП.

Однако для получения комплексной информации об ООЭП, расположенных в некоторой зоне (территории, области), а именно:

- мест расположения;
- типа ООЭП;
- направления визирной оси;
- зоны наблюдения (ответственности)

необходимо применение других средств.

Для решения этой задачи предлагается использование мультисенсорного блока, информация с которого является основой наполнения базы данных (БД). Мультисенсорный блок входит в ИС, управляемую оператором. В таблице приведены состав и назначение сенсорных устройств, входящих в мультисенсорный блок.

Инспекционная система за несколько проходов путем сканирования выполняет обзор заданной об-

### Перечень датчиков разнородной информации

Сенсор	Назначение сенсоров	Примечание
1. Блок лазерного подсвета	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Подсвет наблюдаемой области</li> <li>• Измерение дальности до объекта</li> <li>• Обнаружение бликующих объектов</li> </ul>	Ближний или дальний ИК диапазон
2. Фотокамера	Получение высококачественных изображений	
3. Видекамера	Получение видеоизображения	Видимый диапазон
4. Тепловизор	Получение тепловой карты наблюдаемой области	
5. Приемник спутниковой навигационной системы (СНС)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Получение данных о времени</li> <li>• Определение местоположения системы</li> </ul>	Для мобильных систем
6. Электронный компас	Определение направления линии визирования	

ласти, получая необходимую информацию об ООЭП, которая регистрируется в ее (интегрированной) базе данных (БД).

Таким образом, БД системы содержит следующую информацию:

- от блока лазерного подсвета — изображение, содержащее эхосигнал от передающего канала, дальность до объекта ООЭП;
- от фотокамеры — высококачественное изображение рабочей зоны в видимом спектральном диапазоне;
- от видекамеры — видеоизображение всего сеанса работы;
- от тепловизора — изображения тепловой карты рабочей зоны;
- от приемника спутниковой навигационной системы (СНС) — координаты текущего местоположения системы, текущее время.
- от электронного компаса — азимут и углы положения системы относительно горизонта (тангаж, крен).

После окончания сеанса работы ИС информация, накопленная в БД, передается ИП. В ИП происходит агрегация БД в хранилище данных (ХД) и последующая обработка с помощью специальной базы знаний (БЗ).

### Технология построения и использование специальной базы знаний информационной подсистемы

ИП предназначена для совместной работы с различными системами управления, обработки запросов и выдачи информации в требуемом виде. Запросы к ИП могут поступать от систем под управлением оператора, интеллектуальных систем управления

мобильными роботами, системы подготовки управляющих программ (СПУП) и т. д. Информация, предоставляемая ИП, может потребоваться как перед началом выполнения задачи для выработки стратегии ее выполнения или формирования управляющих программ, так и во время выполнения задачи (например, для уточнения текущей цели).

ИП состоит из трех основных частей (рис. 2). В интерфейсном модуле происходит первичная обработка запросов (парсинг) и формирование ответов на запросы.

Информация, накопленная в хранилище данных, используется специальной базой знаний (БЗ) для

выполнения запросов технологической системы. В структуре специальной БЗ ИП (рис. 3) можно выделить следующие основные элементы:

- продукционную базу знаний (ПБЗ);
- фреймовую базу знаний (ФБЗ);
- понятийную базу знаний (ПнБЗ).

ПБЗ содержит правила, зависимости, законы и связи, используемые машиной вывода при обращении БЗ к рабочей области (доске объявлений) [1, 2].

ФБЗ содержит фреймы, состоящие из слотов. Каждому слоту соответствует свой факт. Факты можно разделить на три вида: вычисляемые — факты, получаемые в ходе работы ИП; основные — факты, известные системе еще до начала функционирования (априорные) и используемые при работе системы, в частности, при заполнении вычисляемых фактов; итоговые — факты, также получаемые в ходе работы ИП, однако от вычисляемых они отличаются тем, что могут быть ответом системы на запросы СПУП. Процедуры-слуги и процедуры-демоны содержат алгоритмы, по которым вычисляются соответственно при получении и присвоении значения слотов [1, 2].

ПнБЗ является библиотекой, в которой помещены как математические, так и нематематические понятия, требующиеся для функционирования специальной БЗ, например, методы обработки изображений, аппроксимации, интерполяции, экстраполяции, функции синуса, косинуса и т. д.

Разработанная структура специальной БЗ позволила использовать знания всех четырех классов: понятия (математические и нематематические), факты, правила (зависимости, законы, связи) и алгоритмы (процедуры) [6].

Использование ИП происходит следующим образом: технологическая система делает запрос с помощью языка XML, после чего он помещается в рабочую область.

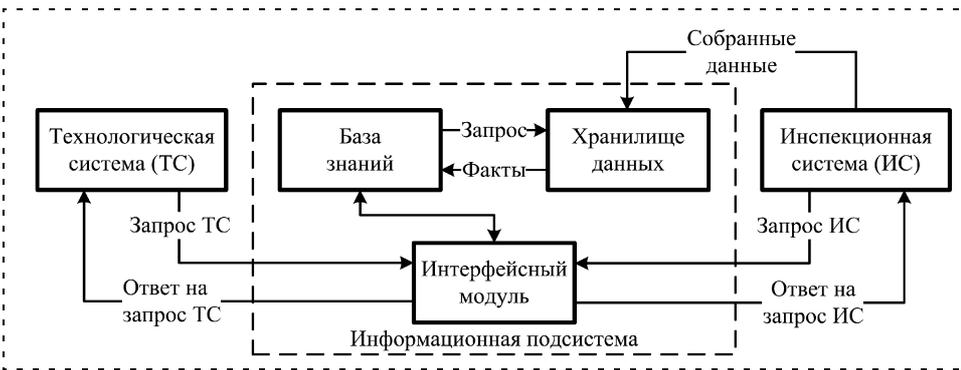


Рис. 2. Структура информационной подсистемы

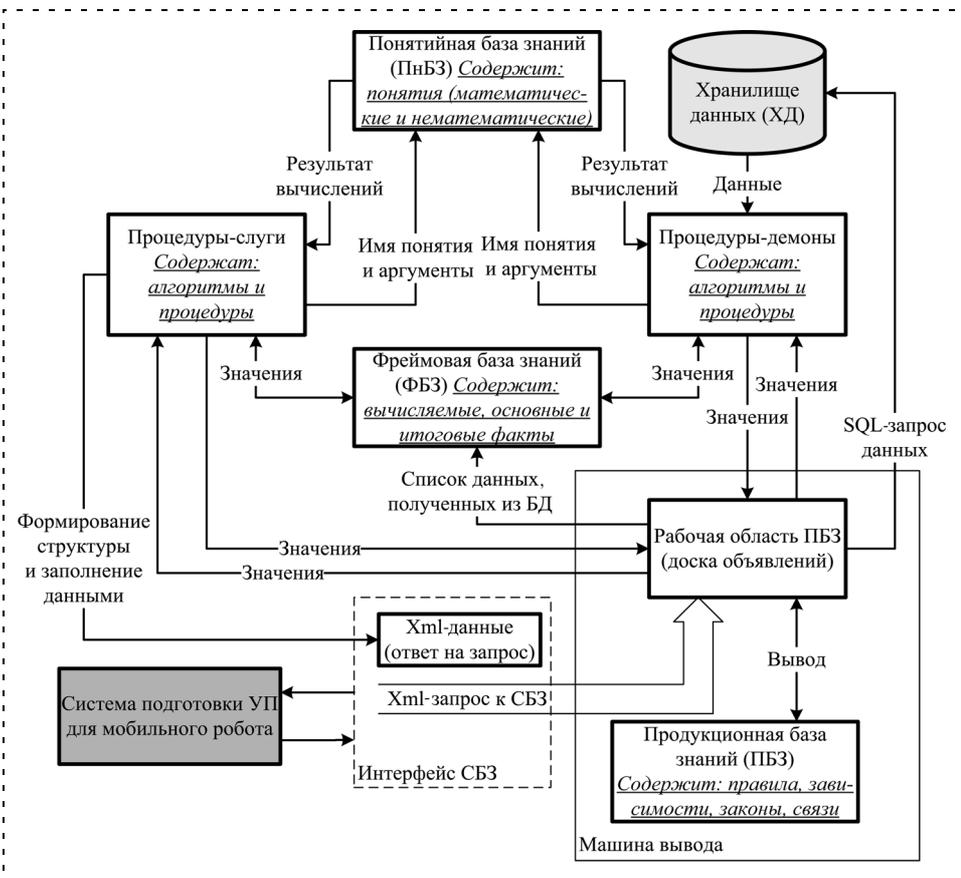


Рис. 3. Структура специальной базы знаний информационной подсистемы

Например, при необходимости получить данные об объектах ООЭП, обнаруженных в некоторой зоне за определенный временной интервал и с заданным направлением визирной оси (относительно севера), через интерфейс в специальной БЗ передаются следующие данные:

- долгота и широта точек, ограничивающих требуемую зону;
- один или несколько временных интервалов;
- интересующие направления визирной оси.

**XML-реализация входного запроса.** Определение Document Type Definition (DTD) XML-запроса к специальной БЗ будет иметь следующий вид [7]:

```
<?xml version=" 1.0" encoding="UTF-8"?>
<!-- ExecSysQuery — корневой элемент запроса -->
<!ELEMENT ExecSysQuery (Zones, TimesIntervals?, DirectsObjs?)>
<!-- Расположение объектов -->
<!ELEMENT Zones (Zone+)>
<!ELEMENT Zone (CoordAdd+, CoordRem*)>
<!-- Координаты входящей области -->
<!ELEMENT CoordAdd (Coord+, Coord+, Coord+)>
<!-- Значения широты и долготы -->
<!ATTLIST Coord
    Latit CDATA #REQUIRED
    Longit CDATA #REQUIRED>
<!-- Координаты исключенной области -->
<!ELEMENT CoordRem (Coord+, Coord+, Coord+)>
<!-- Временные интервалы обнаружения объектов -->
<!ELEMENT TimesIntervals (TimeInterval+)>
<!ELEMENT TimeInterval (TimeBegin, TimeEnd)>
<!ELEMENT TimeBegin (#PCDATA)>
<!ELEMENT TimeEnd (#PCDATA)>
<!-- Направления объектов интересующих объектов -->
<!ELEMENT DirectsObjs (Direct+)>
<!ELEMENT Direct ((From, To) | (EQU))>
<!ATTLIST Direct
    Type CDATA #REQUIRED>
<!ELEMENT From (#PCDATA)>
<!ELEMENT To (#PCDATA)>
<!ELEMENT EQU (#PCDATA)>
```

Используя прямой вывод, ПБЗ формирует SQL-запрос к ХД [4]. Далее в ФБЗ (через процедуры-демоны) из ХД поступают только те данные, которые требуются для исполнения запроса.

Полученные данные присваиваются соответствующим слотам ФБЗ, активизируя при этом процедуры-демоны. Процедуры-демоны, используя ПБЗ, ПнБЗ и основные факты, содержащиеся в соответствующих слотах ФБЗ, заполняют вычисляемые

слоты (факты). Далее заполняются итоговые слоты (факты). Ответом ИП на запрос является XML-структура, формирование и наполнение данными которой происходит в процедурах-слугах итоговых слотов ФБЗ.

## Заключение

Одним из вариантов решения определенного в начале статьи круга задач является совместное применение инспекционной и технологической систем. В частности, совместное применение систем необходимо, например, при решении задачи скрытого перемещения робота по рабочей области. В данном случае ИС обеспечит обнаружение объектов, препятствующих выполнению задачи (в частности, ООЭП), а технологическая система (мобильный робот), используя информацию, полученную от ИП, сможет осуществить перемещение, обойдя зоны ответственности обнаруженных ИС объектов.

Одной из основных тенденций развития робототехники и других автоматических машин является интеллектуализация [3]. Данное направление тесно связано с применением различного информационного обеспечения, одним из вариантов которых является предложенная ИП на основе специальной БЗ. С помощью предложенной ИП может быть обеспечено информационное взаимодействие инспекционной и технологической систем с использованием современных интеллектуальных технологий.

Использование ИС как одного из основных средств наполнения специальной БЗ ИП позволит обеспечить:

- максимальную актуальность фактов, содержащихся в БЗ;
- минимальное время получения новых фактов (о новых областях);
- документирование работы ИС.

## Список литературы

1. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000. 384 с.
2. Глохберг Г. С., Зафиевский А. В., Короткий А. А. Информационные технологии. М.: Издательский центр "Академия", 2004. 208 с.
3. Каляев И. А., Лохин В. М., Макаров И. М. Интеллектуальные роботы: Учеб. пособ. для вузов / Под общей ред. Е. И. Юревича. М.: Машиностроение, 2007. 360 с.
4. Королев Д. Е. Формирование SQL-запросов с помощью базы знаний на основе XML структуры // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания, 2008.
5. Королев Д. Е., Ануфриев А. Ю. Анализ устройств обнаружения оптических и оптико-электронных средств // Сб. тр. молодых ученых и специалистов МГУПИ. № 6. Часть I, 2006. С. 36—39.
6. Кузнецов Н. А., Баксанский О. Е., Гречишкина Н. А. Фундаментальное значение информатики в современной научной картине мира // Информационные процессы. 2006. Т. 6. № 2. С. 81—109.
7. Холзнер С. XML. Энциклопедия. 2-е изд. СПб.: Питер, 2004. 1101 с.
8. Юревич Е. И. Основы робототехники. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 416 с.

### Открытое письмо с обсуждением публикации С. Ф. Сергеева "Методология эргономического проектирования систем искусственного интеллекта для самолетов 5-го поколения"\*

В последние годы достаточно активно как в кругу специалистов, так и на страницах различных печатных изданий обсуждается концепция авиационной техники 5-го поколения. При этом большинство специалистов сходятся к тому, что основой новой техники, в первую очередь, должно стать активное применение новых информационных технологий для создания бортовых систем обработки информации и управления. Однако этот тезис является весьма общим и требует, естественно, более глубокого обоснования и конкретизации.

Данное письмо вызвано именно тем общим интересом, который проявляется к выработке концепции авиационной техники 5-го поколения, и, в частности, размышлениями по поводу проблем, поднятых в статье С. Ф. Сергеева "Методология эргономического проектирования систем искусственного интеллекта для самолетов 5-го поколения", опубликованной в журналах "Мир авионики" № 4, 2007 г. и "Мехатроника, автоматизация, управление", № 11, 2007 г.

Главный тезис, который обсуждается в данном письме, состоит в том, что, по нашему мнению, основой концепции должно стать создание и развитие интеллектуальных свойств бортовой системы управления самолета. Иными словами, речь идет об интеллектуальной бортовой системе автоматического управления, способной самостоятельно решать широкий спектр функциональных задач в условиях скоротечности боевой обстановки и действия различных факторов неопределенности.

Важно говорить не только и не столько об эргономических принципах бортовых систем искусственного интеллекта самолета, сколько об особенностях построения интеллектуальных систем, их возможностях в решении задач управления и обработки информации в экстремальных условиях и, в том числе, об эргономических аспектах взаимодействия летчика с бортовой интеллектуальной системой.

Современная концепция организации интеллектуальных систем управления сложными динамическими объектами (включая летательные аппараты),

\* Текст "Открытого письма..." приводится в авторской редакции.

сложившаяся на основе обобщения фундаментальных и прикладных исследований в этой области и развиваемая с теми или иными поправками как в России, так и за рубежом, основана на устоявшейся совокупности следующих базовых положений [2, 3, 4]:

— метод ситуационного управления, разработанный Д. А. Поспеловым [1];

— иерархический принцип построения системы управления, предполагающий наличие в общем случае исполнительного, тактического и стратегического уровней управления и информационно-измерительной системы;

— композиция интеллектуальных технологий (экспертных систем, нейросетевых структур, нечеткой логики и ассоциативной памяти) при реализации управления на различных уровнях иерархии;

— адекватность степени интеллектуальности системы влиянию факторов неопределенности, действующих на систему и объект управления.

Что касается первых трех принципов, то они достаточно подробно обсуждались в литературе [1—4]. Большинство разработчиков понимают, что для решения задачи управления на базе технологий обработки знаний альтернативы методу ситуационного управления нет и что комбинация интеллектуальных технологий определяется техническими требованиями к интеллектуальным системам автоматического управления (ИСАУ) на соответствующем уровне иерархии управления.

Иерархический принцип построения систем управления сложными динамическими объектами сам по себе является далеко не оригинальным и обсуждался в ряде монографий еще в начале 80-х годов прошлого столетия. Главным отличием новой концепции иерархического построения систем управления является использование методов и технологий искусственного интеллекта как средства борьбы с неопределенностью внешней среды. Необходимость интеллектуализации каждого из уровней управления обусловлена подверженностью выполняемых ими функций влиянию различных факторов неопределенности. Практическое воплощение этой концепции предполагает избирательное использование тех или иных технологий обработки знаний в зависимости от специфики решаемых задач, особенностей управляемого объекта, его функционального назначения, условий эксплуатации и т. д.

Развитие технологии обработки знаний для решения задач управления требует более детальной классификации задач по уровням иерархии интеллектуального управления. Такая классификация обобщена на рис. 1.



Рис. 1. Классификация задач по уровням иерархии интеллектуального управления

Особо следует отметить, что к задачам стратегического уровня в последнее время все более часто и вполне обоснованно относят планирование группового взаимодействия автономных объектов и организацию человеко-машинного интерфейса.

Необходимо более подробно рассмотреть четвертый принцип, предпосылки которого были заложены еще в работе [2]. Он имеет далеко не только научно-методическое или терминологическое значение, а и важное практическое значение, поскольку позволяет заказчику и разработчику одинаково трактовать ту или иную систему, ее функциональные возможности, а, соответственно, определять сложность, сроки и стоимость разработки. Схема, приведенная на рис. 2, соответствует тем ключевым задачам, которые перечислены выше, и показывает адекватность степеней интеллектуальности бортовой системы управления ее функциональным возможностям в задачах обработки знаний.

Если факторы неопределенности таковы, что их можно устранить подстройкой регулятора (алгоритма) и сделать это за счет интеллектуального контура, включающего базу знаний и механизм логического вывода, то эту систему следует называть интеллектуальной в малом.

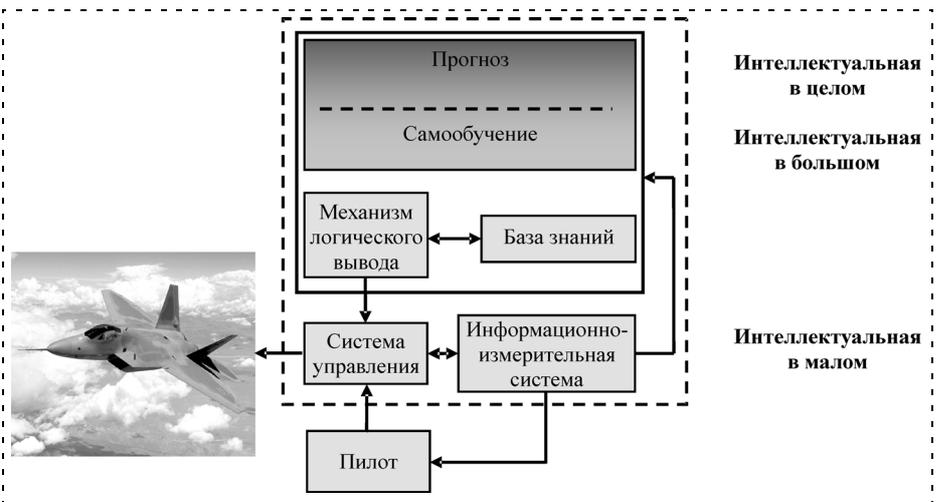


Рис. 2. Адекватность степеней интеллектуальности бортовой системы управления ее функциональным возможностям в задачах обработки знаний

Если требуется изменить программу действий и, соответственно, подключить блок самообучения (и прогноз), то это будет система, интеллектуальная в большом.

Если система сама способна корректировать цель управления (активно работают блоки прогноза и самообучения), то эта система называется интеллектуальной в целом.

Естественно, что предложенная выше терминология будет уточняться со временем по мере активизации работ в области самообучения и прогнозирования, однако и сейчас введение ее важно как для заказчиков новой техники, так и для разработчиков.

На основе приведенных выше базовых положений удобно строить концепцию интеллектуальной бортовой системы самолета, если технологические требования к ней разработчиков определены (в частности, существует разграничение функциональных обязанностей бортовой ИСАУ и летчика). При этом как разработчик бортовой ИСАУ, так и конструктор, определяющий функциональные возможности летательного аппарата (ЛА), должны достаточно четко понимать возможности интеллектуальных технологий на всех уровнях иерархии управления.

В этом смысле нельзя ссылаться, как это делает С. Ф. Сергеев, на понимание Тьюринга об интеллектуальной машине, которое было предложено почти 50 лет назад. За эти годы как за рубежом, так и в нашей стране решено огромное количество фундаментальных и прикладных задач в области интеллектуального управления, которое привело, естественно, и к изменению многих понятий. Одним из таких является алгоритм интеллектуального управления.

С. Ф. Сергеев в статье пишет: *"Поведение человека надделено смыслами, порождаемыми в процессе его индивидуальной и социальной жизни, и является целенаправленным. Поведение же алгоритмического механизма бессмысленно по определению, так как он просто реализует определенную логику функционирования, заложенную в алгоритме. Человек является системой, действующей на основании своего непосредственного личного опыта и ассимилированного опыта человечества, отраженного в культуре и языке, что делает его чрезвычайно мощным и незаменимым компонентом технической системы при решении задач адаптации к сложным условиям, несущим высокую долю неопределенности"*.

Данное утверждение в корне неверно. Дело в том, что в основе функционирования интеллектуальной системы лежит механизм логического вывода на знаниях, заложенных в базе знаний (БЗ). Эти знания могут иметь как теоретический, так и эмпирический характер (в том числе учитывающий богатый опыт лучших летчиков и конструкторов ЛА). От разработчика ИСАУ зависит, насколько совершенна будет эта база знаний и насколько верно и

быстро осуществляется логический вывод, с помощью которого интеллектуальный алгоритм, реализуя закон управления, парирует возникшие факторы неопределенности.

**Работа со знаниями, заложенными в той или иной форме в базу знаний, является основой любой интеллектуальной системы.**

Более того, интеллектуальные системы управления могут обладать способностями к развитию на основе пополнения, обобщения или уточнения знаний за счет подключения механизмов самообучения.

Некоторые из таких механизмов уже не только отработаны, но и активно применяются в решении ряда практических задач, обеспечивая повышение степени интеллектуальности системы до уровня интеллектуальности в большом, при котором значительно возрастает инвариантность системы к различного рода внешним воздействиям.

Параллельно с развитием технологии самообучения рядом научных школ активно решается проблема оперативного прогнозирования развития событий. Комплексное решение этих проблем позволит обеспечить в интеллектуальной системе степень интеллектуальности в целом.

При анализе принципов построения бортовой системы управления летательного аппарата полезно обратиться к рассмотрению представленной на рис. 1 иерархической структуры с учетом целесообразности и необходимости обеспечения той или иной степени интеллектуальности ее отдельных уровней.

Из такого рассмотрения следует, что каждый уровень иерархии управления может иметь различную степень интеллектуальности. Важно, чтобы она была обоснована исходя из эксплуатационных (технологических) требований. Например, система управления исполнительного уровня (рули, элероны и т. д.) должна иметь высокую точность и обеспечивать строго заданное качество управления в условиях изменяющихся факторов. Добиться этого теоретически можно методами адаптивного управления за счет применения достаточно жестких и сложных алгоритмов. Однако, как показывает практика последних лет, проще, надежнее и эффективнее использовать интеллектуальные регуляторы, реализуемые аппаратно на распространенной элементной базе. При этом, вероятнее всего, будет достаточно обеспечить степень интеллектуальности в малом за счет реализации контура управления, включающего базу знаний и механизм логического вывода.

На тактическом уровне, который обеспечивает требуемую совокупность действий, целесообразно использовать дополнительно механизм самообучения и поддерживать степень интеллектуальности в большом. Так, например, при выполнении некоторых сложных маневров, доступных очень опытным пилотам, система управления может самообучаться на выполнение данных маневров и затем осуществлять их при необходимости, по указанию

стратегического уровня на необходимость такого маневра, когда работает менее опытный пилот или когда пилот в силу экстремальных обстоятельств не может его выполнить.

С этих же позиций можно подходить к определению степени интеллектуальности на стратегическом уровне управления, который планирует поведение летательного аппарата в зависимости от текущей обстановки. При этом уровень задач, который может быть поручен этому уровню управления, должен быть четко регламентирован разработчиками. Это вопрос, имеющий вполне реальное решение, но требующий весьма тщательной проработки и четкой постановки со стороны разработчиков и заказчиков летательного аппарата.

Отдельного обсуждения требует вопрос о комплексировании большого количества разнородной информации, которая поступает к пилоту. Как справедливо отмечает С. Ф. Сергеев: *"Дело в том, что принятая методология эргономического проектирования рассматривает самолет как набор в значительной мере слабо связанных между собой систем, работающих по функциональному принципу. Каждая из функциональных систем является независимой, имеет свою физическую реализацию и отражающие ее состояние контролируемые параметры, выбор которых в значительной мере произволен и обусловлен традициями проектировщиков. В результате на системы отображения информации и идентификации поступает смесь разнородных технических показателей, свидетельствующих большей частью в косвенной форме, о процессах, происходящих в самолете. Далее летчик на основании своего профессионального опыта и опыта, полученного в процессе профессионального обучения, выбирает критические, по его мнению, показатели и вырабатывает на их основе управляющее поведение различной степени сложности и эффективности. Однако никто не знает, как именно это происходит. Нашему наблюдению доступно только поведение человека. А не причины, его обуславливающие. Проектируемые системы, построенные на законах здравого смысла и эмпирического опыта, плохо учитывают особенности человека и часто выводят его на границы психофизиологических возможностей. В результате мы сталкиваемся с пресловутой проблемой «человеческого фактора»."*

Такая проблема известна и давно существует. Как утверждает известный эргономист академик Зинченко В. П., есть много примеров, когда летчик, обрабатывая большие массивы информации, принимает необоснованное решение даже быстрее, чем этого требует обстановка, что может привести к экстремальной ситуации.

Выход из этой проблемы можно искать двумя путями. Во-первых, с помощью интеллектуальных технологий, способных минимизировать нечеткость (неопределенность) разнородной информации, подавать ее в обобщенном виде, удобном для

пилота, обеспечивая при этом не отражение частных показателей, а интерпретацию их изменения в виде представления реальной ситуации и прогноза ее развития. И, во-вторых, часть функций управления передать интеллектуальной бортовой системе, которая объективно (без присутствия человеческого фактора) примет решение о целесообразном поведении летательного аппарата в сложившейся ситуации и (или) о тактике эффективных действий.

Другое дело, что еще долго человек останется в контуре системы и необходимо организовать эргономически удобный человеко-машинный интерфейс с бортовой интеллектуальной системой. Этой задачей специалисты за рубежом и в России занимаются. Более того, появились первые примеры ее практических решений [4–8]. Но при всей ее важности, это всего лишь одна из ключевых проблем, которые требуется решать при создании систем управления летательных аппаратов 5-го поколения. Поэтому следует согласиться с мнением С. Ф. Сергеева, изложенным в заключении статьи, о необходимости "концентрации сил специалистов в области эргономики, психологии и системной интеграции".

Но вряд ли можно принять тезис о том, что *"необходимо решать сложный комплекс проблем обеспечения деятельности пилота как активного звена, имеющего решающее боевое преимущество перед противником"*. Нам представляется, что боевое преимущество будут иметь летательные аппараты, в которых на основе компьютеризации и автоматизации процессов управления, использующих современные технологии обработки знаний, будут созданы интеллектуальные системы обработки информации и управления с развитым человеко-машинным интерфейсом. При этом роль летчика остается исключительно важной, однако очень серьезного и глубокого исследования требует вопрос распределения функций между человеком и бортовой ИСАУ с учетом ее возможностей к самостоятельному принятию решений в экстремальных ситуациях, а также к прогнозированию вероятного развития событий.

Именно при таком подходе приоритет в создании самолетов 5-го поколения останется за Россией. Научный задел для решения этих задач имеется. Важно его своевременно использовать в плоскости практического применения, учитывая, что зарубежные фирмы, располагающие совершенной элементной базой, активно работают в данном направлении.

Хотелось бы надеяться, что это письмо будет не только доведено до С. Ф. Сергеева, который, являясь академиком РАЕН, должен знакомиться с работами коллег по академии в области интеллектуального управления (Д. А. Поспелова, В. Н. Вагина и других), но и станет предметом дискуссии на редакционном совете и, быть может, послужит поводом для планомерного и всестороннего обсужде-

ния концепции бортовых систем управления самолетами 5-го поколения на страницах журналов "Мир авионики" и "Мехатроника, автоматизация, управление".

**В. М. Лохин**, д-р техн. наук, проф., генеральный директор МНТЦ "Интеллектуальные системы" МИРЭА  
**М. П. Романов**, д-р техн. наук, проф., нач. отдела "Интеллектуальные системы управления и обработки информации" МНТЦ "Интеллектуальные системы" МИРЭА  
**С. В. Манько**, д-р техн. наук, проф., зав. научно-исследовательской лабораторией "Интеллектуальные системы управления и обработки информации" кафедры "Проблемы управления" МИРЭА

#### Список литературы

1. **Поспелов Д. А.** Ситуационное управление: Теория и практика. М.: Наука, 1986.

2. **Интеллектуальные системы автоматического управления.** / Под ред. И. М. Макарова, В. М. Лохина. М.: Физматлит, 2001.

3. **Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П.** Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2006.

4. **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. 2005. Приложение № 7.

5. **Henderson J. M., Ferreira F.** Scene perception for psycholinguists // The interface of language, vision, and action: Eye movements and the visual world New York: Psychology Press, 2004. P. 1—58.

6. **Kaschak M. P. & Glenberg A. M.** Constructing meaning: The role of affordances and grammatical constructions in sentence comprehension // Journal of Memory & Language. Oct 2000. Vol. 43 (3). P. 508—529.

7. **Kelly S. P., Lalor E. C., Finucane C., McDarby G., Reilly R. B.** Visual Spatial Attention Control in an Independent Brain-Computer Interface // IEEE Trans. Biomedical Engineering. Sept. 2005. Vol. 52. № 9. P. 1588—1596.

8. **Suomela Jussi.** From Teleoperation to the Cognitive Human-Robot Interface // Automation and Systems Technology. November 2004.

## ОТВЕТ на открытое письмо **В. М. Лохина, М. П. Романова, С. В. Манько\***

Я благодарен Валерию Михайловичу Лохину, Михаилу Петровичу Романову и Сергею Викторовичу Манько — хорошо известным в научной и учебно-педагогической среде специалистам в области применения компьютерных технологий обработки данных при решении задач автоматического и автоматизированного управления за их комментарии к моей скромной работе и хочу сделать некоторые дополнительные замечания.

Прежде всего, хочу отметить, что я очень высоко оцениваю сделанные в письме замечания и считаю их исключительно полезными и далеко выходящими за рамки тематики обсуждаемой в моей статье, цель которой была достаточно утилитарной — анализ тематических подходов к проектированию авиационной техники 5-го поколения. Это техника настоящего времени и за нею, безусловно, следуют самолеты 6-го, 7-го и последующих поколений, в которых, возможно, исчезнет (или останется в новом качестве) человек-оператор, которого заменят "интеллектуальные системы управления".

В связи с этим я, безусловно, поддерживаю главный тезис, который обсуждается в открытом письме — "о необходимости создания и развития ин-

теллектуальных свойств бортовой системы управления, способной самостоятельно решать задачи в условиях неопределенности" и добавим, активно-го противодействия противника. Это "сверхзадача", эталон, к которому необходимо стремиться. Однако приходится признать, что для решения этой задачи явно недостаточно существующего уровня развития науки и технологии. Не спасает положение и предлагаемый авторами письма инструментарий системного анализа и синтеза. Каждый из упоминаемых методов и принципов проектирования "интеллектуального в целом" самолета заслуживают внимания. Но, к сожалению, даже композиция интеллектуальных технологий (экспертных систем, нейросетевых структур, нечеткой логики и ассоциативной памяти), о которых упоминается в письме (а можно продолжить этот ряд и далее), не позволяет решить задачу тотального управления процессом достижения боевого преимущества. Решение локальных задач автоматизации позволяет создать "умное тело" самолета, но не более. Локальный интеллект позволяет создать "всадника без головы", но не орудие, самостоятельно осуществляющее стратегический замысел командования.

Авторами письма предложена "новая концепция иерархического построения систем управления", использующая методы и технологии искусственного интеллекта для борьбы с неопределенностью внешней среды. Очень заманчивое предложение! Однако рассматриваемый далее вариант практического воплощения концепции, к сожалению, (по-видимому, из-за недостатка места) был сведен к довольно произвольной классификации задач системы

\* Текст приводится в авторской редакции.

управления по уровням иерархии. На самом деле, одной классификации и систематизации, несмотря на очевидную полезность, явно недостаточно для того, чтобы сформировать заявленное "одинаковое" понимание заказчика и разработчика интеллектуальной бортовой системы управления.

Следующая в письме эмоциональная попытка критики предложенного мною понятия "интеллектуальная система" связана, по-видимому, с разным пониманием у меня и оппонентов терминов "интеллект" и "знание". Это прослеживается в логике и аргументации авторов письма, которые подчеркнули, что "работа со знаниями, заложенными в той или иной форме в базу знаний, является основой любой интеллектуальной системы". Это верно в случае представления знаний как синонима информации, которую обрабатывают системы искусственного интеллекта. Однако системы с естественным интеллектом, о которых шла речь в обсуждаемой статье, имеют дело не с информацией, а именно со знаниями. Знания содержатся в них в виде индивидуальной, недоступной внешнему наблюдению динамической системы. Известный психолог В. П. Зинченко использует для описания знаний в биологических системах термин "живое знание". Это знание живого о живом [1]. Итак, знания — это не информация, и их полная и точная передача невозможна. Отсюда возникают проблемы с формированием баз знаний экспертных и других систем с искусственным интеллектом. Невозможно использовать "богатый опыт лучших летчиков и конструкторов". Вы получаете не знания экспертов, а некоторый дискурс, совокупность текстов, порожденных разными системами знаний (каждый эксперт — своя уникальная система знаний). В результате приходится иметь дело с мозаичным набором данных, напоминающих цитатник из произведений классиков, и не способствующий решению задачи управления. Эта проблема хорошо выражена у Д. А. Поспелова, как "проблема оправдания" [2]. Она не имеет приемлемого решения по настоящее время.

Авторы письма попробовали проиллюстрировать механизмы интеллектуализации системы управления самолетом на тактическом уровне, приведя пример самообучения системой выполнению маневра, осуществляемого опытным летчиком. На мой взгляд, это неудачный пример, так как полет — это не совокупность маневров летчика, которые можно записать и воспроизводить каким-либо образом. Пилот, как и все живые системы, для уменьшения неопределенности работает в условиях контекста, который в значительной мере определяет его поведение. Учет контекста машине не доступен, так как она работает в условиях формализации. Перефразируя слова Н. А. Бернштейна, можно сказать

"деятельность пилота — это повторение без повторения".

Далее авторы письма своеобразно проинтерпретировали причины появления проблемы "человеческого фактора", о которых упоминается в обсуждаемой статье, связав их проявление с неверной обработкой больших объемов информации. Я же утверждал (и думаю, что меня поддержит Владимир Петрович Зинченко), что причина — это неграмотное проектирование техники, не учитывающее свойств человека-оператора.

Обсуждение роли летчика авторами письма завершается требованием исследования вопроса распределения функций между человеком и бортовой ИСАУ, что вполне логично следует из принятой ими парадигмы проектирования. Этот подход часто обсуждался в дискуссиях, проходивших в инженерной психологии и эргономике 1970—80 годов, и завершился в пользу моделей активного оператора. Быть пассивным пассажиром самолета это совсем не то же самое, что управлять им.

Вместе с тем, я осознаю, что проблемы, связанные с созданием систем управления самолетами 5-го поколения, очень далеки от их окончательного решения и полностью поддерживаю моих уважаемых коллег в их стремлении, в том числе и в дискуссионной форме, вести обсуждение концептуальных подходов к созданию сложных технических систем и сред. Надеюсь, что обсуждение методологических проблем создания систем управления самолетов 5-го и последующих поколений будет продолжено.

Прошу прощения у моих уважаемых оппонентов, если в полемическом задоре некоторые обороты моей речи оказались им излишне резки и некорректны. Это не входило в мои планы и связано лишь с жанром публикации и ограничением печатного места.

Отдельную благодарность выражаю редакции журнала "Мехатроника. Автоматизация. Управление", предоставившей возможность для участия в дискуссии.

С искренним уважением,

**Сергеев Сергей Федорович,**  
канд. психол. наук, акад. РАЕН,  
зам. директора департамента  
ОАО "Корпорация "Аэрокосмическое  
оборудование", г. Санкт-Петербург.

#### Список литературы

1. **Зинченко В. П.** Психологическая педагогика. Материалы к курсу лекций. Часть I. Живое Знание / В. П. Зинченко. — Самара: "Самарский Дом печати", 1998.
2. **Поспелов Д. А.** Десять "горячих точек" в исследованиях по искусственному интеллекту / Интеллектуальные системы (МГУ) / Д. А. Поспелов. — 1996. — Т. 1, вып. 1—4. — С. 47—56.

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВИОНИКИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 681.5.013

**В. Я. Распопов**, д-р техн. наук, проф.,  
Тульский государственный университет

## Концепция построения и проектирования авионики малоразмерных беспилотных летательных аппаратов

*Даны определение и описание структуры авионики малоразмерных беспилотных летательных аппаратов. Предложены этапы, отмечены особенности и содержание проектирования авионики.*

**Ключевые слова:** малоразмерный беспилотный летательный аппарат, микросистемная авионика, сетевая структура, проектирование.

*Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу*

УДК 629.13

**С. В. Телухин**, канд. техн. наук, инж.,  
**В. В. Матвеев**, канд. техн. наук, доц.,  
Тульский государственный университет

## Беспилотный летательный аппарат как объект управления

*Рассмотрено определение моментов инерции, аэродинамических коэффициентов сил и моментов беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на основе пилотажной модели самолета ЯК-54 с применением средств пакета твердотельного моделирования "Solidworks".*

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, аэродинамические коэффициенты, твердотельное моделирование.

*Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу*

УДК 531.383

**Д. М. Малютин**, канд., техн., наук, доц.,  
Тульский государственный университет

## Исследование динамики рулевого привода беспилотного малоразмерного летательного аппарата

*Исследуется динамика рулевого привода беспилотного летательного аппарата, выполненного по аэродинамической схеме свободносущего среднеплана ЯК-54. Приведена структурная схема рулевого привода и выполнено моделирование его работы с учетом нелинейностей, обусловленных ограничением момента двигателя по уровню, кинематическим ограничением угла поворота аэродинамического руля, дискретным характером сигнала управления, наличием момента сухого трения. Рассмотрены варианты линейного с ограничением и релейного управления исполнительным двигателем привода.*

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, аэродинамический руль, рулевой привод, сервомашинка, шарнирный момент.

*Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу*

УДК 629.7

**Р. В. Алалуев**, канд. техн. наук, доц., **Ю. В. Иванов**, д-р техн. наук, проф.,  
**В. В. Матвеев**, канд. техн. наук, доц., **В. Я. Распопов**, д-р техн. наук, проф., **А. П. Шведов**, аспирант,  
Тульский государственный университет

## Бесплатформенная система ориентации и навигации мини-беспилотного летательного аппарата

*Описываются алгоритмы бесплатформенной системы ориентации и навигации для беспилотного летательного аппарата. Приведены основные уравнения, лежащие в основе алгоритмов системы. Предложен способ коррекции углов тангажа и крена на основе показаний акселерометров.*

**Ключевые слова:** бесплатформенная система ориентации и навигации, микромеханические гироскопы и акселерометры, коррекция тангажа и крена.

*Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу*

**В. Я. Распопов**, д-р техн. наук, проф., **С. В. Телухин**, канд. техн. наук, инженер,  
**Д. М. Малютин**, канд. техн. наук, доц., **Р. В. Алалуев**, канд. техн. наук, доц.,  
**А. П. Шведов**, аспирант, **Я. С. Кузнецов**, студент, **А. В. Ладонкин**, студент,  
 Тульский государственный университет

## Автопилот мини-беспилотного летательного аппарата

*Рассмотрена динамика системы "беспилотный летательный аппарат—автопилот" на примере пилотажной модели самолета ЯК-54 с учетом нелинейности сервоприводов. Определены коэффициенты в законах управления по каналам тангажа, рыскания и крена.*

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, автопилот, коэффициенты передачи, переходный процесс.

*Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу*

## CONTENTS

- Krasnoshchechenko V. I.** *Synthesis of Control by Using of the Method of Model Predictive Control for the Brachistochrone Problem* ..... 2  
 For the brachistochrone problem the technique of the approximated synthesis of control by using of the method of model predictive control with gramian weighing is offered. The example of the synthesis for oscillator is submitted.  
**Keywords:** method of model predictive control, synthesis, brachistochrone problem, linear time invariant systems, stability, gramian of controllability.
- Makarov N. N., Semashkin V. E.** *The Optimal Tracing Precision of Linear Systems* ..... 8  
 The problem of optimal tracing precision with possible input signals set is defined. This problem is solved for linear system. Linear regulator with high guaranteed precision is suggested. Example of suggestion usage for hydraulic actuator is considered.  
**Keywords:** tracing system, linear system, optimal control, optimal precision, tracing actuator, hydraulic actuator.
- Bobtsov A. A., Kremley A. S.** *Compensation Algorithm of Unknown Sinusoidal Disturbance for Linear Non-Minimal Phase Plant* ..... 14  
 The new compensation algorithm of uncertain sinusoidal disturbance for linear non-minimal phase plant is presented. Developing of known results, in the given work the case of disturbances compensation when the output variable and the control signal are measured only is considered, and the relative degree of plant can be any.  
**Keywords:** adaptive control, disturbances compensation, output control.
- Kolosov O. S., Garmash V. B., Deev R. V., Morozov R. B.** *Increasing Noise Stability and Efficiency of the Regulation Temperature Algorithm of the Hot Water Supply Systems on the Central Thermal Stations* ..... 18  
 The problem of the increasing noise stability and efficiency of the temperature regulation algorithm of the hot water supply systems on the central thermal stations is considered. The analysis of the operating regulator work, the identification of the temperature regulation system components are carried out, the mathematical simulator of the temperature regulation system is developed. Approbation results of the modified temperature regulation algorithm are given.  
**Keywords:** central thermal station, hot water supply, temperature regulation algorithm of the hot water supply system.
- Blinnikov A. E.** *Working of the New Methods of Technological and Organizational Management in the Foundry* 23  
 New methods of technological and organizational management in the foundry, based on use of the static and dynamical neural networks are considered. They are characterized by absence of necessity of the complex formalized descriptions of objects of management, by advantages of parallel calculations and by simplicity of realization on PC.  
**Keywords:** foundry, static neural network, dynamic neural network, organizational and technological management, synaptic matrix, technological process, the block diagram layout, topological structure, network mathematical model, clustering.
- Kudinov Yu. I., Ivanchenko K. S., Kudinov I. Yu.** *Designing of Forecasting Quality Fuzzy System of Metallurgical Production* ..... 27  
 Development stages of fuzzy system of forecasting of defects the metal products including the analysis of technological processes, statement of a problem of forecasting, construction of fuzzy models and algorithms of training, and also skilled check of system on one of the metallurgical enterprises are considered.  
**Keywords:** fuzzy system, forecasting of defects, fuzzy models and algorithms of training, metallurgical enterprises.
- Egorov O. D.** *Calculation Features of Mechatronic and Robotized Motion Transformers* ..... 33  
 A methodology of gear ratio estimation is considered for mechatronic modules for various types of motion transformation.  
**Keywords:** mechatronic modules, gear ratio, motion transformers.

- Pryanichnikov V. E.** *Remote Sensors Algorithms for Mobile Robots* . . . . . 38  
 Mathematical models and algorithms of operating the remote sensors in the composition of control systems of the mobile robots are developed. Integrating software for mobile robots and new ways of processing and combining the sensor and control data, navigational and control algorithms, taking into account dynamics of the mobile robots, are proposed.  
**Keywords:** information processing and control of mobile robots, ultrasonic sensors, integrating software.
- Arshansky M. M., Korolev D. E.** *The Development of Special Knowledge Base on Basis of Inspection System for the Mobile Robots Management Problems* . . . . . 44  
 In the article one variant of problems decision before which performance reduction of existing entropy is necessary is offered. For the given class of problems decision it is offered to use the system of data gathering and an information subsystem on the basis of the special knowledge base. The variant of information interaction various on character of carried out operations systems is considered. The structure and appointment of the providing information gathering and the special knowledge base filling sensory units is produced. The structure of the special knowledge base, which allows knowledge of several classes using is offered.  
**Keywords:** knowledge base, dataware, information subsystem, inspection system, technological system, information interaction, robotic systems, mobile.
- Raspopov V. Ya.** *Concept of Construction and Designing of Small-Sized Unmanned Aerial Vehicle Avionics* . . . 54  
 Terms and descriptions of structure of small-sized unmanned aerial vehicle avionics are given. Stages are proposed, specialities and content of designing are noted.  
**Keywords:** small-sized unmanned aerial vehicle, microsystem avionics, network structure, designing.
- Telukhin S. V., Matveev V. V.** *Unmanned Aerial Vehicle as Control Object* . . . . . 54  
 Determination of inertia moments and aerodynamic coefficients of the unmanned aerial vehicle (UAV) based on the flight model of YAK-54 aircraft using instruments of Solidworks program package is considered.  
**Keywords:** unmanned aerial vehicle, aerodynamic coefficients, solid modeling.
- Malyutin D. M.** *Research of Dynamics of a Steering Drive of the Unmanned Aerial Vehicle* . . . . . 54  
 In clause dynamics of a steering drive of the unmanned aerial vehicle is researched. The block diagram of a steering drive is resulted and is performed modeling his work in view of the features caused by restriction of the moment of the engine on a level, kinematic restriction of a corner of turn of an aerodynamic rudder, discrete character of a signal of management, presence of the moment of dry friction. Variants linear with restriction and relay management of the executive engine of a drive are considered. Parameters of a steering drive at which good concurrence of results of modelling and experimental researches of a steering drive is reached are certain.  
**Keywords:** the unmanned aerial vehicle, an aerodynamic rudder, a steering drive, servo.
- Alaluev R. V., Ivanov Yu. V., Matveev V. V., Raspopov V. Ya., Shvedov A. P.** *Strapdown Attitude Control System and Navigation of an Unmanned Aerial Vehicle* . . . . . 54  
 Algorithms of a strapdown attitude control system and navigation for an unmanned aerial vehicle are featured. The main equations underlying algorithms of system are reduced. The mode of compensation of pitch angles and a roll on the basis of indications of accelerometers is offered.  
**Keywords:** strapdown attitude control system, compensation of pitch angles and roll.
- Raspopov V. Ya., Telukhin S. V., Malyutin D. M., Alaluev R. V., Shvedov A. P., Kuznetsov Ya. S., Ladonkin A. V.** *Mini-Unmanned Aerial Vehicle Autopilot* . . . . . 55  
 Dynamic, with a glance of servomotor nonlinearity, of UAV-autopilot on example of the flight model of YAK-54 aircraft is considered. Pitch, yaw and roll channels' transfer gains are determined.  
**Keywords:** unmanned aerial vehicle, autopilot, transfer coefficients, transient process.

---

**Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

107076, Москва, Стромьинский пер., 4/1

Телефон редакции журнала: **(495) 269-5397**, тел./факс: **(495) 269-5510**

Дизайнер *Т.Н. Погорелова*. Художник *В.Н. Погорелов*.  
 Технический редактор *О.А. Ефремова*. Корректор *Е.В. Комиссарова*.

---

Сдано в набор 30.07.2008. Подписано в печать 17.09.2008. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
 Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,84. Заказ 1060. 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"

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15