

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 1 (142)

январь

2013

Редакционный совет:

БОЛОТНИК Н. Н.
 ВАСИЛЬЕВ С. Н.
 КАЛЯЕВ И. А.
 КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.
 КУЗНЕЦОВ Н. А.
 ЛЕОНОВ Г. А.
 МАКАРОВ И. М.
 МАТВЕЕНКО А. М.
 МИКРИН Е. А.
 ПЕШЕХОНОВ В. Г.
 РЕЗЧИКОВ А. Ф.
 СЕБРЯКОВ Г. Г.
 СИГОВ А. С.
 СИРОТКИН О. С.
 СОЙФЕР В. А.
 СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.
 ФЕДОРОВ И. Б.
 ЧЕНЦОВ А. Г.
 ЩЕРБАТЮК А. Ф.
 ЮСУПОВ Р. М.

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Заместители гл. редактора:

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

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В.
 АНТОНОВ Б. И.
 АРШАНСКИЙ М. М.
 БУКОВ В. Н.
 ВИТТИХ В. А.
 ВОСТРИКОВ А. С.
 ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.
 ГРАДЕЦКИЙ В. Г.
 ИВЧЕНКО В. Д.
 ИЛЬЯСОВ Б. Г.
 КОЛОСОВ О. С.
 КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.
 КУЗЬМИН Н. Н.
 ЛЕБЕДЕВ Г. Н.
 ЛОХИН В. М.
 НОРЕНКОВ И. П.
 ПАВЛОВСКИЙ В. Е.
 ПРОХОРОВ Н. Л.
 РАПОПОРТ Э. Я.
 СЕРГЕЕВ С. Ф.
 ТИМОФЕЕВ А. В.
 ФИЛАРЕТОВ В. Ф.
 ФРАДКОВ А. Л.
 ФУРСОВ В. А.
 ШАЛОБАЕВ Е. В.
 ЮРЕВИЧ Е. И.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Гайдук А. Р., Плаксиенко Е. А.** Управление нелинейными объектами с компенсацией неопределенного возмущения. 2
Шишкин Е. А. Динамические характеристики элементарных звеньев второго порядка с запаздыванием. 8

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

- Кудинов Ю. И., Келина А. Ю.** Упрощенный метод определения параметров нечетких ПИД регуляторов. 12
Шабунин А. Б., Кузнецов Н. А., Скобелев П. О., Бабанин И. О., Кожевников С. С., Симонова Е. В., Степанов М. Е., Царев А. В. Разработка мультиагентной системы адаптивного управления ресурсами ОАО "РЖД". 23

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Григорьев С. Н., Андреев А. Г., Ивановский С. П.** Современное состояние и перспективы развития промышленной робототехники. 30
Притыкин Ф. Н., Чукавов Е. А. Анализ показателей маневренности механизмов манипуляторов, имеющих различную структуру моделей кинематических цепей. 35
Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю. Система автоматической коррекции программной траектории движения многозвенного манипулятора, установленного на подводном аппарате. 40

КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Рудометкин Л. Е., Антонов А. А., Рачков М. Ю.** Автоматизация контроля остаточных напряжений конструкций. 46
Дианов В. Н., Гевондян Т. А., Белоусов И. М., Люминарская Е. С. Повышение информативности мехатронных систем при воздействии кодоимпульсных сигналов. 54

Журнал в журнале

"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Бронников А. М., Морозов Д. В.** Локализация непосредственно не наблюдаемых отказов бортовых систем на основе смешанных направленных графов. 62
Пономаренко А. В., Василец В. М., Кулабухов В. С., Халтобин В. М., Грозов О. Б., Ключников А. А. Оценка автоматизированных учебных курсов авиационных систем обучения на основе метода анализа иерархий. 66
Contents 71

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

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

УДК 62.506

А. Р. Гайдук, д-р техн. наук, проф.,
gaiduk_2003@mail.ru,
Технологический институт

Южного федерального университета, г. Таганрог,

Е. А. Плаксиенко, канд. техн. наук, доц.,
Таганрогский институт управления и экономики

Управление нелинейными объектами с компенсацией неопределенного возмущения¹

Предлагается новый адаптивный метод синтеза управления нелинейным объектом с идентификацией внешнего неопределенного возмущения и его компенсацией. Предполагается, что уравнения объекта представлены в управляемой форме Жордана, а $K(p)$ — изображение возмущения является полиномом с постоянными коэффициентами, степень которого не превышает известной величины. Нелинейное устройство управления включает наблюдатель состояния эквивалентной системы, адаптивный идентификатор возмущения и формирователь нелинейного управления. Приводится численный пример синтеза.

Ключевые слова: нелинейный объект, возмущение, адаптация, управление, компенсация

Введение

Компенсация влияния внешних возмущений является важным фактором повышения качества систем управления. В ранних работах модели неизмеряемых возмущений предполагались заданными либо $K(p)$ -изображениями, либо уравнениями в переменных состояния [1, 2] с известными параметрами. В работах последнего времени, в связи со сложившейся тенденцией синтеза адаптивных систем управления, чаще всего предполагается, что известна лишь форма возмущений, а их параметры оцениваются в процессе функционирования системы. При этом рассматривается задача компенсации неизвестных мультигармонических или гармонических со смещением возмущений [2—11].

В работах [3—6] рассматриваются методы компенсации гармонических возмущений в случае линейных объектов: минимально-фазовых [3], строго минимально-фазовых [4] или неминимально-фазовых [5], без запаздывания или с запаздыванием [6]. Неизвестное возмущение описывается уравнениями в переменных состояния, при этом основное вни-

мание уделяется идентификации частоты возмущения в течение переходного процесса системы управления. Аналогичная задача решается в работах [7—10] применительно к нелинейным объектам. В работах [7, 8] рассматриваются объекты с минимально-фазовой линейной частью; в [9] — мультигармоническое возмущение, действующее на объект с одной нелинейностью и любой относительной степенью и с запаздыванием. Устройство управления обычно включает идентификатор параметров и наблюдатель гармоник возмущения. В работе [10] результаты, полученные для линейных объектов, распространяются на случай минимально-фазового объекта с неопределенными параметрами и нелинейностью.

Работы [2, 11, 12] и ряд других посвящены непосредственно решению задачи определения частот синусоидальных и мультигармонических возмущений. В статье [2] предложен метод синтеза наблюдателей внешних параметрически неопределенных возмущений известного порядка. В работе [11] предложен алгоритм идентификации, имеющий порядок $3m - 1$, где m — число гармонических составляющих возмущения. Алгоритм идентификации частоты, предложенный в статье [12], имеет порядок, равный 2, и позволяет определить частоту лишь одной измеряемой гармонической составляющей. Разработанные алгоритмы идентификации частоты позволяют синтезировать компенсирующие управления, ориентированные на случай как линейных, так и нелинейных систем [10].

Алгоритмы компенсации неизмеряемых возмущений без предположения об их форме на основе эллиптических оценок и линейных матричных неравенств развиваются в работах [13, 14] и других работах. Однако полная компенсация в этом подходе недостижима.

В данной статье развивается метод компенсации неизмеряемого возмущения неизвестной формы для случая нелинейного объекта, уравнения которого представлены в канонической управляемой форме Жордана, введенной в работе [15]. Предполагается, что возмущение имеет $K(p)$ -изображение в виде полинома с постоянными коэффициентами, степень которого не превышает известной величины. Метод включает оценку $K(p)$ -изображения действующего возмущения по оценкам переменных состояния некоторой виртуальной системы. Эта система эквивалентна системе управления расширенным объектом управления, который формируется в процессе синтеза с учетом максимально возможного порядка внешнего возмущения.

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-08-01196-а).

Постановка задачи

Предположим, нелинейный объект управления (ОУ) описывается уравнениями вида

$$\dot{x}_i = \phi_i(\bar{x}_{i+1}), \quad i = \overline{1, i_f - 1}, \quad i_f > 1;$$

$$\dot{x}_i = \phi_i(\bar{x}_{i+1}, f) = \phi_i(\bar{x}_{i+1}) + h_i(\bar{x}_{i+1})f, \quad i = \overline{i_f, \tilde{n} - 1};$$

$$\dot{x}_{\tilde{n}} = \phi_{\tilde{n}}(x, f) + \tilde{u}, \quad (1)$$

где $x_i = x_i(t, x_0, f)$ — доступные измерению переменные состояния ОУ, $i = \overline{1, \tilde{n}}$; $\bar{x}_v = [x_1, x_2, \dots, x_v]^T$ — подвектор размерности v , $v = \overline{2, \tilde{n}}$, составленный из переменных состояния; очевидно, $\bar{x}_{\tilde{n}} = x(t, x_0, f)$ — \tilde{n} -вектор состояния ОУ; $f = f(t)$ — неизмеряемое ограниченное возмущение, порядок которого ν_f не превышает известной величины $\nu_{\text{доп}}$; u — управление; $\phi_i(\bar{x}_{i+1})$, $\phi_i(\bar{x}_{i+1}, f)$, $h_i(\bar{x}_{i+1})$ — нелинейные дифференцируемые скалярные функции, удовлетворяющие в некоторой области $\Omega_x \in R^n$ условиям

$$\frac{\partial \phi_i(\bar{x}_{i+1})}{\partial x_{i+1}} \neq 0, \quad i = \overline{1, i_f - 1};$$

$$\frac{\partial \phi_i(\bar{x}_{i+1})}{\partial x_{i+1}} + \frac{\partial h_i(\bar{x}_{i+1})}{\partial x_{i+1}} f \neq 0, \quad i = \overline{i_f, \tilde{n} - 1}, \quad (2)$$

$$h_{i_f}(\bar{x}_{i_f+1}) \neq 0. \quad (3)$$

В (1)–(3) функции $\phi_i(0) = 0$, $\phi_i(0) = 0$; i_f — минимальный индекс переменных x_i , на производные которых непосредственно влияет возмущение $f = f(t)$, имеющее $K(p)$ -изображение в виде полинома $F(p) = \zeta_0 + \zeta_1 p + \dots + \zeta_{\nu_f - 1} p^{\nu_f - 1} + p^{\nu_f}$, где $p = d/dt$; ζ_i и ν_f — неизвестны, но $\nu_f \leq \nu_{\text{доп}}$. Предполагается, что условия (2) и (3) выполнены и при некоторых ограниченных вариациях $\Delta_f(t)$ возмущения $f(t)$ как по форме, так и по интенсивности.

Пусть $x = x(t, x_0, f) \in R^n$ — вектор состояния, а $x_0 \in R^n$ — вектор начальных условий замкнутой системы управления объектом (1)–(3). Задача синтеза заключается в построении управления \tilde{u} , при котором положение равновесия $x = 0$ является устойчивым, т. е.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t, x_0, 0) = 0 \quad \text{при} \quad x(t, x_0, 0) \in \Omega_x, \quad t \geq 0, \quad (4)$$

и выполняется условие компенсации неизмеряемого возмущения $f = f(t)$, т. е. ошибка системы — переменная x_1 — удовлетворяет условию

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_1(t, x_0, f) = 0 \quad \text{при} \quad x(t, x_0, f) \in \Omega_x, \quad \nu_f \leq \nu_{\text{доп}}. \quad (5)$$

Определение структуры управления

Найдем сначала структуру "идеального" управления, при котором достигается решение поставленной задачи, предполагая, что возмущение $f = f(t)$ и его производные измеряются. Так как по условиям задачи неравенства (2) выполнены, то в соответствии с определением управляемой формы Жордана (УФЖ) уравнения (1) представлены в этой форме [15]. Это позволяет, как показано в работе [16, с. 325], построить стабилизирующее управление $u = u(x, f, \dot{f}, \dots)$, при котором выполняются условия (4) и (5) при любом $f = f(t)$. Это управление будет зависеть от возмущения $f = f(t)$ и ряда его производных по времени.

Однако по условиям рассматриваемой здесь задачи последние не измеряются, поэтому для реализации указанного управления необходимо найти оценки как самого возмущения, так и необходимого числа его производных по времени.

Оценки возмущения и его производных, как обычно, можно найти путем оценивания переменных состояния системы, зависящих от этого возмущения [2, 16]. Возмущение $f(t)$ порядка ν_f имеет $\nu_f - 1$ независимую производную. Так как требуется оценить порядок и все производные возмущения $f = f(t)$ порядка $\nu_f \leq \nu_{\text{доп}}$, то указанная система должна иметь не менее $\nu_{\text{доп}} + 1$ переменных состояния, зависящих от него.

В общем случае порядок \tilde{n} исходного объекта может оказаться недостаточным. Поэтому при $\tilde{n} - i_f < \nu_{\text{доп}} + 1$ формируется расширенный ОУ путем добавления к объекту (1) некоторого числа интегрирующих звеньев (в дальнейшем эти дополнительные интеграторы включаются в состав устройства управления (УУ)). В целях формирования расширенного ОУ в последнем уравнении (1) полагается $\tilde{u} = x_{\tilde{n}+1}$, и к (1) добавляются уравнения

$$\dot{x}_{\tilde{n}+1} = x_{\tilde{n}+2}, \dots, \dot{x}_{\tilde{n}+i} = x_{\tilde{n}+i+1}, \dots, \dot{x}_{\tilde{n}} = u \quad (6)$$

так, чтобы выполнялось следующее неравенство:

$$n - i_f \geq \nu_{\text{доп}} + 1. \quad (7)$$

Подчеркнем, что если исходный ОУ порядка n удовлетворяет условиям (2), (3), то образованный указанным образом расширенный ОУ (1), (6) также удовлетворяет этим условиям. Если же порядок исходного объекта (1) удовлетворяет условию (7), т. е. $\tilde{n} - i_f \geq \nu_{\text{доп}} + 1$, то расширенный объект не образуется, а \tilde{n} заменяется на n .

Для решения задачи синтеза, как и в работах [15, 16], вводится система, эквивалентная искомой системе управления объектом (1), (6). Переменные

состояния w_i этой системы определяются следующим образом: $w_1 = x_1$,

$$w_i = \dot{w}_{i-1}, i = \overline{2, n}, \text{ причем } \dot{w}_n = u_1,$$

$$\text{а } w_{i_f} = \begin{cases} x_1, & \text{если } i_f = 1; \\ \dot{w}_{i_f-1}, & \text{если } i_f > 1, \end{cases} \quad (8)$$

где u_1 — вспомогательное управление. В векторно-матричной форме эквивалентная система (8), очевидно, имеет вид

$$\dot{w} = \overline{\Lambda} w + e^n u_1, x_1 = e_1 w, \quad (9)$$

где w — вектор переменных $w_i, i = \overline{1, n}$; $\overline{\Lambda} = [\lambda_{ij}]$, причем $\lambda_{i, i+1} = 1, i = \overline{1, n-1}$, а все остальные λ_{ij} равны нулю; e^n — n -й столбец; e_1 — 1-я строка единичной $(n \times n)$ -матрицы E .

Предположим, исходя из требуемой длительности $t_{пп}$ переходного процесса системы управления объектом (1), (6) (с учетом интервала идентификации возмущения) выбраны корни p_i^D устойчивого полинома $D(p) = \delta_0 + \delta_1 p + \dots + \delta_{n-1} p^{n-1} + p^n$, и пусть $\alpha_{cc} = \min_i |\operatorname{Re} p_i^D|$.

Переменная x_1 доступна измерению, а эквивалентная система (9) является вполне наблюдаемой, поэтому можно синтезировать наблюдатель:

$$\dot{\hat{w}} = \Lambda \hat{w} + e^n u_1 + l x_1, \quad (10)$$

где $\hat{w} = [\hat{w}_1 \hat{w}_2 \dots \hat{w}_n]^T$ — вектор оценок \hat{w}_i переменных w_i ; l — вектор, при котором матрица $\Lambda = \overline{\Lambda} - l e_1$ является устойчивой, причем, если $\alpha_{nn} = \min_i |\operatorname{Re} p_i^\Lambda|$, где p_i^Λ — корни полинома $\Lambda(p) = \det(pE - \Lambda)$, то выполняется условие $\alpha_{cc} \ll \alpha_{nn}$. Способы определения соответствующего вектора l хорошо известны и приведены, например, в работе [16, с. 84].

Управление u_1 в уравнениях (8), (9) и (10) определяется равенством

$$u_1 = -k^T \hat{w}, k^T = [\delta_0 \delta_1 \dots \delta_{n-1}], \quad (11)$$

где δ_i — коэффициенты выбранного выше полинома $D(p)$. При указанном выборе корней p_i^Λ и p_i^D системы (9) и (10) являются устойчивыми, причем $\hat{w} \approx w$, если $t > t_{оц, w}$. Здесь $t_{оц, w}$ — время оценивания переменных $w_i, i = \overline{1, n}$ наблюдателем (10).

Далее определяются функции:

$$\gamma_1(x, f) = \frac{\partial w_n(x, \overline{f}_{n-i_f-1})}{\partial x_n} =$$

$$= \prod_{\mu=1}^{i_f-1} \frac{\partial \phi_\mu(\overline{x}_{\mu+1})}{\partial x_{\mu+1}} \prod_{\mu=i_f}^{\tilde{n}-1} \frac{\partial \phi_\mu(\overline{x}_{\mu+1}, f)}{\partial x_{\mu+1}}, \quad (12)$$

$$\gamma_2(x, \overline{f}_{n-i_f}) = \left[\sum_{\mu=1}^{n-1} \frac{\partial w_n(x, \overline{f}_{n-i_f-1})}{\partial x_\mu} \tilde{\phi}_\mu(\overline{x}_{\mu+1}) + \sum_{\mu=0}^{n-i_f-1} \frac{\partial w_n(x, \overline{f}_{n-i_f-1})}{\partial f^{(\mu)}} f^{(\mu+1)} \right]. \quad (13)$$

Здесь для краткости обозначено $\tilde{\phi}_\mu(\overline{x}_{\mu+1}) = \phi_\mu(\overline{x}_{\mu+1}), \mu = \overline{1, i_f-1}$; $\tilde{\phi}_\mu(\overline{x}_{\mu+1}) = \phi_\mu(\overline{x}_{\mu+1}, f), \mu = \overline{i_f, \tilde{n}-1}$; $\tilde{\phi}_\mu(\overline{x}_{\mu+1}) = x_{\mu+1}, \mu = \overline{\tilde{n}+1, n}$; $\overline{f}_i = [f^{(0)}, f^{(1)}, \dots, f^{(i)}]^T$ — подвектор размерности i , составленный из возмущения и его производных по времени, т. е. $\overline{f}_0 = f^{(0)} = f(t)$, а $f^{(i)} = d^i f(t)/dt^i, i = 1, 2, \dots$. Подчеркнем, что в силу условий (2) переменная $\gamma_1(x, f) \neq 0$ при всех $x(t, x_0, f) \in \Omega_x$.

Следуя работе [15], несложно показать с учетом выражений (8), (12), (13), а также условий (2), что если возмущение $f(t)$ и его производные до $f^{(n-i_f)}(t)$ измеряются, а в последнем уравнении (6) управление u определяется выражением

$$u = \gamma_1^{-1}(x, f)[-k^T \hat{w} - \gamma_2(x, \overline{f}_{n-i_f})] - \phi_n(x, f), \quad (14)$$

то система (9) эквивалентна системе (1), (6), т. е. положение равновесия $x = 0$ последней является асимптотически устойчивым. В (14) $\phi_n(x, f) = f_n(x, f)$, если $n = \tilde{n}$, и $\phi_n(x, f) = 0$, если $n > \tilde{n}$.

Выражения (10)—(14) определяют структуру искомого управления, однако последнее является нереализуемым, так как по постановке задачи возмущение и его производные недоступны прямым измерениям.

Оценивание возмущения и его производных

Перейдем к выводу выражений для оценок возмущения и его производных по времени. Пользуясь уравнениями (1), (6) и выражениями (7), нетрудно установить, что если $i_f > 1$, то в выражения для переменных $w_i = \dot{w}_{i-1} = w_i(\overline{x}_i), i = \overline{1, i_f}$, возмущение f не входит, а в выражения для переменной w_{i_f+1} и всех последующих — входит, причем

$$w_{i_f+1} = \dot{w}_{i_f}(\overline{x}_{i_f}) = \psi_{i_f+1}(\overline{x}_{i_f+1}) + \xi(\overline{x}_{i_f+1})f =$$

$$= w_{i_f+1}(\overline{x}_{i_f+1}, f), \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} & \psi_{i_f+1}(\bar{x}_{i_f+1}) = \\ & = \sum_{\mu=1}^{i_f-1} \frac{\partial w_{i_f}(\bar{x}_{i_f})}{\partial x_{\mu}} \phi_{\mu}(\bar{x}_{\mu+1}) + \frac{\partial w_{i_f}(\bar{x}_{i_f})}{\partial x_{i_f}} \phi_{i_f}(\bar{x}_{i_f+1}); \end{aligned} \quad (16)$$

$$\xi(\bar{x}_{i_f+1}) = \prod_{\mu=1}^{i_f-1} \frac{\partial \phi_{\mu}(\bar{x}_{\mu+1})}{\partial x_{\mu+1}} h_{i_f}(\bar{x}_{i_f+1}). \quad (17)$$

Аналогично, при $i > i_f + 1$ получим

$$\begin{aligned} w_i & = \psi_i(\bar{x}_i, \bar{f}_{i-i_f-2}) + \xi(\bar{x}_{i_f+1}) f^{(i-i_f-1)} = \\ & = w_i(\bar{x}_i, \bar{f}_{i-i_f-1}), \quad i = \overline{i_f+1, n}. \end{aligned} \quad (18)$$

Если же $i_f = 1$, то величины $\psi_{i_f+1}(\bar{x}_{i_f+1}, f)$ и $\xi(\bar{x}_{i_f+1})$ определяются непосредственно по первому уравнению (1).

По условию задачи неравенства (2) и (3) выполнены, поэтому с учетом оценок \hat{w}_i из соотношений (15)–(18) вытекают следующие оценки возмущения и его производных:

$$\begin{aligned} \hat{f}(t) & = [\hat{w}_{i_f+1} - \psi_{i_f+1}(\bar{x}_{i_f+1})]/\xi(\bar{x}_{i_f+1}), \dots, \hat{f}^{(i)}(t) = \\ & = [\hat{w}_{i+i_f+1} - \psi_{i+i_f+1}(\bar{x}_{i+i_f+1}, \hat{f}_{i-1})]/\xi(\bar{x}_{i_f+1}), \dots, \\ \hat{f}^{(n-i_f-1)}(t) & = [\hat{w}_n - \psi_n(\bar{x}_n, \hat{f}_{n-i_f-2})]/\xi(\bar{x}_{i_f+1}). \end{aligned} \quad (19)$$

Если $n = v_{\text{доп}} + i_f + 1$, то при $t > t_{\text{оц}}$, w по выражениям (19) находятся оценки возмущения $f(t)$ и его производных от $f^{(1)}(t)$ до $f^{(v_{\text{доп}})}(t)$. Однако для реализации управления (14), обеспечивающего выполнение условия (5), необходимы оценки возмущения $f(t)$ и его производных по времени до $(v_{\text{доп}} + 1)$ -й.

Для определения оценки $(v_{\text{доп}} + 1)$ -й производной удобно воспользоваться следующим свойством $K(p)$ -изображений. В соответствии с определением последнего, если полином $F(p) = \zeta_0 + \zeta_1 p + \dots + \zeta_{v_f-1} p^{v_f-1} + p^{v_f}$ является $K(p)$ -изображением некоторой функции $f(t)$, то выполняется тождество: $\zeta_0 f(t) + \zeta_1 f^{(1)}(t) + \dots + \zeta_{v_f-1} f^{(v_f-1)}(t) + f^{(v_f)}(t) \equiv 0$ при всех $t \geq 0$. Отсюда следует, что производная $f^{(v_f)}(t)$ является линейно зависимой функцией. Поэтому, если при некотором значении $v^* \in [1, v_{\text{доп}}]$ выполняется равенство

$$\det \begin{bmatrix} f(t_1) & f^{(1)}(t_1) & \dots & f^{(v^*)}(t_1) \\ f(t_2) & f^{(1)}(t_2) & \dots & f^{(v^*)}(t_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(t_{v^*}) & f^{(1)}(t_{v^*}) & \dots & f^{(v^*)}(t_{v^*}) \end{bmatrix} = 0, \quad (20)$$

то порядок функции $f(t)$ равен v^* , т. е. $v_f = v^*$, а коэффициенты ζ_i , $i = \overline{0, v_f-1}$, ее $K(p)$ -изображения определяются решением следующей системы:

$$\begin{bmatrix} f(t_1) & f^{(1)}(t_1) & \dots & f^{(v^*-1)}(t_1) \\ f(t_2) & f^{(1)}(t_2) & \dots & f^{(v^*-1)}(t_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(t_{v^*-1}) & f^{(1)}(t_{v^*-1}) & \dots & f^{(v^*-1)}(t_{v^*-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_0 \\ \zeta_1 \\ \vdots \\ \zeta_{v_f-1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f^{(v^*)}(t_1) \\ f^{(v^*)}(t_2) \\ \vdots \\ f^{(v^*)}(t_{v^*-1}) \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Если в (20), (21) заменить $f(t)$ и $f^{(i)}(t)$ их оценками, определяемыми равенствами (19), то эти уравнения позволяют найти порядок и оценки $\hat{\zeta}_i$, $i = \overline{0, v_f-1}$, коэффициентов $K(p)$ -изображения возмущения. Оценка производной $f^{(v_{\text{доп}}+1)}(t)$ находится по формуле

$$\begin{aligned} \hat{f}^{(v_{\text{доп}}+1)}(t) & = -\hat{\zeta}_{v_f-1} \hat{f}^{(v_{\text{доп}})}(t) - \dots \\ & \dots - \hat{\zeta}_1 \hat{f}^{(v_{\text{доп}}-v_f+2)}(t) - \hat{\zeta}_0 \hat{f}^{(v_{\text{доп}}-v_f+1)}(t), \end{aligned} \quad (22)$$

которая очевидным образом выводится из тождества $F(p)f(t) \equiv 0$.

Наконец, замена в выражении (14) возмущения $f(t)$ и его производных $f^{(1)}(t), \dots, f^{(v_{\text{доп}}+1)}(t)$ их оценками, определяемыми равенствами (19) и (22), приводит к искомому реализуемому управлению расширенным объектом (1), (6).

Адаптация управления

Решение системы (21) дает практически приемлемые оценки коэффициентов ζ_i , $i = \overline{0, v_f-1}$, с достаточной точностью только при условии, что в управлении (14) используется достаточно точная оценка $(v_{\text{доп}} + 1)$ -й производной возмущения.

Так как информация о значении $(v_{\text{доп}} + 1)$ -й производной возмущения до начала работы системы отсутствует, то при $t = 0$ оценка $f^{(v_{\text{доп}}+1)}(t)$ полагается в (14) равной нулю. При этом выражения (19)–(22) дают весьма приближенные значения как коэффициентов $K(p)$ -изображения возмущения, так и оценки $f^{(v_{\text{доп}}+1)}(t)$. Поэтому дальнейшее использование этой оценки в выражении (14) приводит к ненулевому значению переменной $x_1(t)$ в установленном режиме.

Для обеспечения полной компенсации влияния неопределенного возмущения $f(t)$ в данной работе предлагается проводить адаптацию управления (14) путем минимизации значений $x_1(t) \neq 0$ по оценкам $\hat{\zeta}_i, i = \overline{0, v_f - 1}$, фигурирующим в выражении (22). Для этой цели удобнее всего использовать метод наискорейшего спуска или другие известные методы численной оптимизации [17]. При этом решение системы (21), полученное при условии, что в выражении (14) значение оценки производной $f^{(v_{\text{доп}} + 1)}$ равно нулю, рассматривается как начальное приближение искомых значений оценок $\hat{\zeta}_i, i = \overline{0, v_f - 1}$.

Полученное в результате минимизации переменной $x_1(t)$ управление обеспечивает как устойчивость положения равновесия системы (1), (6), (10), (14), так и практически полную компенсацию неизмеряемого возмущения произвольной формы, порядок которого не превышает величины $v_{\text{доп}}$.

Если возмущение $f(t)$ описывается функцией $f(t) = f_0 + f_1 t + \dots + f_r t^r$, то его производная $f^{(r+1)} \equiv 0$. Поэтому, если $r \leq v_{\text{доп}}$, то оценивать производную $f^{(v_{\text{доп}} + 1)}$ нет необходимости. Следовательно, в этом случае выражение (14) с заменой возмущения и его производных оценками (19) и без применения соотношений (20)–(22) дает управление, обеспечивающее устойчивость положения равновесия нелинейной системы (1), (6), (10), (14) и выполнение условий (5). Не применять соотношения (20)–(22) можно и в тех случаях, когда $(v_{\text{доп}} + 1)$ -я и более старшие производные по времени возмущения $f(t)$ имеют достаточно малые значения.

Если порядок \tilde{n} исходного ОУ (1) удовлетворяет условию (7), то соответствующее УУ описывается выражениями (10), (11), (14), (20)–(22), а его порядок равен порядку объекта. Если же исходный ОУ порядка \tilde{n} не удовлетворяет условию (7), то соответствующее УУ описывается уравнениями $\dot{x}_{\tilde{n}+1} = x_{\tilde{n}+2}, \dots, \dot{x}_n = u$, (10), (11) и выражениями $\tilde{u} = x_{\tilde{n}+1}$, (14), (20)–(22), а его порядок будет равен $2(v_{\text{доп}} + i_f + 1) - \tilde{n}$.

Отметим, что если от уравнений объекта (1) перейти к его уравнению "вход-выход" $\tilde{u} \rightarrow x_1$, то в этом уравнении (при $h_i(\bar{x}_{i+1}) \neq 0, i > i_f$) кроме самого возмущения и его производных по времени могут содержаться их произведения и различные степени. Это существенно затрудняет использование спектральных моделей [2, 16] для компенсации влияния внешних возмущений на ошибки систем управления объектами рассматриваемого типа.

Пример

Применение полученных результатов для синтеза нелинейного адаптивного управления с компенсацией возмущения покажем на численном примере объекта второго порядка.

Для объекта, который описывается уравнениями

$$\dot{x}_1 = 2x_2 + x_2^3 + f, \dot{x}_2 = \tilde{u}, \quad (23)$$

найти управление, обеспечивающее компенсацию неопределенного неизмеряемого возмущения $f = f(t)$, степень $K(p)$ -изображения которого не превышает двух, т. е. $v_{\text{доп}} = 2$. Переменные состояния x_1 и x_2 измеряются.

Переходя к решению, отмечаем, что порядок ОУ (23) $\tilde{n} = 2$, производная $\partial \phi_1(\bar{x}_2, f) / \partial x_2 = 2 + 3x_2^2 \neq 0$, т. е. условие (2) выполняется, поэтому уравнения (23) имеют УФЖ. В данном случае $i_f = 1, v_{\text{доп}} = 2$. Следовательно, условие (7) при $n = \tilde{n} = 2$ не выполняется. В связи с этим полагаем $x_3 = \tilde{u}$, уравнения ОУ (23) дополняем уравнениями двух интеграторов, в результате чего уравнения расширенного ОУ принимают вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= 2x_2 + x_2^3 + f = \phi_1(x_2, f), \dot{x}_2 = x_3 = \phi_2(x_3), \\ \dot{x}_3 &= x_4 = \phi_3(x_4), \dot{x}_4 = u. \end{aligned} \quad (24)$$

Здесь $n = 4, \phi_4(x, f) = 0, h_i(x, f) = h_1(x, f) = 1$; условия (2), (3) и (7) выполняются.

По (8) вводятся переменные w_i , и находится их представление в виде (15)–(18): $w_1 = x_1, w_2 = x_2 + x_2^3 + f, w_3 = (2 + 3x_2^2)x_3 + f^{(1)}, w_4 = 6x_2x_3^2 + (2 + 3x_2^2)x_4 + f^{(2)}$. Так как $n = 4$, то для построения наблюдателя (10) принимается полином $\Lambda(p) = p^4 + 12p^3 + 54p^2 + 108p + 81$. Далее, следуя работе [16, с. 84], находим уравнение этого наблюдателя:

$$\dot{\hat{w}} = \begin{bmatrix} -12 & 1 & 0 & 0 \\ -54 & 0 & 1 & 0 \\ -108 & 0 & 0 & 1 \\ -81 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \hat{w} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_1 + \begin{bmatrix} 12 \\ 54 \\ 108 \\ 81 \end{bmatrix} x_1. \quad (25)$$

С учетом неравенства $\alpha_{\text{сс}} \ll \alpha_{\text{нн}}$ полагаем управление $u_1 = -\hat{w}_1 - 4\hat{w}_2 - 6\hat{w}_3 - 4\hat{w}_4$. По выражениям (19) находим оценки: $\hat{f} = \hat{w}_2 - 2x_2 - x_2^3, \hat{f}^{(1)} = \hat{w}_3 - (2 + 3x_2^2)x_3, \hat{f}^{(2)} = \hat{w}_4 - 6x_2x_3^2 - (2 + 3x_2^2)x_4$, а по (14) — управление $u = [u_1 - 6x_3^3 - 18x_2x_3x_4 - \hat{f}^{(3)}] / (2 + 3x_2^2)$.

Таким образом, устройство управления объектом (23) описывается уравнениями (25), а также:

$$\begin{aligned} \tilde{u} &= x_3, \quad \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 &= [u_1 - 6x_3^3 - \\ &- 18x_2x_3x_4 - \hat{f}^{(3)}]/(2 + 3x_2^2). \end{aligned} \quad (26)$$

В этом выражении оценка $\hat{f}^{(3)}$ принимается равной нулю при $t = 0$ и вычисляется с помощью соотношений (19)–(22), если после окончания переходного процесса величина $|x_{1уст}| > x_{1доп}$, где $x_{1доп}$ — допустимое значение ошибки компенсации.

На рис. 1, а приведен график изменения переменной $x_1(t)$, полученный в результате моделирования системы (23), (25)–(26) в пакете MATLAB при возмущении $f(t) = \sin 0,7t$, начальных условиях $x_0 = [0 \ 0 \ -0,5 \ 0]^T$, $\hat{w}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ и $\hat{f}^{(3)} = 0$ в (26).

Согласно рис. 1, а при $\hat{f}^{(3)} = 0$ ошибка системы $x_{1m} = 1,497$. При этом соотношения (19)–(20) дают $v_f = v^* = 2$, а выражения (19), (21) — значения оценок $\hat{\zeta}_0 = 0,3285$, $\hat{\zeta}_1 = -0,407$. Так как $x_{1m} \neq 0$, то далее проводится минимизация x_{1m} по оценкам $\hat{\zeta}_0$ и $\hat{\zeta}_1$ методом градиента (при начальных значениях $\hat{\zeta}_{00} = 0,3285$, $\hat{\zeta}_{10} = -0,407$). Окончание оптимизации x_{1m} при значениях оценок $\hat{\zeta}_0 = 0,495$, $\hat{\zeta}_1 = -0,002$ приводит к ошибке $x_{1m} = 0,0144$. Заметим, что если в выражении (26) используется оценка $\hat{f}^{(3)}$, вычисляемая по (22) при точных значениях коэффициентов $\hat{\zeta}_0 = 0,49$ и $\hat{\zeta}_1 = 0$, то переходной процесс системы имеет вид, приведенный на рис. 1, б. При этом ошибка модели системы $x_{1m} = 0,00001$.

В соответствии с изложенным выше, компенсация влияния возмущения $f(t)$, приложенного к системе (23), (25), (26), достигается, если в выражении (26) учитывается третья производная по времени этого возмущения. Поэтому, если третья производная возмущения равна нулю, то применять соотношения (20)–(22) в алгоритме управления нет необходимости. В этих случаях полная компенсация возмущения достигается уже при $\hat{f}^{(3)} = 0$ в выражении (26). Этому утверждению соответствуют приведенные на рис. 2 переходные процессы в синтезированной системе (23), (25), (26), полученные

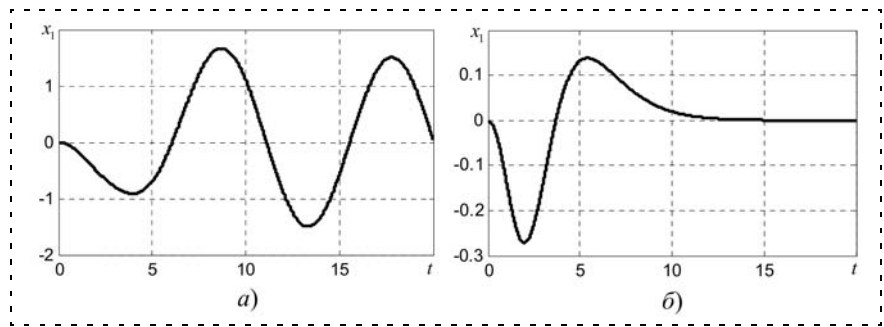


Рис. 1. Переходные процессы в адаптивной системе:

а — при $\hat{f}^{(3)} = 0$; б — при восстановленной модели возмущения

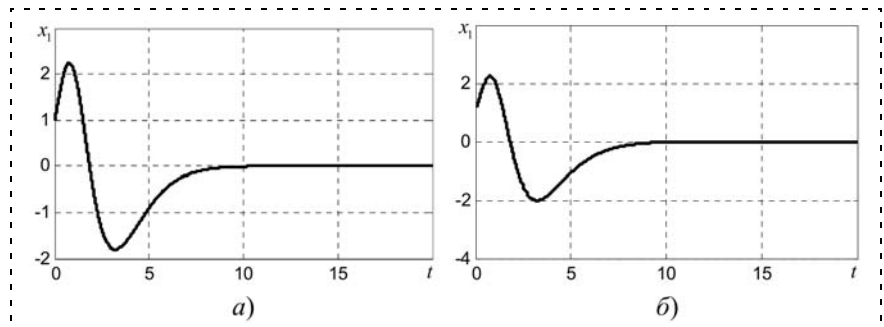


Рис. 2. Переходные процессы при полиномиальном возмущении:

а — $f(t) = 1 + 0,5t$; б — $f(t) = 1 + 0,5t - 0,05t^2$

при $\hat{f}^{(3)} = 0$ в (26), $x_0 = [1 \ 0,5 \ 0 \ 0]^T$, $\hat{w}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, линейном и квадратичном возмущениях.

Как видно из приведенных графиков, найденное управление (25), (26) обеспечивает компенсацию неопределенного возмущения на нелинейный объект (23), если порядок этого возмущения не более двух или если его третья производная по времени равна нулю.

Заключение

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- предложенный метод компенсации влияния возмущений применим, если уравнения нелинейного объекта могут быть представлены в управляемой форме Жордана, а переменные состояния доступны измерению;
- метод позволяет обеспечить компенсацию влияния неопределенного возмущения на нелинейный объект управления, если порядок v_f этого возмущения не больше допустимого $v_{доп}$ для синтезированной системы или если $(v_{доп} + 1)$ -я производная по времени этого возмущения равна нулю;
- если порядок возмущения v_f не превышает значения $v_{доп}$ и $(v_{доп} + 1)$ -я производная возмущения не равна нулю, то алгоритм управления является адаптивным и включает процедуру минимизации ошибки системы по коэффициентам

$K(p)$ -изображения действующего на объект возмущения;

- если $(v_{\text{доп}} + 1)$ -я производная по времени возмущения равна нулю, то алгоритм управления обеспечивает полную компенсацию влияния возмущения на ошибку системы без процедуры минимизации ошибки системы;
- порядок адаптивного устройства управления определяется порядком объекта, точкой приложения к нему возмущения и допустимым порядком возмущений, подлежащих компенсации. Он может быть понижен за счет применения наблюдателя Луенбергера;
- устройство управления включает наблюдатель состояния эквивалентной системы, позволяющий формировать оценки внешнего возмущения и его производных, а также алгоритм оценки порядка приложенного к объекту возмущения и алгоритм минимизации ошибки системы.

Необходимость представления уравнений объектов в управляемой форме Жордана не является жестким ограничением, так как уравнения очень многих реальных объектов имеют эту форму или могут быть приведены к ней путем замены переменных. Например, к последним относятся объекты, рассмотренные в работах [9, 10, 15].

Список литературы

1. **Гайдук А. Р.** О синтезе систем управления при заданной форме воздействий // *АиТ*. 1984. № 6. С. 13–20.
2. **Никифоров В. О.** Наблюдатели внешних детерминированных возмущений. I. Объекты с известными параметрами // *АиТ*. 2004. № 10. С. 13–24.

3. **Marino R., Tomei P.** Adaptive regulation of uncertain linear minimum phase systems with unknown exosystems // *Proc. IEEE 45th Conf. Decision Control*. San Diego. 2006. P. 1099–1104.

4. **Бобцов А. А.** Алгоритм управления по выходу с компенсацией смещенного гармонического возмущения // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. 2009. № 1. С. 45–48.

5. **Бобцов А. А., Кремлев А. С.** Алгоритм компенсации неизвестного синусоидального возмущения для линейного неминимально-фазового объекта // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2008. № 10. С. 14–17.

6. **Pyrkin A., Smyshlyaev A., Bekiaris-Liberis N., Kristic M.** Output control algorithm for unstable plant with input delay and cancellation of unknown biased harmonic disturbance // *9th IFAC Workshop on Time Delay Systems*. Prague, Czech Republic, 2010.

7. **Nikiforov V. O.** Adaptive non-linear tracking with complete compensation of unknown disturbance // *Eur. J. Control*. 1998. V. 4. № 2. P. 132–139.

8. **Никифоров В. О.** Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. СПб.: Наука, 2003.

9. **Бобцов А. А., Колобин С. А., Пыркин А. А.** Компенсация неизвестного мультигармонического возмущения для нелинейного объекта с запаздыванием по управлению // *АиТ*. 2010. № 11. С. 136–148.

10. **Бобцов А. А., Кремлев А. С., Пыркин А. А.** Компенсация гармонического возмущения для параметрического и функционально неопределенного нелинейного объекта // *АиТ*. 2011. № 1. С. 121–129.

11. **Нои М.** Amplitude and frequency estimator of a sinusoid // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2005. V. 50. P. 855–858.

12. **Бобцов А. А., Николаев Н. А., Слита О. В.** Новая схема идентификации частоты синусоидального сигнала // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2010. № 11. С. 2–4.

13. **Назин С. А., Поляк Б. Т., Топтунов М. В.** Подавление ограниченных внешних возмущений с помощью метода инвариантных эллипсоидов // *АиТ*. 2007. № 3. С. 106–125.

14. **Баландин Д. В., Коган М. М.** Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. М.: Физматлит, 2007.

15. **Гайдук А. Р.** Синтез нелинейных систем на основе управляемой формы Жордана // *АиТ*. 2006. № 7. С. 3–13.

16. **Гайдук А. Р.** Теория автоматического управления: Учебник. М.: Высшая школа, 2010.

17. **Бертсекас Д.** Условная оптимизация и методы множителей Лагранжа: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987.

УДК 681.511.3

Е. А. Шишкин, аспирант,
evgeny1607@rambler.ru,

Московский государственный университет
приборостроения и информатики

Динамические характеристики элементарных звеньев второго порядка с запаздыванием

Рассматриваются динамические характеристики линейных систем второго порядка с запаздыванием.

Ключевые слова: запаздывание, точность, динамические характеристики, максимальное отклонение

Введение. Динамические системы, описываемые линейными дифференциальными уравнениями с отклоняющимся аргументом, получили широкое распространение, так как они описывают многие

реальные системы автоматического управления (САУ). Представляется целесообразным наиболее простые и часто встречающиеся системы с запаздыванием трактовать как типовые элементарные звенья (ТЭЗ) [1] и попытаться получить достаточно полный набор их динамических характеристик. Для ТЭЗ первого порядка такой набор приведен в работе [2]. Для ТЭЗ второго порядка (ТЭЗ ВП) ситуация усложняется, так как она может содержать два различных запаздывания.

Математическая модель ТЭЗ ВП. В данной статье рассматривается модель второго порядка

$$T^2 y''(t) + 2\xi T y'(t) + y(t - \tau) = x(t), \\ T, \xi, \tau > 0, y(t) \equiv 0, t \leq 0. \quad (1.1)$$

Ей соответствует передаточная функция (ПФ)

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = G(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\xi T p + e^{-p\tau}}. \quad (1.2)$$

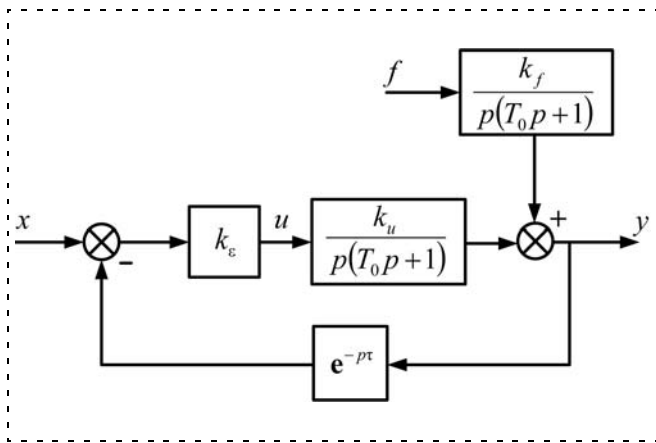


Рис. 1

Модель (1.1), (1.2) "порождается" обыкновенным колебательным звеном

$$T^2 y''(t) + 2\xi T y'(t) + y(t) = x(t) \quad (1.3)$$

с ПФ

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = G_0(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1} \quad (1.4)$$

Если говорить о САУ, то (1.2) может рассматриваться, например, как ПФ замкнутой системы со структурной схемой, показанной на рис. 1, где $x(t)$ — подлежащий воспроизведению входной сигнал, $f(t)$ — возмущающее воздействие.

В этом случае

$$T = \sqrt{\frac{T_0}{k}}, \quad \xi = \frac{1}{2\sqrt{T_0 k}} \quad (1.5)$$

Динамические характеристики ТЭЗ ВП. Опишем динамические характеристики, изучаемые в работе. Естественно, они зависят от поведения внешних воздействий. Такие же характеристики были рассмотрены в работе [2].

1. Ступенчатый входной сигнал

$$x(t) = x_0 > 0 \text{ при } t > 0, \quad x(t) = 0 \text{ при } t < 0. \quad (2.1)$$

Динамические характеристики:

- перерегулирование

$$\sigma = (y_{\max} - y_{\text{уст}}) / y_{\text{уст}},$$

$$\text{где } y_{\max} = \sup_{t \in [0, \infty)} |y(t)|, \quad y_{\text{уст}} = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t); \quad (2.2)$$

- время регулирования — момент времени $t_{\text{рег}}$, для которого выполняются условия

$$|y(t_{\text{рег}}) - y_{\text{уст}}| = \Delta_0 y_{\text{уст}}, \quad |y(t) - y_{\text{уст}}| < \Delta_0 y_{\text{уст}} \text{ при } t \in (t_{\text{рег}}, \infty), \quad (2.3)$$

где $\Delta_0 \in (0, 1)$ — заданная доля $y_{\text{уст}}$. Далее предполагается, что система асимптотически устойчива,

поэтому в силу (1.1) $y_{\text{уст}} = x_0$. При проведении вычислений предполагалось [1], что $\Delta_0 = 0,05$.

2. Гармоническое воздействие $x(t) = x_0 \cos(\omega t)$. Это воздействие рассматривается как возмущение. При $t \rightarrow \infty$ справедливо [1] соотношение

$$y_{\text{уст}}(t) = A(\omega) x_0 \cos(\omega t + \varphi(\omega)), \quad A(\omega) = |G(i\omega)|, \quad \varphi(\omega) = \arg G(i\omega). \quad (2.4)$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) $A(\omega)$ отражает реакцию системы на гармоническое возмущение. Определяются величины

$$A_{\max} = \max_{\omega \in [0, \infty)} A(\omega), \quad \omega^* = \arg \max_{\omega \in [0, \infty)} A(\omega). \quad (2.5)$$

3. Неполная информация о возмущении. В этом случае в уравнении (1.3) $x(t)$ рассматривается как возмущение, поведение которого заранее неизвестно. Задается лишь ограничение

$$x(t) \in X_0 = \{x(t) \mid |x(t)| \leq x_0\}. \quad (2.6)$$

Точность работы системы определяется [3, 4] глобальным точностным показателем качества (ТПК) — *максимальным возможным отклонением выходного сигнала от состояния покоя*

$$\tilde{y} = \sup_{t, x} |y(t)|, \quad t \in [0, \infty), \quad x(t) \in X_0. \quad (2.7)$$

4. Неполная информация о входном сигнале. В данном случае $x(t)$ в уравнении (1.3) — подлежащий воспроизведению заранее неизвестный входной сигнал, удовлетворяющий лишь условию

$$x(t) \in X_1 = \{x(t) \mid x(0) = 0, |x'(t)| \leq x_1\}. \quad (2.8)$$

Точность воспроизведения входного сигнала определяется [4, 5] глобальным ТПК — *максимальной возможной ошибкой воспроизведения входного сигнала*

$$\tilde{\varepsilon} = \sup_{t, x} |\varepsilon(t)|, \quad \varepsilon(t) = x(t) - y(t), \quad t \in (0, \infty), \quad x(t) \in X_1. \quad (2.9)$$

Результаты компьютерных экспериментов с ТЭЗ ВП. Система (1.1) заменой переменных

$$t = t_1 \tau, \quad y(t) = y(t_1 \tau) = \hat{y}(t_1), \quad x(t) = x(t_1 \tau) = \hat{x}(t_1) \quad (3.1)$$

приводится к виду

$$\frac{1}{\lambda^2} \frac{d^2 \hat{y}(t_1)}{dt_1^2} + 2\xi \frac{1}{\lambda} \frac{d\hat{y}(t_1)}{dt_1} + \hat{y}(t_1 - 1) = \hat{x}(t_1), \quad \lambda = \frac{\tau}{T}. \quad (3.2)$$

В силу этого характеристики σ , A_{\max} , \tilde{y} и $\tilde{\varepsilon}$ будут функциями параметров λ и ξ .

Из-за трудностей исследования уравнения (1.1) аналитическими средствами применяются вычислительные методы решения, основанные на использовании конечно-разностных схем.

Точностные показатели качества определяются соотношениями

$$\tilde{y} = \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{y}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} x_0 \int_0^t |g(t)| dt,$$

$$\tilde{\varepsilon} = \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\varepsilon}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} x_1 \int_0^t |g_\varepsilon(t)| dt,$$

$$g(t) \doteq G(p) = pG(p) \frac{1}{p}, \quad g_\varepsilon(t) \doteq \frac{1}{p} - G(p) \frac{1}{p},$$

т. е. $g(t)$ есть производная решения $y(t)|_{x(t) \equiv 1}$ уравнения (1.1), (1.2) при $x(t) \equiv 1$, а $g_\varepsilon(t) = 1 - y(t)|_{x(t) \equiv 1}$ (здесь \doteq — оператор взятия преобразования Лапласа).

Естественно, вычисления прекращаются в некоторый момент времени t_k и $\tilde{y}(t_k)$, $\tilde{\varepsilon}(t_k)$ принимаются за \tilde{y} , $\tilde{\varepsilon}$ соответственно. Величина t_k возрастает с ростом τ и T . Кроме того, дополнительно требуется, чтобы на интервале $[t_k, 2t_k]$ изменения значений функций $\tilde{y}(t)$, $\tilde{\varepsilon}(t)$ происходили лишь в пятом или последующих знаках после запятой.

Заметим, что в работе [6] для системы первого порядка с запаздыванием получены гарантированные оценки сверху разностей $\tilde{y} - \tilde{y}(t)$, $\tilde{\varepsilon} - \tilde{\varepsilon}(t)$, монотонно и экспоненциально убывающие при $t \rightarrow \infty$.

Описанные выше показатели качества будут конечны, если система (1.1) асимптотически устойчива. Применяя критерий Найквиста [1] к схеме на рис. 1, можно установить, что необходимое и достаточное условие устойчивости имеет вид

$$\lambda = \frac{\tau}{T} < \lambda_{\text{крит}} = \frac{\arccos(-2\xi^2 + \sqrt{4\xi^4 + 1})}{\sqrt{-2\xi^2 + \sqrt{4\xi^4 + 1}}}. \quad (3.3)$$

Аналогичная система второго порядка без запаздывания асимптотически устойчива при любых $T > 0$ и $\xi > 0$.

На рис. 2 (см. вторую сторону обложки) изображена зависимость перерегулирования σ из (1.1) от $\lambda = \tau/T$ при различных значениях коэффициента демпфирования ξ . Здесь и на последующих рисунках кривым соответствуют различные значения коэффициента демпфирования ξ . Эти значения представлены над соответствующими кривыми. Для данных кривых на рисунках штриховыми линиями обозначена граница устойчивости по λ при заданном ξ . Следует отметить увеличение чувствительности σ к наличию запаздывания τ при уменьшении коэффициента демпфирования ξ .

На рис. 3 (см. вторую сторону обложки) представлены функции $t_{\text{рег}}/T = \varphi(\lambda)$ при различных значениях ξ . Следует отметить, что при $\xi \leq \sqrt{2}/2$ функция $\varphi(\lambda)$ монотонно возрастает. Если $\xi > \sqrt{2}/2$, то $\varphi(\lambda)$ имеет минимум и затем монотонно возрастает. Здесь, как и в работе [2], имеет место ситуация, когда наличие запаздывания (не очень большого) улучшает важную динамическую характеристику системы.

Напомним, что для порождающей системы (1.3), (1.4) величина $\xi = \sqrt{2}/2$ является "граничной": при $\xi < \sqrt{2}/2$ АЧХ $A(\omega)$ монотонно убывает, а при $\xi > \sqrt{2}/2$ она имеет максимум.

Заметим также, что, как и в случае ТЭЗ первого порядка с запаздыванием, разрывы первого рода функции $\varphi(\lambda)$ на рис. 3 есть прямое следствие особенностей определения термина $t_{\text{рег}}$ в (2.2).

На рис. 4, 5 (см. вторую сторону обложки) приведены зависимости динамических характеристик \tilde{y}/x_0 и $\tilde{\varepsilon}/(x_1 T)$ от λ и ξ . Нормированное максимальное отклонение \tilde{y}/x_0 монотонно возрастает с ростом λ , и $\lim_{\lambda \rightarrow \lambda_{\text{крит}}} \tilde{y}/x_0 = \infty$ при любых значениях ξ .

Для нормированной максимальной ошибки $\tilde{\varepsilon}/(x_1 T)$ также справедливо соотношение $\lim_{\lambda \rightarrow \lambda_{\text{крит}}} \tilde{\varepsilon}/(x_1 T) = \infty$.

Она монотонно возрастает с ростом λ при $\xi \leq \sqrt{2}/2$; если же $\xi > \sqrt{2}/2$, то $\tilde{\varepsilon}/(x_1 T)$ имеет минимум по переменной λ , а значит, и по τ .

Рис. 6, 7 (см. вторую сторону обложки) изображают характеристики A_{max} , ω^* из (2.4), (2.5). Следует отметить, что величина $\omega^* T$, рассматриваемая как функция от λ (т. е. от τ), при любом фиксированном ξ имеет единственный максимум. Если $\xi > \sqrt{2}/2$, то эта функция имеет также начальный горизонтальный участок по оси абсцисс. При $\lambda \rightarrow \infty$ величина $\omega^* T$ стремится к конечному, отличному от нуля значению.

На рис. 8 (см. вторую сторону обложки) изображена зависимость отношения $R_0 = \tilde{y}/(x_0 A_{\text{max}})$ от λ и ξ . Возмущение вида $x(t) = x_0 \cos(\omega t)$, при котором $y_{\text{уст}}(t) = A(\omega) x_0 \cos(\omega t + \varphi(\omega))$, справедливо считается достаточно "неприятным" для систем и часто применяется при их испытаниях. Предложенная Б. В. Булгаковым [3] задача определения "наиболее опасного" возмущения из класса X_0 (см. (2.6)) приводит к определению максимального возможного отклонения \tilde{y} , но требует существенно больших усилий. В работах [4, 7] показано, что для системы с ПФ (1.4) справедливо утверждение

$$\sup_{T, \xi} R_0 = 4/\pi \approx 1,273.$$

τ	T_0							
	0,1	0,3	0,5	0,7	1	1,3	1,5	1,8
0,1	1,6 3,55 (0,319)	0,73 2,5 (0,66)	0,47 2,05 (0,98)	0,34 1,78 (1,29)	0,22 1,54 (1,742)	0,18 1,36 (2,1855)	0,16 1,3 (2,4773)	0,13 1,18 (2,911)
0,5	0,63 1 (0,76)	0,4 0,8 (1,164)	0,31 0,7 (1,546)	0,25 0,64 (1,91)	0,19 0,58 (2,438)	0,16 0,52 (2,948)	0,13 0,49 (3,2813)	0,1 0,46 (3,773)
0,7	0,45 0,76 (0,98)	0,35 0,65 (1,39)	0,28 0,55 (1,786)	0,23 0,52 (2,164)	0,17 0,46 (2,71)	0,13 0,43 (3,24)	0,13 0,4 (3,514)	0,1 0,37 (4,094)
1	0,33 0,54 (1,31)	0,25 0,45 (1,73)	0,22 0,43 (2,132)	0,19 0,4 (2,523)	0,16 0,37 (3,091)	0,13 0,34 (3,6402)	0,1 0,31 (4,0044)	0,1 0,31 (4,528)
1,5	0,2 0,35 (1,87)	0,2 0,35 (2,28)	0,16 0,31 (2,698)	0,16 0,28 (3,104)	0,13 0,28 (3,67)	0,1 0,25 (4,2643)	0,1 0,25 (4,636)	0,08 0,22 (5,204)
2	0,15 0,3 (2,415)	0,14 0,25 (2,84)	0,13 0,25 (3,254)	0,13 0,22 (3,67)	0,1 0,22 (4,269)	0,1 0,19 (4,8654)	0,06 0,19 (5,24)	0,04 0,19 (5,813)
2,5	0,12 0,24 (2,98)	0,12 0,21 (3,39)	0,12 0,21 (2,815)	0,1 0,22 (4,24)	0,1 0,19 (4,83)	0,06 0,16 (5,4544)	0,06 0,16 (5,866)	0,04 0,16 (6,413)
3	0,12 0,18 (3,54)	0,09 0,18 (3,94)	0,09 0,18 (4,372)	0,07 0,16 (4,83)	0,06 0,16 (5,3954)	0,05 0,16 (6)	0,05 0,15 (6,42)	0,04 0,15 (7,06)

Из рис. 8 (см. вторую сторону обложки) видно, что для системы (1.1), (1.2) величина R_0 также не превосходит величину 1,273. Заметим также, что у ТЭЗ первого порядка с запаздыванием величина $\sup R_0$ оказывается существенно большей, чем 1,273.

Обращаясь к задаче синтеза закона управления, рассмотрим структурную схему на рис. 1. Этой схеме соответствует уравнение

$$T^2 y''(t) + 2\xi T y'(t) + y(t - \tau) = x(t) + \frac{k_f}{k} f(t),$$

$$y(t) = 0 \quad (t \leq 0),$$

$$T = \sqrt{T_0/k}, \quad \xi = 1/(2\sqrt{T_0/k}),$$

$$k = k_\varepsilon k_u, \quad k_u > 0, \quad k_f > 0.$$

В законе управления $u(t) = k_\varepsilon(x(t) - y(t - \tau))$ коэффициент усиления k_ε (а значит, и k) — свободный параметр.

В аналогичной ситуации в системе первого порядка с запаздыванием $\min_k \tilde{y}$ и $\min_k \tilde{\varepsilon}$ реализуются при одном и том же значении свободного параметра k .

Для рассматриваемой модели второго порядка минимальные значения максимальной возможной ошибки $\tilde{\varepsilon}$ и максимального возможного отклонения \tilde{y} достигаются при различных значениях коэффициента усиления — k_ε и $k_{\tilde{y}}$, соответственно. Эти значения приведены в таблице. В каждой ее

клетке, соответствующей паре τ, T_0 , верхнее число есть $k_{\tilde{y}}$, следующее — k_ε ; в скобках приведено значение $\min_k \tilde{\varepsilon}$. Величина $\min_k \tilde{y}$ для значений τ, T_0 из таблицы практически равна единице.

Заключение. Изучены динамические характеристики (точностные показатели качества) типового элементарного звена второго порядка с запаздыванием. В основном эти показатели ухудшаются (увеличиваются) с ростом $\lambda = \tau/T$, что естественно. Однако представляется интересным, что некоторые точностные показатели достигают минимума при $\lambda \neq 0$.

Список литературы

1. Солодовников В. В. Теория автоматического регулирования. М.: Машиностроение, 1967.
2. Гноенский Л. С., Шишкин Е. А. Динамические характеристики типовых элементарных звеньев с запаздыванием // Изв. РАН. ТиСУ. 2011. № 4. С. 48—57.
3. Булгаков Б. В. О накоплении возмущений в линейных колебательных системах с постоянными параметрами // ДАН. Т. 51. 1946. № 5.
4. Гноенский Л. С., Каменский Г. А., Эльсгольц Л. Э. Математические основы теории управляемых систем. М.: Наука, 1969.
5. Гноенский Л. С. Формулы максимального отклонения линейных управляемых систем // Изв. АН. ТиСУ. 1998. № 2. С. 83—84.
6. Гноенский Л. С., Шишкин Е. А. О точности функционирования линейных стационарных регулируемых систем с запаздыванием // Изв. РАН. ТиСУ. 2012. № 1. С. 3—23.
7. Лурье А. И. Операционное исчисление. М.: ГИТТЛ, 1952.

УДК 62-55:681.515

Ю. И. Кудинов, д-р техн. наук, зав. каф.,
kui_kiu@lipetsk.ru,

А. Ю. Келина, канд. техн. наук, доц.,
kelina_ay@lipetsk.ru,
Липецкий государственный
технический университет

Упрощенный метод определения параметров нечетких ПИД регуляторов

Предлагается упрощенный метод определения параметров нечетких П, ПИ, ПД и ПИД регуляторов с использованием средств MATLAB.

Ключевые слова: настройка, нечеткие ПИД регуляторы, MATLAB

Введение

В последнее время все большее применение находят нечеткие пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы, обладающие гораздо большей гибкостью настройки, чем их линейные аналоги. Методы определения параметров нечетких ПИД регуляторов являются достаточно сложными и трудоемкими, что в значительной степени сдерживает их применение.

В данной статье предлагается упрощенный метод настройки параметров нечетких П, ПИ, ПД и ПИД регуляторов с использованием средств MATLAB и отдельных положений метода нечеткой линеаризации, изложенного в работе [1].

Рассмотрим представленную на рис. 1 схему наиболее распространенного нечеткого дискретного регулятора, в котором имеются два входа: ошибка

регулирования $e(k)$ и ее изменение $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ или скорость $\dot{e}(k) = \Delta e(k)/\Delta t$ и один выход $u(k)$ — управление в моменты времени $k\Delta t$, $k = 1, 2, \dots, N$, где Δt — шаг дискретизации.

Действительные значения входов e , Δe с помощью нормализующих коэффициентов K_e , $K_{\Delta e}$ преобразуются в нормализованные \hat{e} , $\Delta \hat{e} \in [-1, 1]$. Центральным элементом нечеткого регулятора служит нечеткий оператор \tilde{f}_p (рис. 1, б), выполняющий операции фазификации Fuz (Fuzzification), нечеткого вывода FI (Fuzzy Inference) и дефазификации Def (Defuzzification) и содержащий базу правил RB (Rule Base).

Операция фазификации Fuz преобразует нормализованные входы \hat{e} , $\Delta \hat{e}$ в нечеткие E , ΔE .

Нечеткий вывод FI , например методом Мамдани (Mamdani), находит нечеткий выход U на основании нечетких входов E , ΔE и базы правил RB вида

$$R_p^\theta: \text{если } \hat{e} \text{ есть } E^\theta, \Delta \hat{e} \text{ есть } \Delta E^\theta, \text{ то } \hat{u} \text{ есть } U^\theta, \\ \theta = 1, 2, \dots, q, \quad (1)$$

где E^θ , ΔE^θ , U^θ — нечеткие множества, имеющие терм-множества T_e , $T_{\Delta e}$, T_u с элементами, характеризующими значения соответствующих переменных \hat{e} , $\Delta \hat{e}$, \hat{u} (N — отрицательное, Z — нулевое, P — положительное или NB — большое отрицательное, NM — среднее отрицательное, ZE — близкое к нулевому, PM — среднее положительное, PB — большое положительное).

Операция дефазификации выхода Def преобразует нечеткий выход U , например методом медианы (Bisector) или центра тяжести (Centroid), в нормализованное значение $\hat{u} \in [L, -L]$, $L = 1, 2$, которое умножением на коэффициент K_u превращается в действительное u .

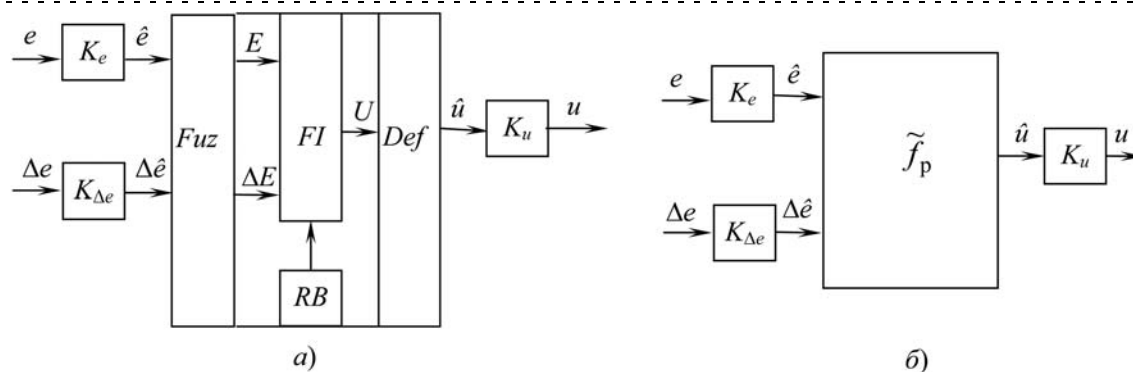


Рис. 1. Упрощенная (а) и операторная (б) схемы нечеткого регулятора с двумя входами

Упрощенный метод определения параметров нечетких П, ПИ, ПД и ПИД регуляторов состоит в оценке и оптимизации коэффициентов нечетких регуляторов.

1. Оценка коэффициентов нечетких регуляторов

Процесс оценки параметров нечетких П, ПИ, ПД и ПИД регуляторов можно описать так. В системе управления вместо предполагаемого нечеткого регулятора вычисляются параметры соответствующего линейного регулятора, которые затем используются при оценке коэффициентов подвергнутых линеаризации нечетких регуляторов. Таким образом, необходимо выполнить следующие действия:

- 1) определить параметры линейных регуляторов;
- 2) линеаризовать нечеткие регуляторы и определить их коэффициенты.

1.1. Определение параметров линейных регуляторов

Параметры K_{Π} , $T_{\text{и}}$, $T_{\text{д}}$ линейных П, ПИ и ПИД регуляторов определяем методом Циглера—Никольса [2]. Его суть заключается в нахождении такой величины K_{Π}^* пропорционального коэффициента K_{Π} (остальные $1/T_{\text{и}} = 0$ и $T_{\text{д}} = 0$), при которой в замкнутой системе регулирования возникают незатухающие колебания с частотой ω^* и периодом T^* . Далее с использованием найденных значений K_{Π}^* и T^* вычисляем параметры линейных П, ПИ и ПИД регуляторов (табл. 1). В качестве примера рассмотрим аналитический метод расчета значений K_{Π}^* и T^* в замкнутой системе управления (рис. 2), содержащей сумматор (С), который формирует ошибку $e = y^0 - y$ или отклонение выхода y от задания y^0 , линейный П регулятор и объект управления (ОУ) с передаточными функциями $W_{\Pi}(s) = K_{\Pi}$ и $W_{\text{оу}}(s)$.

Аналитический метод заключается в вычислении таких значений K_{Π}^* пропорционального коэффициента K_{Π} и частоты ω^* , при которых амплитудно-фазовая характеристика (АФХ) разомкнутой системы проходит через точку $(-1, i0)$. Пусть передаточная функция разомкнутой системы с П регулятором будет иметь вид

$$W(s, K_{\Pi}) = W_{\Pi}(s)W_{\text{оу}}(s) = K_{\Pi}W_{\text{оу}}(s). \quad (2)$$

При подстановке $s = i\omega$ в выражение (2) получим АФХ разомкнутой системы

$$W(i\omega) = A(K_{\Pi}, \omega)e^{i\varphi(\omega)},$$

Таблица 1

Параметры линейных регуляторов

Регулятор	K_{Π}	$T_{\text{и}}$	$T_{\text{д}}$
П	$0,5 K_{\Pi}^* = 4$		
ПИ	$0,45 K_{\Pi}^* = 3,6$	$T^*/1,2 = 3,1$	
ПИД	$0,6 K_{\Pi}^* = 4,8$	$T^*/2 = 1,9$	$T^* = 3,7$

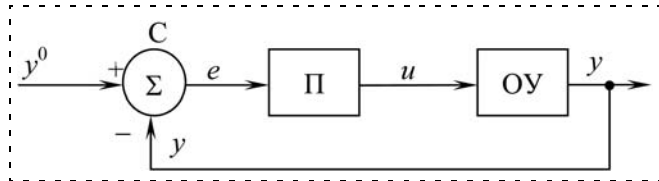


Рис. 2. Замкнутая система управления

в которой можно выделить амплитудно-частотную $A(K_{\Pi}, \omega)$ и фазочастотную $\varphi(\omega)$ характеристики. В замкнутой системе управления возникают незатухающие колебания, если выполняются два равенства

$$\text{а) } \varphi(\omega^*) = -\pi \text{ и б) } A(K_{\Pi}^*, \omega^*) = 1.$$

Вначале из равенства а) определяем частоту ω^* , а затем подставляем ее в выражение б) и находим K_{Π}^* . Зная частоту колебания ω^* , можно найти его период $T^* = 2\pi/\omega^*$. Так, для разомкнутой системы, содержащей П регулятор и объект с передаточной функцией

$$W_{\text{оу}}(s) = \frac{1}{(s+1)^3} = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}, \quad (3)$$

можно вычислить $K_{\Pi}^* = 8$ и $T^* = 3,7$, а по формулам табл. 1 — значения параметров линейных регуляторов, помещенные также в табл. 1 и обеспечивающие удовлетворительное качество управления.

1.2. Линеаризация нечетких регуляторов и определение их коэффициентов

Для того чтобы нечеткий оператор (регулятор) $\hat{u} = f(\hat{e}, \Delta\hat{e})$ на рис. 1, б стал эквивалентным нечеткому линеаризованному $\hat{u} = \hat{e} + \Delta\hat{e}$, необходимо выполнить следующие основные условия, установленные в работе [3]:

- 1) использовать в посылках треугольные функции принадлежности (рис. 3, а), пересекающиеся

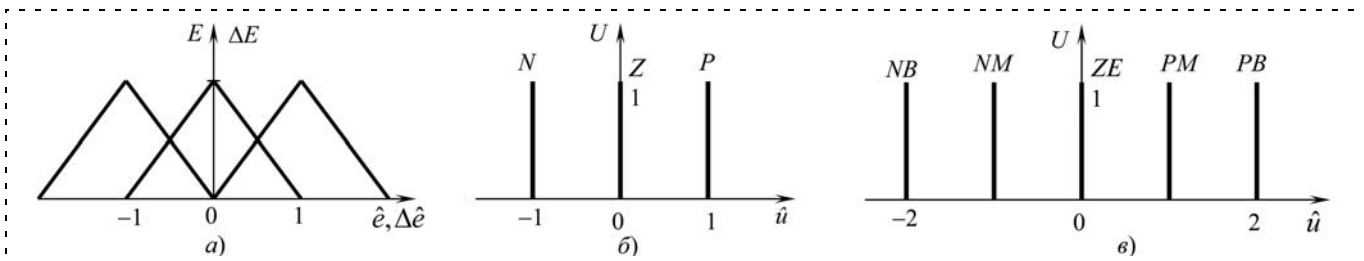


Рис. 3. Треугольная (а) и синглетоновые (б), (в) функции принадлежности

при значении 0,5, а в заключении — синглетоновые (рис. 3, б, в);

2) сконструировать базу правил, содержащую желательно все возможные \wedge -комбинации термов в посылке.

Линеаризуем нечеткие П, ПИ, ПД и ПИД регуляторы и найдем соотношения, связывающие их коэффициенты с параметрами линейных аналогов.

Нечеткий П регулятор

Нечеткий П регулятор имеет два коэффициента K_e и K_u (рис. 4).

Нечеткий оператор \tilde{f}_Π воспринимает входной сигнал $\hat{e} = K_e e$, т. е. $\hat{u}_\Pi = \tilde{f}_\Pi(K_e e) = \tilde{f}_\Pi(\hat{e})$.

Выходной сигнал регулятора u можно определить как

$$u = K_u \tilde{f}_\Pi(K_e e).$$

Пусть в составе нечеткого П оператора $\tilde{f}_\Pi(\hat{e})$ имеются следующие нечеткие правила, взятые из работы [1]:

$$\begin{aligned} R_\Pi^1 &: \text{если } \hat{e} \text{ есть } N, \text{ то } \hat{u}_\Pi \text{ есть } N; \\ R_\Pi^2 &: \text{если } \hat{e} \text{ есть } Z, \text{ то } \hat{u}_\Pi \text{ есть } Z; \\ R_\Pi^3 &: \text{если } \hat{e} \text{ есть } P, \text{ то } \hat{u}_\Pi \text{ есть } P. \end{aligned} \quad (4)$$

Считая линейным оператор $\tilde{f}_\Pi(K_e e) = K_e e$, получим

$$u = K_e K_u e. \quad (5)$$

Сравнивая формулу линейного П регулятора

$$u = K_\Pi e$$

с (5), находим соотношение

$$K_e K_u = K_\Pi, \quad (6)$$

связывающее коэффициенты линейного и нечеткого П регуляторов.

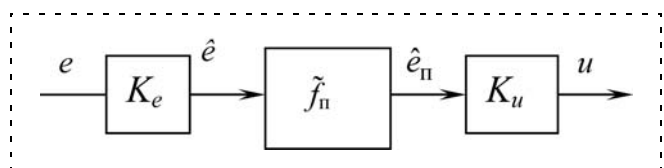


Рис. 4. Схема нечеткого П регулятора

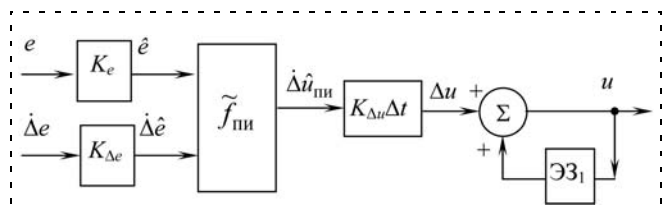


Рис. 5. Схема нечеткого ПИ регулятора

Нечеткий ПИ регулятор

Управляющий сигнал $u_{\text{ПИ}}(k)$ в этом регуляторе (рис. 5) равен сумме всех предыдущих отклонений:

$$u(k) = K_{\Delta u} \sum_{i=1}^k (\Delta \hat{u}_{\text{ПИ}}(i) \Delta t).$$

В состав нечеткого ПИ оператора входят две входные переменные e и $\Delta \hat{e}$:

$$\Delta \hat{u}_{\text{ПИ}} = \tilde{f}_\Pi(\hat{e}, \Delta \hat{e})$$

и нечеткие правила [1], использующие функции принадлежности на рис. 3, а, б:

$$\begin{aligned} R_{\text{ПИ}}^1 &: \text{если } \hat{e} \text{ есть } N, \Delta \hat{e} \text{ есть } N, \text{ то } \Delta \hat{u}_{\text{ПИ}} \text{ есть } N, \\ R_{\text{ПИ}}^2 &: \text{если } \hat{e} \text{ есть } N, \Delta \hat{e} \text{ есть } P, \text{ то } \Delta \hat{u}_{\text{ПИ}} \text{ есть } Z, \\ R_{\text{ПИ}}^3 &: \text{если } \hat{e} \text{ есть } P, \Delta \hat{e} \text{ есть } N, \text{ то } \Delta \hat{u}_{\text{ПИ}} \text{ есть } Z, \\ R_{\text{ПИ}}^4 &: \text{если } \hat{e} \text{ есть } P, \Delta \hat{e} \text{ есть } P, \text{ то } \Delta \hat{u}_{\text{ПИ}} \text{ есть } P, \end{aligned} \quad (7)$$

или функции принадлежности на рис. 3, а, в:

$$\begin{aligned} R_{\text{ПИ}}^1 &: \text{если } \hat{e} \text{ есть } N, \Delta \hat{e} \text{ есть } N, \text{ то } \Delta \hat{u}_{\text{ПИ}} \text{ есть } NB, \\ R_{\text{ПИ}}^2 &: \text{если } \hat{e} \text{ есть } N, \Delta \hat{e} \text{ есть } Z, \text{ то } \Delta \hat{u}_{\text{ПИ}} \text{ есть } NM, \\ R_{\text{ПИ}}^3 &: \text{если } \hat{e} \text{ есть } N, \Delta \hat{e} \text{ есть } P, \text{ то } \Delta \hat{u}_{\text{ПИ}} \text{ есть } ZE, \\ R_{\text{ПИ}}^4 &: \text{если } \hat{e} \text{ есть } Z, \Delta \hat{e} \text{ есть } N, \text{ то } \Delta \hat{u}_{\text{ПИ}} \text{ есть } NM, \\ R_{\text{ПИ}}^5 &: \text{если } \hat{e} \text{ есть } Z, \Delta \hat{e} \text{ есть } Z, \text{ то } \Delta \hat{u}_{\text{ПИ}} \text{ есть } ZE, \\ R_{\text{ПИ}}^6 &: \text{если } \hat{e} \text{ есть } Z, \Delta \hat{e} \text{ есть } P, \text{ то } \Delta \hat{u}_{\text{ПИ}} \text{ есть } PM, \\ R_{\text{ПИ}}^7 &: \text{если } \hat{e} \text{ есть } P, \Delta \hat{e} \text{ есть } N, \text{ то } \Delta \hat{u}_{\text{ПИ}} \text{ есть } ZE, \\ R_{\text{ПИ}}^8 &: \text{если } \hat{e} \text{ есть } P, \Delta \hat{e} \text{ есть } Z, \text{ то } \Delta \hat{u}_{\text{ПИ}} \text{ есть } PM, \\ R_{\text{ПИ}}^9 &: \text{если } \hat{e} \text{ есть } P, \Delta \hat{e} \text{ есть } P, \text{ то } \Delta \hat{u}_{\text{ПИ}} \text{ есть } PB. \end{aligned} \quad (8)$$

Линеаризация нечеткого ПИ регулятора выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} u(k) &= K_{\Delta u} \sum_{i=1}^k (\hat{e}(i) + \Delta \hat{e}(i)) \Delta t = \\ &= K_{\Delta u} \sum_{i=1}^k \left[K_e e(i) + K_{\Delta e} \frac{e(i) - e(i-1)}{\Delta t} \right] \Delta t = \\ &= K_{\Delta u} \left[K_e \sum_{i=1}^k e(i) \Delta t + K_{\Delta e} \sum_{i=1}^k (e(i) - e(i-1)) \right] = \\ &= K_{\Delta e} K_{\Delta u} [e(k) + \frac{K_e}{K_{\Delta e}} \sum_{i=1}^k e(i) \Delta t]. \end{aligned} \quad (9)$$

Сравнивая выражение линейного ПИ регулятора

$$u(k) = K_\Pi [e(k) + \frac{1}{T_i} \sum_{i=1}^k e(i) \Delta t]$$

с нечетким (9), получим следующие соотношения:

$$K_{\Delta e} K_{\Delta u} = K_{\Pi}, \quad (10)$$

$$\frac{K_e}{K_{\Delta e}} = \frac{1}{T_{\text{и}}}, \quad (11)$$

связывающие параметры линейного и коэффициенты нечеткого ПИ регуляторов.

Нечеткий ПД регулятор

Выход нечеткого ПД регулятора u (рис. 6) является функцией двух входов — ошибки e и ее скорости Δe :

$$u(k) = \tilde{f}_{\text{пд}}(K_e e(k), K_{\Delta e} \Delta e(k)) K_u. \quad (12)$$

Нечеткий оператор $\tilde{f}_{\text{пд}}(K_e e(k), K_{\Delta e} \Delta e(k)) = \tilde{f}_{\text{пд}}(\hat{e}(k), \Delta \hat{e}(k))$ может также содержать 4 или 9 правил, полученных при замене $\Delta \hat{u}_{\text{пи}}$ на $\hat{u}_{\text{пд}}$ в правилах (7) и (8).

Вновь предположим, что оператор $\tilde{f}_{\text{пд}}$ является линейным, т. е. допускает представление $\tilde{f}_{\text{пд}} = K_e e(k) + K_{\Delta e} \Delta e(k)$. Тогда (12) можно записать как

$$\begin{aligned} u(k) &= (K_e e(k) + K_{\Delta e} \Delta e(k)) K_u = \\ &= K_e K_u (e(k) + \frac{K_{\Delta e}}{K_e} \Delta e(k)). \end{aligned} \quad (13)$$

Сравнивая коэффициенты в линейном ПД регуляторе

$$u(k) = u_{\text{п}}(k) + u_{\text{д}}(k) = K_{\text{п}}(e(k) + T_{\text{д}} \Delta e(k))$$

и нечетком (13), получим два равенства

$$K_e K_u = K_{\text{п}}, \quad (14)$$

$$\frac{K_{\Delta e}}{K_e} = T_{\text{д}}, \quad (15)$$

устанавливающие связи между параметрами линейного и коэффициентами нечеткого ПД регуляторов.

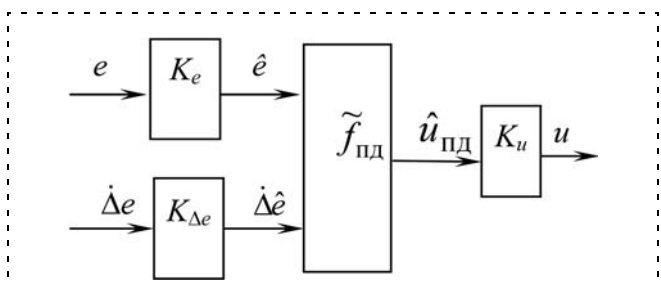


Рис. 6. Схема нечеткого ПД регулятора

Нечеткий ПИД регулятор

Нечеткий ПИД регулятор, в котором имеются нечеткая ПД составляющая и линейная И составляющая, а также два входа $e, \Delta e$, изображен на рис. 7. В этой схеме интегральная ошибка $e_{\text{и}}$ вычисляется как сумма инкрементных управлений, полученная на сумматоре C_1 и элементе задержки на 1 такт ЭЗ₁:

$$e_{\text{и}}(k) = \sum_{i=1}^k e(i) \Delta t.$$

Тогда выход регулятора, образованный суммой нечеткой ПД $\hat{u}_{\text{пд}}$ и четкой интегральной (И) $u_{\text{и}}$ составляющих на сумматоре C_2 определяется как

$$u(k) = K_u [\tilde{f}_{\text{пд}}(K_e e(k), K_{\Delta e} \Delta e(k)) + K_{\text{и}} e_{\text{и}}(k) \Delta t]. \quad (16)$$

Линеаризация выражения (16) имеет вид

$$\begin{aligned} u(k) &= K_u [K_e e(k) + K_{\text{и}} e_{\text{и}}(k) \Delta t + K_{\Delta e} \Delta e(k)] = \\ &= K_e K_u \left[e(k) + \frac{K_{\text{и}}}{K_e} \sum_{i=1}^k e(i) \Delta t + \frac{K_{\Delta e}}{K_e} \Delta e(k) \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Сравнивая (17) с выражением линейного дискретного ПИД регулятора

$$u(k) = K_{\text{п}} \left[e(k) + \frac{1}{T_{\text{и}}} \sum_{i=1}^k e(i) \Delta t + T_{\text{д}} \Delta e(k) \right],$$

получим следующие достаточно простые соотношения

$$K_e K_u = K_{\text{п}}, \quad (18)$$

$$\frac{K_{\text{и}}}{K_e} = \frac{1}{T_{\text{и}}}, \quad (19)$$

$$\frac{K_{\Delta e}}{K_e} = T_{\text{д}}, \quad (20)$$

связывающие параметры линейного и коэффициенты нечеткого ПИД регуляторов.

На основании соотношений (6), (10), (11), (14), (15), (18)—(20) можно установить соответствие между коэффициентами линейных традиционных и нечетких П, ПД, ПИ и ПИД регуляторов (табл. 2).

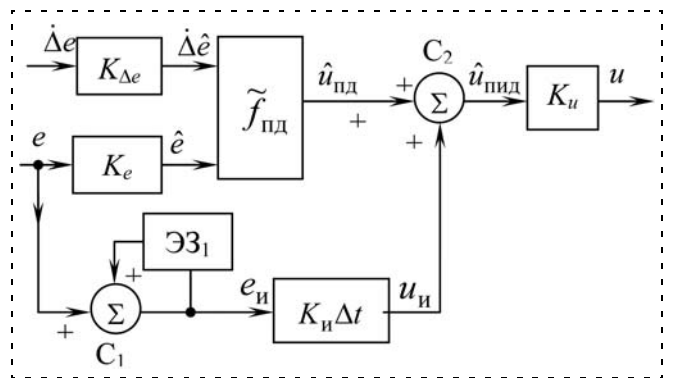


Рис. 7. Нечеткий ПИД регулятор

Таблица 2

Коэффициенты нечетких линейных регуляторов

Нечеткий регулятор	K_{Π}	$1/T_i$	T_d
П	$K_e K_u = 4$		
ПД	$K_e K_u = 4$		$K_{\Delta e}/K_e = 3,7$
ПИ	$K_{\Delta e} K_{\Delta u} = 3,6$	$K_e/K_{\Delta e} = 0,32$	
ПИД	$K_e K_u = 4,8$	$K_u/K_e = 0,51$	$K_{\Delta e}/K_e = 3,7$

Определяя методом Циглера—Никольса настройки линейных ПИД регуляторов (табл. 1) и подставляя их в табл. 2, можно получить соотношения для вычисления коэффициентов K_e , K_u , $K_{\Delta e}$, K_i и $K_{\Delta u}$ эквивалентных линейных нечетких ПИД регуляторов.

2. Оптимизация коэффициентов нечетких регуляторов

Из табл. 2 видно, что коэффициенты K_e , K_u , $K_{\Delta e}$, K_i и $K_{\Delta u}$ нечетких ПИД регуляторов не могут быть однозначно определены из приведенных соотношений, т. е. требуется решать задачи оптимизации нечетких регуляторов или нахождения значений коэффициентов, минимизирующих критерий качества переходного процесса. Задачи построения и моделирования систем управления, а также оптимизации нечетких ПИД регуляторов будем решать с помощью известных программных средств MATLAB — Simulink.

В работе рассматривается цифровая система управления (рис. 8), содержащая сумматор С, об-

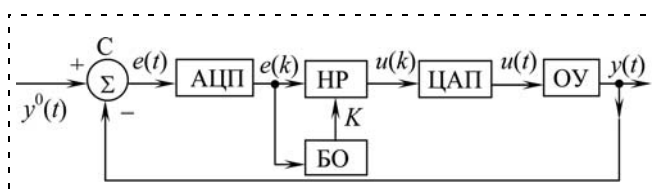


Рис. 8. Схема цифровой системы управления с нечетким регулятором

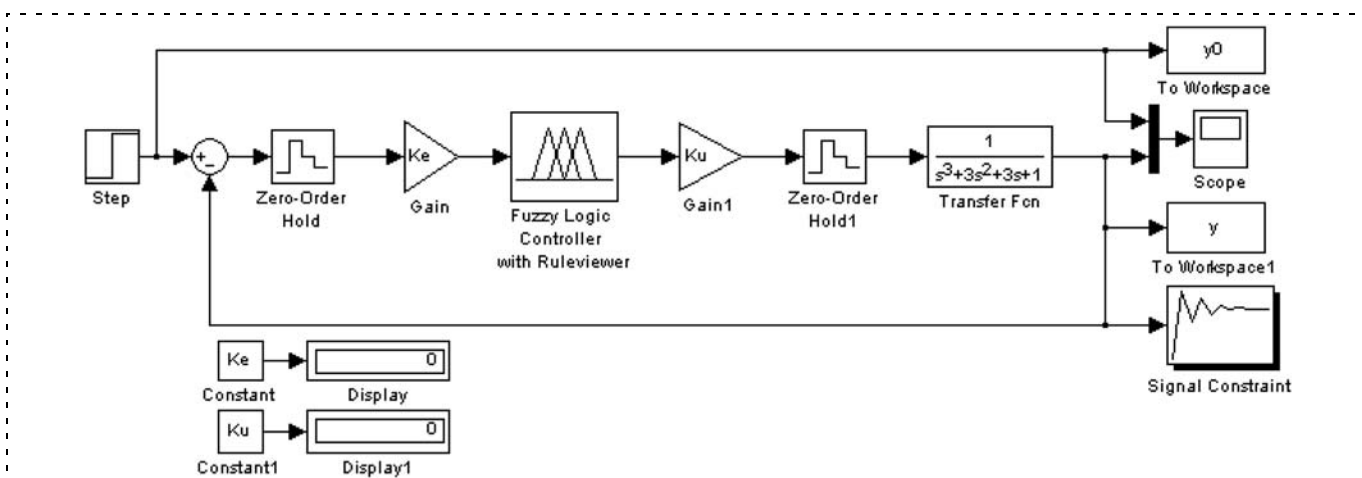


Рис. 9. Цифровая система управления с нечетким П регулятором

разующий ошибку $e(t) = y^0(t) - y(t)$, на вход которого подается единичный скачок по заданию y^0 ; аналого-цифровой преобразователь (АЦП), квантующий непрерывную ошибку $e(t) = y^0(t) - y(t)$ с шагом Δt ; нечеткий регулятор (НР), содержащий нечеткий оператор и элементы, формирующие изменение Δe или скорость Δe ошибки и управление $u(k)$; цифроаналоговый преобразователь (ЦАП); непрерывный объект управления (ОУ) с передаточной функцией (3) и блок оптимизации (БО) вектора коэффициентов $K = (K_e, K_{\Delta e}, K_u, K_{\Delta u})$ нечеткого регулятора.

Качество переходного процесса оценивается критерием — значением относительной среднемодульной ошибки


$$I = \frac{1}{N - k^*} \sum_{k=k^*}^N |y^0(k) - y(k)|/y^0(k), \quad (21)$$

которая вводится в виде программы в командную строку и вычисляется с момента k^* , когда выход $y(t)$ становится достаточно близким к заданию $y^0(k) = 1$, т. е. выполняется условие $|y^0(k^*) - y(k^*)|/y^0(k^*) < 0,05$.

В процессах моделирования и оптимизации будут участвовать два типа нечетких регуляторов: тип 1, содержащий функции принадлежности на рис. 3, а, б и правила (7), и тип 2, содержащий функции принадлежности на рис. 3, а, в и правила (8). Нечеткий регулятор второго типа подвергается оптимизации в том случае, когда оптимизация нечеткого регулятора первого типа не обеспечивает требуемого качества переходного процесса, т. е. нарушается условие $I < 0,05$.

2.1. Оптимизация нечеткого П регулятора

Теперь приступим к подробному пошаговому описанию процедур построения, моделирования и оптимизации в MATLAB — Simulink замкнутой цифровой системы управления (рис. 9), содержащей нечеткий П регулятор и объект управления с передаточной функцией (3).

Шаг 2.1.1. Для создания модели цифровой системы управления с нечетким П регулятором в пакете динамического моделирования Simulink в окне MATLAB командой **File, New, Model** откроем окно модели "Untitled", затем щелчком по кнопке Library Browser  откроем окно элементов "Simulink Library Browser".

Шаг 2.1.2. В левой половине окна "Simulink Library Browser" (рис. 10) найдем категорию Simulink, в ней выделим подкатегорию Sources, а в правой части окна — блок Step, вырабатывающий единичную ступенчатую функцию. Удерживая нажатой левую кнопку мыши, перетащим значок блока Step в окно моделирования "Untitled". Двойным щелчком на блоке Step откроем окно параметров, в котором установим момент возникновения единичного скачка Step time: 2 с, его начальное значение Initial value: 0, конечное значение Final value: 1 и интервал дискретности Sample time: 0.1.

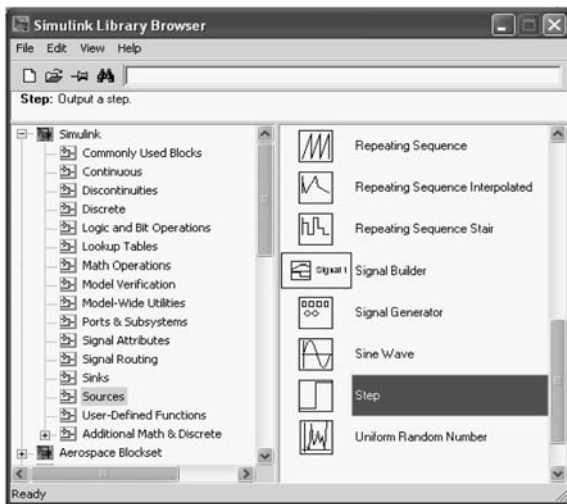



Рис. 10. Окно Simulink Library Browser

Шаг 2.1.3. Аналогичным образом из подкатегории Math Operations перетащим блок сравнения Sum в окно моделирования. Дважды щелкая на элементе сравнения Sum, откроем окно параметров и в поле List of sign (список знаков) правый знак + заменим на -, а в поле Sample time (время дискретизации) подставим 0.1 и нажмем ОК. При нажатой левой клавиши мыши соединим блоки Step и Sum (рис. 11).



Рис. 11. Соединение блоков




Шаг 2.1.4. В модель цифровой замкнутой системы управления из категории Simulink и подкатегории Math Operations перетащим два блока Gain в окно моделирования. Двойным щелчком на блоке Gain (или Gain1) откроем окно параметров и зададим в поле Gain: Ke (или Ku для блока Gain1) в поле Sample time: 0.1 и нажмем кнопку ОК. Из подкатегории Discrete перетащим два блока Zero-Order Hold  (АЦП и ЦАП).

Шаг 2.1.5. Двойным щелчком на категории Fuzzy Logic Toolbox выведем блок нечеткого регулятора Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer и перетащим его в окно модели.



Шаг 2.1.6. Из подкатегории Continuous перетащим блок передаточной функции объекта Transfer Fcn в окно модели. Дважды щелкнем на блоке Transfer Fcn и откроем окно передаточной функции с параметрами числителя (Numerator) и знаменателя (Denominator) обобщенной передаточной функции n -го порядка


$$W(s) = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n}, m \leq n,$$

на основании которой Numerator определяется как $[b_0, b_1, \dots, b_m]$, а Denominator — как $[a_0, a_1, \dots, a_n]$. Тогда согласно выражению передаточной функции объекта (3) введем следующие значения для Numerator: [1] и Denominator: [1 3 3 1] и нажмем ОК. Соединим блоки Sum, Gain, Zero-Order Hold, Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer, Gain2, Zero-Order Hold1, Transfer Fcn согласно рис. 9.

Шаг 2.1.7. В окно модели из категории Simulink и подкатегории Sink перетащим два блока  To Workspace, из подкатегории Commonly Used Block — блок мультиплектора сигналов Mux  и блок осциллографа Scope  с двумя входами.

Двойным щелчком по блоку Scope откроем его окно и введем ряд параметров. Установим курсор на линии ординат и нажатием правой кнопки вызовем окно, в котором выделим опцию Axes properties и в появившемся окне введем значения нижнего Y-min: 0 и верхнего Y-max: 1.41 пределов изменения выхода системы и нажмем ОК. Соединим блок Transfer Fcn с блоком Mux, а последний — с блоком Scope. Для того чтобы после блока Step сделать отвод линии на мультиплексор Mux, щелкнем левой кнопкой мыши по линии, соединяющей блоки Step и Sum, и, удерживая клавишу *Ctrl*, мышью создадим отвод линии. Аналогичным образом проведем линию отрицательной обратной связи или отвод от линии, соединяющей блоки Transfer Fcn и Mux, до блока Sum.

Шаг 2.1.8. Из категории Simulink добавим в модель два блока Constant  из подкатегории Sources и два блока Display  из подкатегории Sinks.

В окне параметров блоков Constant и Constant1 в поле Constant value введем обозначения Ke и Ku соответствующих коэффициентов K_e и K_u . Соединим блоки Constant и Display согласно рис. 9. Из категории Simulink Response Optimization двойным щелчком мыши откроем и переместим в окно моделирования блок динамической оптимизации Signal Constraint . В результате получим цифровую систему управления с нечетким П регулятором, показанную на рис. 9.

Шаг 2.1.9. Приступим к построению нечеткого П регулятора типа 1 с помощью редактора системы

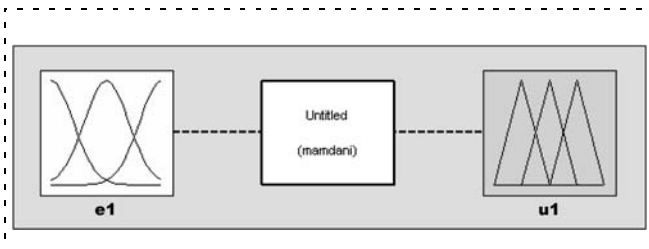


Рис. 12. Верхняя часть окна FIS-редактора

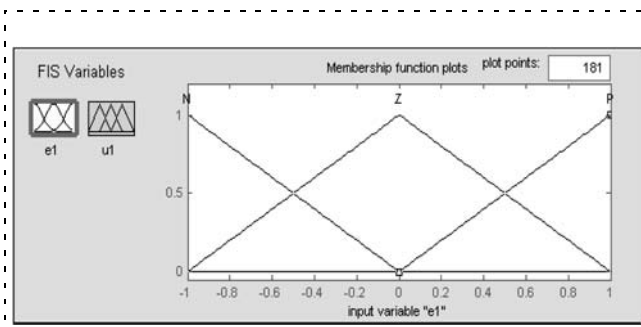


Рис. 13. Входные функции принадлежности

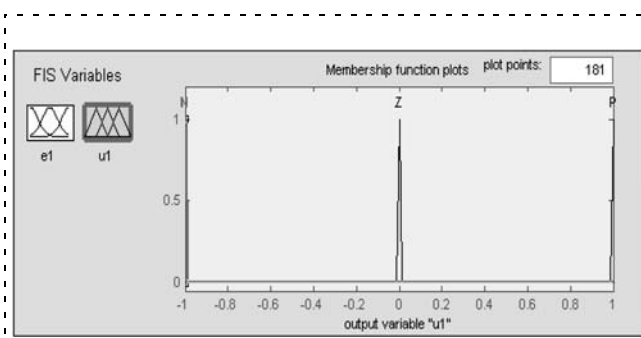


Рис. 14. Выходные функции принадлежности

1. If (e1 is P) then (u1 is P) (1)
2. If (e1 is Z) then (u1 is Z) (1)
3. If (e1 is N) then (u1 is N) (1)

Рис. 15. Нечеткие правила П регулятора

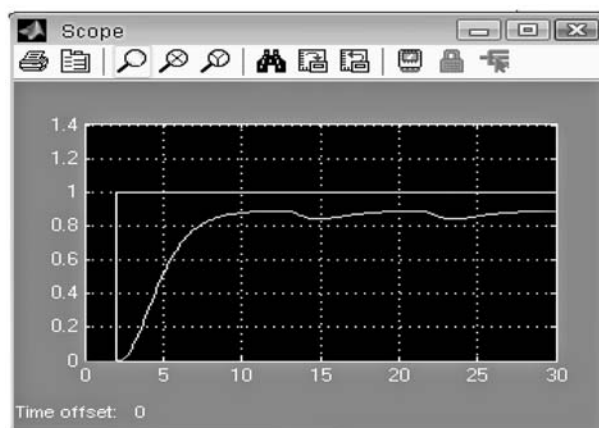
нечеткого вывода FIS Editor. Заменяя \hat{e} на e1 и \hat{u} на u1, запишем правила нечеткого линейного П регулятора (4) в более удобном виде:

$$\begin{aligned}
 R_{\Pi}^1 &: \text{если } e1 \text{ есть } P, \text{ то } u1 \text{ есть } P, \\
 R_{\Pi}^2 &: \text{если } e1 \text{ есть } Z, \text{ то } u1 \text{ есть } Z, \\
 R_{\Pi}^3 &: \text{если } e1 \text{ есть } N, \text{ то } u1 \text{ есть } N.
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

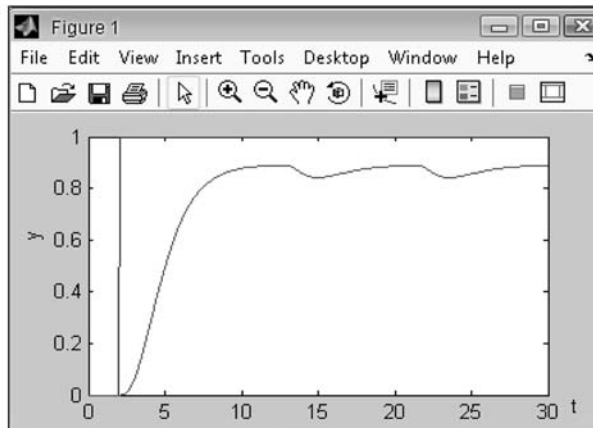
Для запуска FIS-редактора в командной строке MATLAB введем команду fuzzy, нажмем Enter и откроется окно "FIS Editor Untitled". Командой **File, New FIS, Mamdani** выберем тип нечеткого вывода Mamdani. Щелчком мыши выделим блок входной переменной input1, в поле Name введем e1 и нажмем Enter, после чего выделим блок выходной переменной output1, в поле Name введем u1 и нажмем Enter. В поле Defuzzification выберем метод Bisector. Верхняя часть FIS-редактора будет иметь вид, показанный на рис. 12. Двойным щелчком по блоку входной переменной e1 откроем окно "Membership Function Editor: Untitled". Щелчком мыши выделим первую функцию принадлежности mf1, которая окрасится красным цветом. В поле Range установим диапазон [-1 1] и подтвердим его щелчком мыши в поле Display Range. Далее в поле Name введем имя функции принадлежности N и нажмем Enter, в поле Type выберем треугольную функцию принадлежности trimf, зададим значение Params [-300 -1 0] и нажмем Enter. Выделим вторую функцию принадлежности mf2, в полях Range и Display Range уже установлен диапазон [-1 1], в поле Name введем имя Z, нажмем Enter, проверим в Type наличие треугольной функции принадлежности trimf, зададим значение Params [-1 0 1] и нажмем Enter.

Выделим третью функцию принадлежности mf3, в поле Name введем P, в Type — trimf, зададим значение Params [0 1 300] и нажмем Enter. Функции принадлежности для входной переменной e1 будут иметь вид, изображенный на рис. 13. В окне "Membership Function Editor: Untitled" щелчком мыши по блоку u1 перейдем к построению функций принадлежности выходной переменной u1. Определим пределы Range и Display Range, равные [-1 1], после чего первой mf1 зададим имя N, значение Params [-1 -1 -1]; второй mf2 — имя Z, значение Params [0 0 0]; третьей mf3 — имя P, значение Params [1 1 1] (рис. 14).

В окне "FIS Editor Untitled" командой **Edit, Rules** откроем окно редактора правил "Rule Editor: Untitled". Щелчком мыши в левом поле If e1 is выделим функцию принадлежности P, а в правом поле Then u1 is — P, после чего нажмем кнопку Add rule. В верхнем поле появится первое нечеткое правило (рис. 15) из базы правил (22). По аналогии создадим второе и третье правила. Для выхода из окна "Rule Editor: Untitled" нажмем кнопку Close. Аналогично закроем окно "Membership Function Editor: Untitled". В окне "FIS Editor Untitled" сохраним FIS модель нечеткого П регулятора командой **File, Export, To Disk**




а)



б)

Рис. 16. Окна осциллографа (а) форматирования (б)

под именем fuzzyPcontroller.fis. Чтобы воспользоваться регулятором в Simulink, поместим его FIS модель в рабочую область MATLAB. Для этого командой **File, Export, To Workspace** откроем окно, в поле **Workspace variable** введем fuzzyPcontroller и нажмем ОК. Свернем окно FIS редактора. Перейдем к модели в Simulink, двойным щелчком мыши откроем окно параметров блока **Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer** и в поле **FIS matrix** вместо **Fis** введем fuzzyPcontroller. В командной строке MATLAB вводим разные значения K_e и K_u , удовлетворяющие ограничению $K_e K_u = 4$, нажмем кнопки  **Start simulation** запускаем процесс моделирования системы управления и находим наилучшую реакцию на единичный скачок при $K_e = 4,49$, $K_u = 0,89$. Определим переходный процесс в системе с этими параметрами настройки нечеткого П регулятора. В командной строке MATLAB введем значения коэффициентов, $K_e = 4,49$; $K_u = 0,89$, нажмем **Enter** и получим графики переходного процесса, представленные в окне осциллографа (рис. 16, а) и в окне форматирования графика (рис. 16, б). Среднемодульная ошибка равна 25,4 %, т. е. требуется оптимизация нечеткого П регулятора.

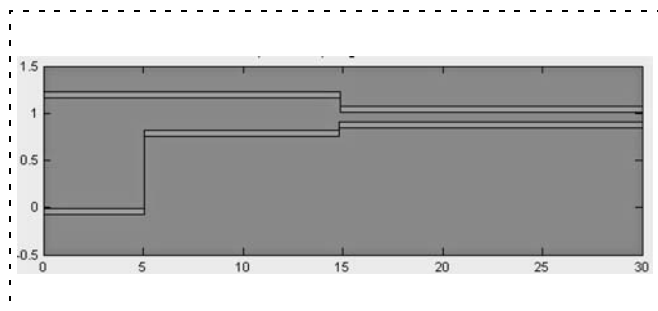




Рис. 17. Задание ограничений


Шаг 2.1.10. Перейдем в окно свойств блока **Signal Constraint**

 (рис. 17) и, перемещая мышью вертикальные и горизонтальные линии ограничений, зададим границы выходного сигнала: время нарастания — не более 5 с и длительность переходного процесса — не более 15 с.

В окне **"Block Parameters: Signal Constraint"** в меню **Optimization** выберем пункт **Tuned Parameters**. В открывшемся окне **"Tuned Parameters"** нажмем кнопку **Add** и выберем коэффициенты, которые требуется настроить — K_e и K_u и нажмем ОК.

Подтвердим выбранные переменные повторным нажатием ОК. После чего в окне **"Block Parameters: Signal Constraint"** запустим процесс оптимизации, нажав кнопку  **Start optimization**. Среднемодульная ошибка системы при $K_e = 35,18$ и $K_u = 0,9823$ составляет 2,6 % и в ряде случаев считается удовлетворительной.

2.2. Оптимизация нечеткого ПИИ регулятора

Шаг 2.2.1. Построим модель цифровой системы управления с нечетким ПИИ регулятором (рис. 18), повторяя шаги 2.1.1—2.1.8 и учитывая присутствие двух новых блоков **Unit Delay**  (сдвиг на один такт) из категории Simulink и подкатегории Sources, а также дополнительных блоков: сумматора **Sum (+ -)** и усилителя **Gain1** (с коэффициентом усиления K_e), образующих ошибку $\Delta \hat{e}$, мультиплексора **Mux**, сумматора **Sum (+ +)**, осуществляющего совместно с блоком **Unit Delay1** суммирование сигнала $\Delta \hat{u}_{\text{ПИИ}}(k)$, константы **Constant2** и дисплея **Display2**, определяющих и фиксирующих значение коэффициента $K_{\Delta e}$ или K_{du} на рис. 18.

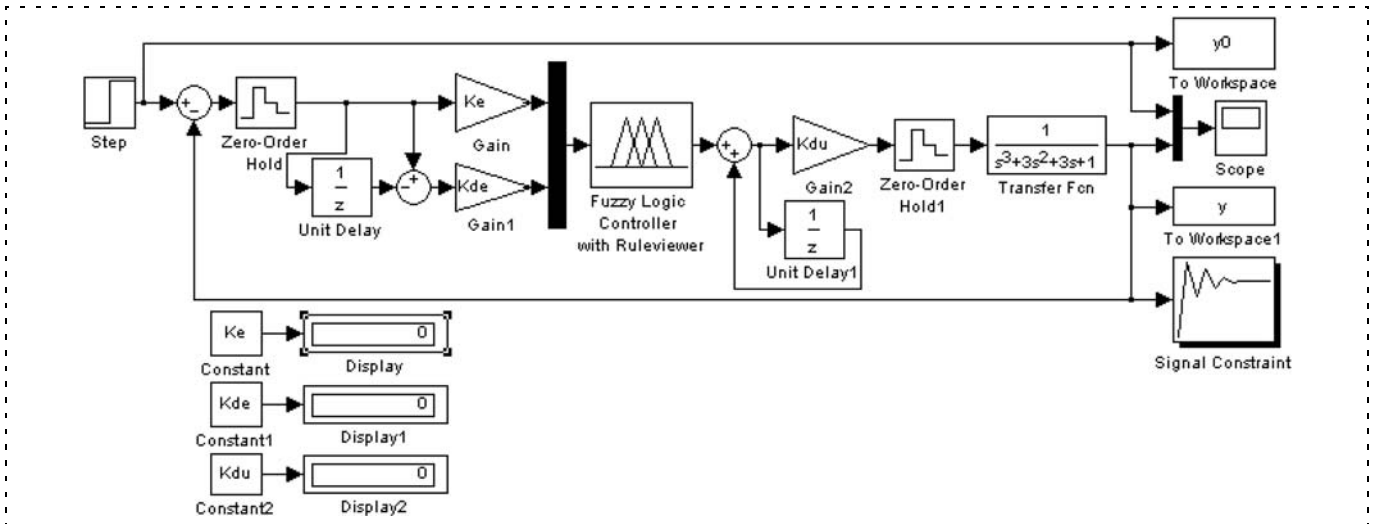


Рис. 18. Цифровая система управления с нечетким ПИ регулятором

Шаг 2.2.1. Перейдем к построению нечеткого ПИ регулятора типа 1 с помощью редактора системы нечеткого вывода FIS Editor. Для запуска FIS-редактора в командной строке MATLAB введем команду `fuzzy`, нажмем *Enter* и откроется окно "FIS Editor Untitled".

Командой **File, New FIS, Mamdani** выберем тип нечеткого вывода Mamdani и добавим вторую входную переменную командой **Edit, Add variable, Input**. Щелчком мыши выделим блок входной переменной `input1`, в поле Name введем `e1` и нажмем *Enter*, затем выделим блок входной переменной `input2`, в поле Name введем `de1` и нажмем *Enter*, после чего выделим блок выходной переменной `output1`, в поле Name введем `du1` и нажмем *Enter*. В поле Defuzzification выберем метод Bisector. Верхняя часть FIS-редактора будет иметь вид, показанный на рис. 19.

Двойным щелчком по блоку входной переменной `e1` откроем окно "Membership Function Editor: Untitled" и повторим построение трех треугольных функций принадлежности для входной переменной `e1` (см. рис. 13), описанное на шаге 2.1.9. Выполним то же самое для `de1`. Построим три синглетоновые функции принадлежности нечетких множеств выходной переменной `du1` (см. рис. 14).

Заменяя переменные \hat{e} , $\Delta \hat{e}$, $\Delta \hat{u}_{\text{ПИ}}$ на соответствующие `e1`, `de1`, `du1` в правилах (7), запишем последние в виде, удобном для дальнейшего использования:

$$\begin{aligned}
 R_{\text{ПИ}}^1 &: \text{если } e1 \text{ есть N, } de1 \text{ есть N то } du1 \text{ есть N,} \\
 R_{\text{ПИ}}^2 &: \text{если } e1 \text{ есть N, } de1 \text{ есть P, то } du1 \text{ есть Z,} \\
 R_{\text{ПИ}}^3 &: \text{если } e1 \text{ есть P, } de1 \text{ есть N, то } du1 \text{ есть Z,} \\
 R_{\text{ПИ}}^4 &: \text{если } e1 \text{ есть P, } de1 \text{ есть P, то } du1 \text{ есть P.}
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

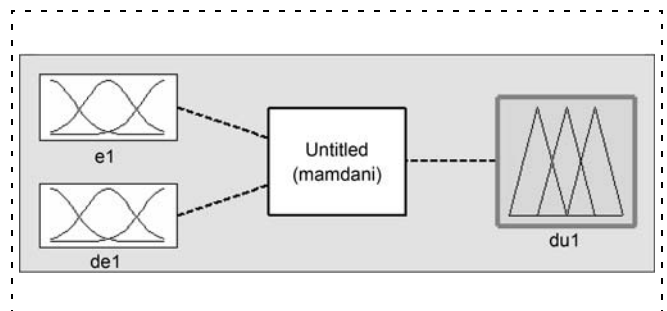


Рис. 19. Структура нечеткого ПИ регулятора

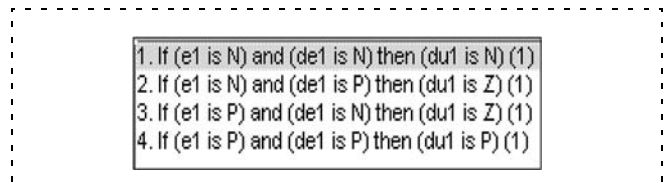


Рис. 20. Правила нечеткого ПИ регулятора

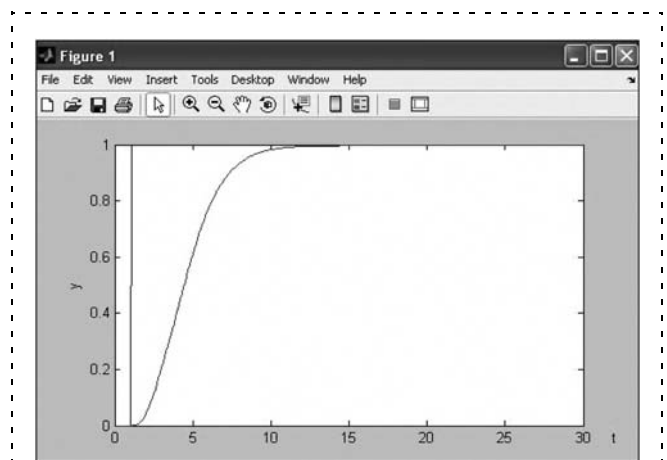


Рис. 21. Переходный процесс в системе с нечетким ПИ регулятором

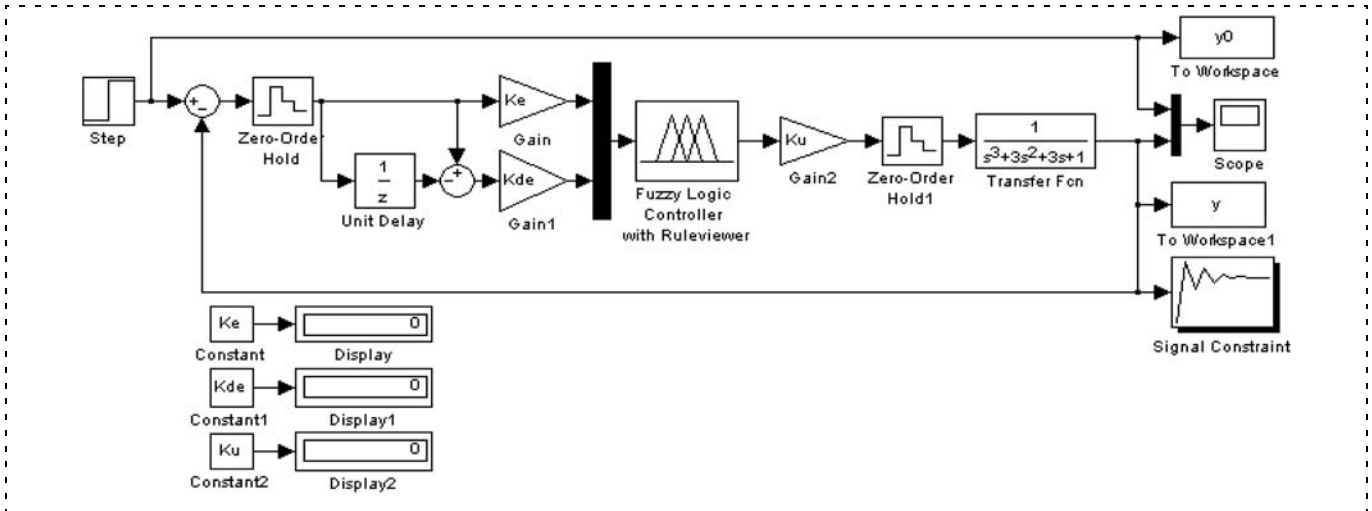


Рис. 22. Цифровая система управления с нечетким ПД регулятором

В окне "FIS Editor Untitled" командой **Edit, Rules** откроем окно редактора правил "Rule Editor:Untitled". Щелчком мыши в левом поле If e1 is выделим метку N, в поле End de1 is — метку N, а в правом поле Then du1 is — метку N, после чего нажмем кнопку Add rule. В верхнем выделенном поле появится первое нечеткое правило. Аналогичным образом, используя правила (23), построим остальные нечеткие правила, показанные на рис. 20.

Для выхода из окна "Rule Editor: Untitled" нажмем кнопку Close. Аналогично закроем окно "Membership Function Editor: Untitled". В окне "FIS Editor Untitled" сохраним FIS модель нечеткого ПИ регулятора командой **File, Export, To Disk** под именем fuzzyPIcontroller.fis. Поместим FIS модель в рабочую область MATLAB. Для этого командой **File, Export, To Workspace** откроем окно, в поле Workspace variable введем fuzzyPIcontroller и нажмем ОК, чтобы воспользоваться регулятором в Simulink. Свернем окно FIS редактора.

Перейдем к модели в Simulink, двойным щелчком мыши откроем окно параметров блока Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer и в поле FIS matrix вместо Fis введем fuzzyPIcontroller. Найдем коэффициенты K_e , K_{de} и K_{du} из условий $K_e = 0,5$, $K_{de} = K_e/3,1$, $K_{du} = 3,6/K_{de}$. При вводе в командную строку MATLAB разных значений K_e , K_{de} и K_{du} при $K_e = 11$ был получен наилучший переходный процесс со среднемодульной ошибкой, равной 23 %.

Повторяя действия шага 2.1.10, выберем коэффициенты, подлежащие оптимизации K_e , K_{de} и K_{du} , запустим процесс оптимизации, нажав кнопку Start optimization, и получим $K_e = 1$, $K_{de} = 5$, $K_{du} = 1$. В окне "fuzzyPI" запустим процесс управления с оптимальными коэффициентами, изображенный на рис. 21.

Среднемодульная ошибка переходного процесса составила 0,34 %.

2.3. Оптимизация нечеткого ПД регулятора

В цифровой системе управления с нечетким ПД регулятором на рис. 22 уже отсутствует операция интегрирования, реализованная на рис. 18. Повторяя шаги 2.1.1—2.1.8 и шаги 2.2.1, 2.2.2 с правилами (23), в которых $du1$ заменим на $u1$, построим систему управления с нечетким ПД регулятором типа 1 (рис. 22), получим переходный процесс и вычислим его критерий качества.

Наилучшая реакция на единичный скачок получена при $K_e = 0,7$, $K_{de} = 1,494$, $K_{u} = 1,638$. При оптимизации коэффициентов нечеткого ПД регулятора типа 1 среднемодульная ошибка не опускалась ниже 31,6 %. Для ее снижения повторим перечисленные выше действия с нечетким ПД регулятором типа 2, у которого выход $u1$ меняется в интервале $[-2, 2]$, выходные синглетонные функции принадлежности имеют вид, показанный на рис. 23, и используются девять нечетких правил (8), в которых проведена замена \hat{e} на $e1$, $\Delta \hat{e}$ на $de1$ и $\Delta \hat{u}_{\text{ПИ}}$ на $u1$.

Оптимизация нечеткого ПД регулятора типа 2 позволила получить следующие значения коэффициентов: $K_e = 56,191$, $K_{de} = 0,0001314$, $K_u = 0,987$ и среднемодульную ошибку 2,03 %.

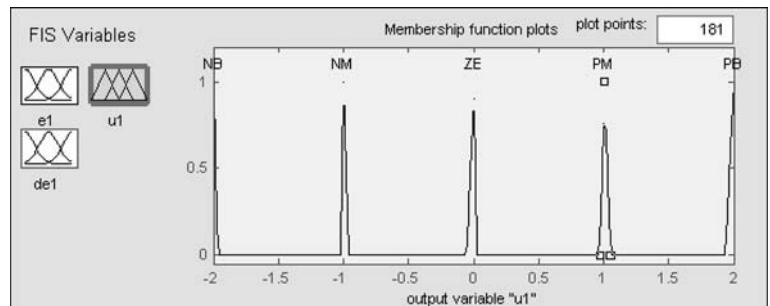


Рис. 23. Выходные функции принадлежности

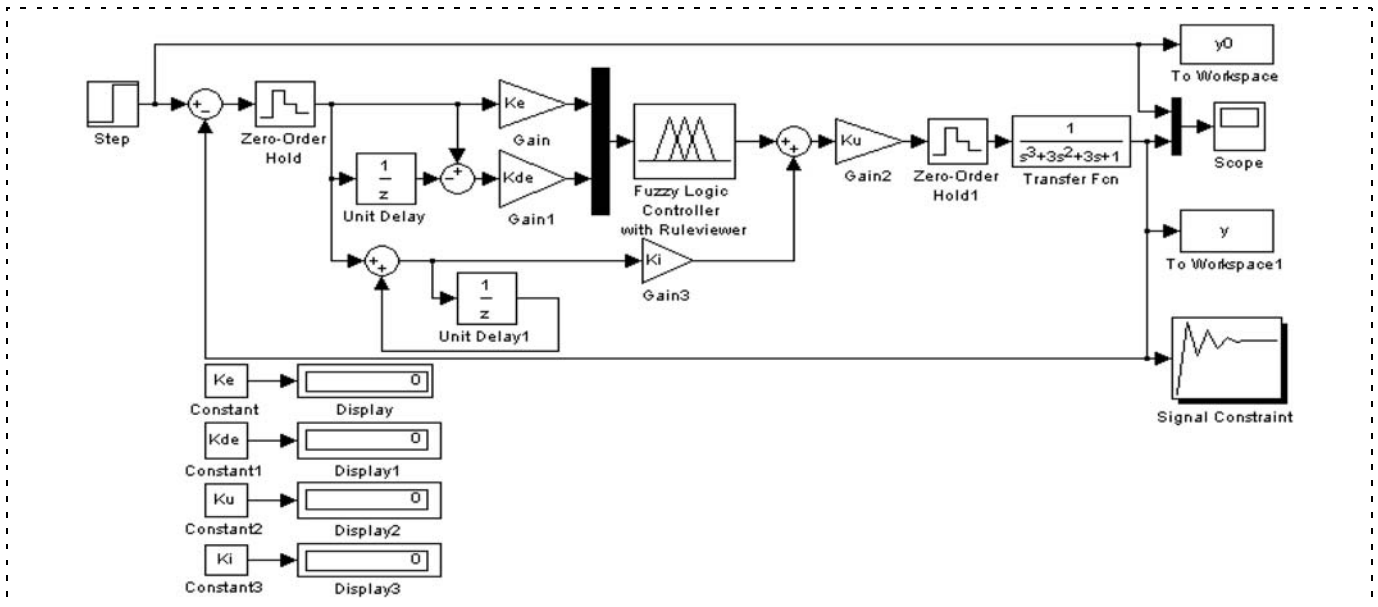


Рис. 24. Цифровая система управления с нечетким ПИД регулятором

2.4. Оптимизация нечеткого ПИД регулятора

Цифровая система управления с нечетким ПИД регулятором на рис. 24 отличается от схемы на рис. 22 наличием дополнительных элементов: двух сумматоров Sum (+ +), сдвига на один такт Unit Delay1, умножения на постоянный коэффициент Gain3 (Ki), образующих интегральную составляющую регулятора, и соединенных между собой блоков Constant 3 и Display 3 для вывода значения коэффициента Ki или $K_{и}$.

При оптимизации системы управления с нечетким ПИД регулятором типа 1 была получена очень небольшая среднемодульная ошибка 0,84 % при

$$K_e = 2,944; K_{de} = 1,529, K_{и} = 0,682, K_{и} = 0,570.$$

Заключение

Выполненные исследования переходных процессов в системах управления с нечеткими П, ПИ,

ПД и ПИД регуляторами показали, что при оптимизации их параметров и изменении структуры (числа правил) удается получить малую среднемодульную ошибку, не превышающую 3 %. Вместе с тем, остается актуальной проблема обеспечения требуемого запаса устойчивости системы управления с нечетким ПИД регулятором, отмеченная в работе [4].

Список литературы

1. Jantzen J. Foundations of Fuzzy Control. John Wiley & Sons: Chichester, 2007.
2. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers // Transactions on ASME. 1942. V. 65. P. 433—444.
3. Siler W., Ying H. Fuzzy control theory: The linear case // Fuzzy Sets and Systems. 1989. V. 33. P. 275—290.
4. Гостев В. И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. СПб.: БХВ-Петербург, 2011.

ИНФОРМАЦИЯ

23—26 апреля 2013 г. в Москве в павильоне № 75 ВВЦ состоится

18-я Московская международная выставка и конференция

ПО ТРАНСПОРТУ И ЛОГИСТИКЕ "ТРАНСРОССИЯ"



Выставка логистики главная площадка, на которой обсуждаются самые актуальные проблемы развития российской транспортной системы, разрабатываются новые информационные системы взаимодействия различных видов транспорта, направленные на успешное решение вопросов логистики на глобальном рынке транспортно-логистических услуг.

Подробную информацию о конференции см. на сайте:

<http://www.transrussia.ru/conference.aspx>

- А. Б. Шабунин**, руководитель научно-технического комплекса проектирования и разработки информационных систем, a_shabunin@hotmail.com, ОАО "НИИАС",
- Н. А. Кузнецов**, д-р техн. наук, советник, kuznetsov@cplire.ru, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
- П. О. Скобелев**, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., petr.skobelev@gmail.com, Институт проблем управления сложными системами РАН, Генеральный директор ООО "НПК "Мультиагентные технологии",
- И. О. Бабанин**, вед. разработчик, babanin@gmail.com, ООО "НПК "Разумные решения",
- С. С. Кожевников**, директор аналитического центра, Kozhevnikovvss@gmail.com, ООО "НПК "Разумные решения"
- Е. В. Симонова**, канд. техн. наук, вед. аналитик, Simonova.Elena.V@gmail.com, ООО "НПК "Разумные решения"
- М. Е. Степанов**, разработчик, multinodus@gmail.com, ООО "НПК "Разумные решения"
- А. В. Царев**, Генеральный директор, at@anarun.net, ООО "НПК "Разумные решения"

Разработка мультиагентной системы адаптивного управления ресурсами ОАО "РЖД"

Предлагается мультиагентный подход для адаптивного управления ресурсами ОАО "РЖД" в реальном времени, при котором план движения выстраивается как динамическая сеть потребностей и возможностей поездов, станций, участков путей и других элементов. Дается краткое описание подхода и рассматривается архитектура мультиагентной системы адаптивного управления ресурсами ОАО "РЖД", логика мультиагентного планирования и протоколы взаимодействия агентов. Приводится пример построения и перепланирования расписания движения высокоскоростных поездов "Сапсан" на участке Москва — Санкт-Петербург. Показывается, что предлагаемый подход позволяет при поступлении новых событий выявлять конфликты и адаптивно корректировать планы в режиме реального времени с учетом особенностей складывающейся ситуации.

Ключевые слова: мультиагентная система, адаптивное планирование, протокол взаимодействия между агентами, разрешение конфликта, реальное время

Железнодорожный транспорт является основополагающим для организации перевозочного процесса в России. Стратегические направления научно-технического развития ОАО "Российские железные дороги" на период до 2015 г. предусматривают применение новых технологий планирования и оптимизации перевозок в целях повышения качества услуг грузовым и пассажирским перевозкам и снижения стоимости транспортной составляющей в конечной цене товара [1].

Одним из важных шагов в этом направлении является переход от пакетного управления ресурсами, когда все потребности и возможности в перевозке известны заранее, к принятию решений "на лету" в условиях высокой неопределенности и непредвиденных изменений спроса и предложения, что предполагает разработку и использование новых методов и средств автоматизации управленческой и производственной деятельности ОАО "РЖД" для создания интеллектуальных систем поддержки принятия согласованных решений в реальном времени [2].

Для решения сложных задач распределения, планирования и оптимизации ресурсов в реальном времени в последнее время все чаще применяется мультиагентный подход, позволяющий повышать эффективность использования ресурсов на 15...20 % за счет высокой гибкости и оперативности реакции на непредвиденные события, связанные с появлением новых заказов, неожиданным выходом из строя ресурсов и т. д. [3].

В данной статье предлагается мультиагентный подход для адаптивного управления ресурсами ОАО "РЖД" в реальном времени, при котором план движения строится как динамическая сеть потребностей и возможностей поездов, станций, участков путей и других элементов. Дается краткое описание подхода и рассматривается архитектура мультиагентной системы адаптивного управления ресурсами ОАО "РЖД", логика мультиагентного планирования и протоколы взаимодействия агентов. Приводится пример построения и перепланирования расписания движения высокоскоростных поездов "Сапсан" на участке Москва — Санкт-Петербург.

Показывается, что предлагаемый подход позволяет при поступлении новых событий выявлять конфликты и адаптивно корректировать планы в режиме реального времени с учетом особенностей складывающейся ситуации.

1. Краткое описание подхода на основе сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей)

В предлагаемом подходе каждой потребности или возможности реального мира РЖД может быть поставлен в соответствие программный агент, способный действовать от лица и по поручению соответствующей потребности или возможности, в результате взаимодействия которых формируется ди-

намическая сеть потребностей и возможностей (ПВ-сеть) [4–5].

В мультиагентной системе управления ресурсами ОАО "РЖД" могут выделяться агенты станций, участков дорог, поездов, локомотивов, вагонов, машинистов и ряд других, предпочтения и ограничения которых должны быть учтены при планировании движения. Каждый из этих агентов может играть роль потребности или возможности: поезд может порождать потребность в перемещении между станциями, а также потребности в локомотиве и бригаде машинистов, станция — порождать потребность в маневровом локомотиве и т. д. Формирующееся агентами расписание — фактически, самоорганизующееся расписание поездов, станций и дорог — в каждый момент времени должно в той или иной мере отражать баланс интересов всех участников, чтобы предлагать диспетчерам обоснованные и допустимые решения, учитывающие требования к движению поездов, особенности инфраструктуры путей, принципы безопасности движения и большой ряд других факторов.

Взаимодействие между агентами ПВ-сети осуществляется с помощью метода сопряженных взаимодействий, который реализуется следующим образом [5]:

- фиксируется множество сопряженных (в общем случае, неоднородных) элементов системы (агентов), каждый из которых обладает определенными возможностями и потребностями в других ресурсах;
- описываются индивидуальные цели и критерии принятия решения всеми агентами, а также их предпочтения и ограничения;
- определяются правила и протоколы (регламенты) сопряженных взаимодействий между агентами, позволяющие выявлять конфликты и находить компромиссы между элементами при установлении связей;
- с помощью специальных инструментальных средств программирования разрабатывается мультиагентная система моделирования сопряженных взаимодействий;
- с помощью этой системы строится первоначальная сеть потребностей и возможностей (ПВ-сеть), определяющая соответствующее распределение ресурсов;
- если состояние ресурсов или потребности в них изменяются с приходом новых событий, то ПВ-сеть перестраивается с целью разрешить конфликты, причем только в той части, которая непосредственно связана с изменениями;
- решение считается найденным и расписание построенным, если попытки агентов улучшить ситуацию не приводят к дальнейшим улучшениям их состояний или истекло время на принятие решения.

При этом в предлагаемом подходе должна реализовываться как логика реакции на события, когда каждое событие (приход новой заявки на движение

поезда, задержка в пути, занятость участка дороги и т. д.) запускает цепочку адаптивных перепланирований заказов и ресурсов в системе (без полной перестройки расписания заново), так и проактивная оптимизация планов, позволяющая улучшать варианты, пока есть время для работы системы и принятия окончательных решений.

2. Описание архитектуры системы

Архитектура базовой мультиагентной системы адаптивного управления ресурсами ОАО "РЖД" представлена на рис. 1.

Ключевым модулем данной системы является адаптивный планировщик группы ресурсов (локомотивов, вагонов, станции, бригад и т. д.), реализующий мультиагентную технологию планирования с применением технологии баз знаний (онтологий). Для сложных систем несколько таких модулей могут объединяться посредством общей шины данных, формируя адаптивную p2p сеть планировщиков [6–7].

Модуль адаптивного планирования обрабатывает поток входных событий (заявок на провод пассажирских поездов или перевозку грузов, выходов из строя участков пути и пр.) и осуществляет динамическое адаптивное изменение созданного плана, а при необходимости взаимодействует с пользователями (или другими планировщиками) для согласования планов.

Модуль редактора онтологии позволяет создавать, редактировать общую онтологию планирования ресурсов РЖД, которая затем применяется в конструкторе сцен для описания начальной ситуации для планирования, отражающей состояния каждого объекта системы в заданный момент времени и отношения между ними.

Онтология планирования РЖД содержит базовые понятия РЖД (концепты), например, *Поезд*, *Вагон*, *Локомотив* и пр., а также их свойства, атрибуты и



Рис. 1. Архитектура базовой системы адаптивного планирования

отношения между ними, например, *Поезд перевозит Груз, Поезд проходит Участок* и т. д. Онтология позволяет по возможности отделить знания предметной области, используемые для планирования, от программного кода системы, что позволяет настраивать логику работы системы на специфику различных ресурсов без полного перепрограммирования системы. Конструктор онтологий должен также давать возможность описывать правила логики планирования (например, к какой платформе разрешается приходить поезду определенного класса и т. д.).

Модуль конструктора сцены ситуации дает возможность задать начальную конфигурацию ресурсов РЖД для планирования на основе справочников станций, оборудования, видов работ, локомотивов, бригад машинистов и рабочих и т. д.

Модуль моделирующей системы — инструмент для проведения моделирования ситуаций по принципу "Что, если?". В любой момент текущее состояние плана может быть выгружено в эту систему, чтобы затем промоделировать, что произойдет в случае того или иного события, например, в результате перекрытия участка пути ремонтными работами. При этом должна быть возможность посмотреть, что произойдет в случае без перепланирования, и сравнить этот результат с результатом, получаемым после перепланирования по поступившим событиям, чтобы оценить последствия развития ситуации.

Модуль распознавания ситуаций должен анализировать поток событий и результаты работы системы для распознавания первых признаков проблемных ситуаций, возникающих в ходе перевозочного процесса, и вырабатывать рекомендации диспетчерам на основе имеющейся предыстории и особенностей складывающейся ситуации.

Эволюционный конструктор — модуль, позволяющий выявлять "узкие места" транспортной сети дорог в ходе планирования и формировать предложения, устраняющие "узкие места" этой сети.

Поэтапная реализация данной архитектуры позволит решать задачи управления ресурсами РЖД возрастающей сложности.

3. Описание мира агентов и логики планирования

Рассмотрим состав и функции основных агентов системы, реализованных в первой версии мультиагентной системы адаптивного планирования возвратов высокоскоростных поездов "Сапсан" к расписанию в случае возникновения непредвиденных событий:

- **ManagerAgent** выполняет перехват событий, таких как приход нового требования планирования какого-либо действия (экземпляр концепта *IDemand*), выборка расписаний движущихся объектов *IMovingObject*, подлежащих перепланированию, активация перепланирования;
- **IMovingObjectDemandAgent** выполняет построение неконфликтного расписания для собственного

движущегося объекта *IMovingObject* (поезда, вагона, локомотива), перехват событий, связанных с изменением требования к расписанию движущихся объектов, расчет ключевых индикаторов (*KPI*) расписания, активацию перепланирования отдельных частей своего расписания. Цель агента — доставить поезд от станции отправления до станции назначения в заданный срок; ограничения — временные факторы, непредвиденные события, невозможность двух поездов одновременно находиться на одном блок-участке, учет ресурсов, необходимых для достижения целей;

- **InfrastructureElementBlockageAgent** выполняет создание экземпляра концепта временного слота *ITransition* для элемента инфраструктуры *InfrastructureElement* (блок-участок, стрелка, светофор) и обеспечение бесконфликтности с другими *ITransition*. Концепт *ITransition* описывает временной слот, т. е. начальный и конечный моменты времени пребывания движущегося объекта в некотором состоянии. Пример — интервал занятия поездом блок-участка, окно для проведения работ. Концепт осуществляет связку с предыдущим и последующим *ITransition*. Состоит из двух концептов *IState*, описывающих начальный и конечный моменты пребывания объекта в некотором состоянии, например, прибытие поезда на блок-участок и отбытие с него. Цель агента — выполнить работы на элементах инфраструктуры; ограничения — временные факторы, непредвиденные события, требуемые для выполнения ресурсы;
- **TransitionAgent** выполняет перехват событий, связанных с фактическими данными, с изменением реального времени, обработку "импульсов" от других *TransitionAgent*, инициализацию других *TransitionAgent*, сигнализацию о низком *KPI*. Ограничения — масса, длина, скорость поезда, невозможность движения по занятому блок-участку, интервал движения, временной слот связан с ресурсом.

В целом, расписание движения поездов в предлагаемом подходе представляет собой группу пар экземпляров концепта *ITransition*, соответствующих экземплярам концепта *IState*. Отсутствие конфликтов между *ITransition*, резервирующих один и тот же ресурс, обеспечивает метод *Pusher*. Выбор наиболее оптимального, с точки зрения *KPI*, маршрута осуществляет метод *SchedulePathFinder*. Отсутствие конфликтов между *ITransition* с точки зрения инфраструктуры обеспечивает метод *CloseUp*.

Потребность в доставке поезда по расписанию или потребность в выполнении окон ремонтных раскладывается на подпотребности, соответствующие строкам расписания. Агенты соответствующих потребностей взаимодействуют с агентами временных слотов, которые резервируют ресурсы. Агенты временных слотов в процессе переговоров проактивно ищут другие слоты, которые используют тот же самый ресурс. Если агенты временных слотов обна-

руживают конфликт, они должны разрешить его, для чего агент временного слота связывается с потребностью.

Общая логика работы мультиагентного планировщика состоит в следующем:

- создается диспетчер планировщика;
- затем создаются хранилища для подписки агентов на события, связанные с конкретными объектами или с любыми объектами конкретного класса, хранилища расписаний, хранилища связей между объектами;
- создается *ManagerAgent*;
- если в систему поступает *InfrastructureElementBlockageDemand*, то для него создается *ITransition* и поступает в сцену;
- если в систему поступает *IMovingObjectDemand*, то для него создается агент, который подписывается на события, связанные с изменением собственного *IMovingObjectDemand*, рассчитывает *KPI* расписания, перепланирует отдельные части своего расписания посредством методов *SchedulePathFinder* и *Pusher*;
- метод *SchedulePathFinder* реализует модифицированный алгоритм поиска кратчайшего пути в графе. При этом элементы инфраструктуры представляются ребрами графа, а стрелки — вершинами. Модификация заключается в том, что в качестве веса ребра принимается значение временного интервала прохождения по каждому ребру графа, представляющему *InfrastructureElement*, с учетом нахождения на нем других поездов или окон работ в некоторые временные интервалы, задаваемые *ITransition*, а также с учетом стоимости проезда по данному *InfrastructureElement*;
- при этом временные интервалы располагаются относительно друг друга посредством *Pusher*. Данный процесс называется упорядочиванием проезда поездов. В процессе упорядочивания также решается вопрос обгонов и ожиданий поездами друг друга на стрелках, что выражается в выставлении такого порядка проезда по выходной линии стрелки, который обеспечивает системе наибольший *KPI*. В процессе упорядочивания учитываются предыдущие порядки расположения *ITransition*, приоритеты поездов, их скорости, времена прибытия на следующую по пути стрелку, накопленное опоздание, фиксированность *IState*. Полученные порядки прохождения поездами *InfrastructureElement* создают дополнительную связь между *ITransition*, называемую логическим соседством, тогда как физическое соседство представляет собой связь между *ITransition*, смежными по инфраструктуре. В процессе построения расписания связи соседства, выстроенные на предыдущих шагах, сохраняются. Длительность планируемого *ITransition* изменяется в зависимости от отставания или опережения графика. Если агент запланированного *ITransition* определяет, что его временной ин-

тервал пересекается с временным интервалом *ITransition* окна работ, то он сдвигается сам или сдвигает окно, в зависимости от приоритетов и фиксированности отдельных *IState*, принадлежащих *ITransition*;

- после построения расписания по блок-участкам может возникнуть ситуация, когда физически соседние *ITransition* имеют смежные *IState* с разными временами. Для корректировки расписания в данном случае используется метод *CloseUp*, передвигающий *IState* с учетом физического и логического соседства;
- при приходе фактического *IState* фиксируются все предыдущие *IState* того же *IDemand*, рассчитывается отклонение фактического времени от планируемого. Осуществляется попытка выполнить план посредством ускорений или замедлений времен прохождения по следующим *InfrastructureElement*. Данный процесс, представляющий собой волну сдвигов в расписании, не нарушает соседство между *ITransition*.

Если после прихода факта или проактивно выявляется агент *IDemand*, недовольный своим положением, он подписывается у *ManagerAgent* на перепланирование, выявляет группу расписаний, связанных с данным *IDemand*, и активирует их перепланирование. Если после перепланирования состояние *IDemand* не улучшилось, ему запрещается подписываться на перепланирование в течение некоторого времени.

4. Протоколы взаимодействия между агентами

Рассмотрим протоколы взаимодействия между агентами, основанные на применении метода сопряженных взаимодействий для динамического планирования при выполнении нескольких произвольных заявок одним ресурсом, план которого выстраивается по мере поступления заявок в реальном времени. Заявкой (заказом) в данной предметной области является, например, *ITransition* окна работ (допускается согласованный перенос окон), ресурсом — блок-участок железнодорожных путей.

Рассмотрим пример, когда несколько требований уже разместились в расписании некоторого ресурса — Блок-участка (БУ) на соответствующих временных слотах: пассажирский поезд № 200, грузовой поезд № 500, Окно для проведения ремонтных работ и высокоскоростной поезд (ВСП) "Сапсан", имеющий наивысший приоритет (табл. 1, рис. 2).

Таблица 1

Требования по прохождению Блок-участка

Требования (<i>IDemand</i>)	Временные слоты (<i>ITransition</i>)
Поезд № 200 (проезд)	13:00—14:00
Поезд №500 (проезд)	13:30—15:00
Окно ремонтных работ	15:30—16:30
ВСП "Сапсан" (проезд)	17:00—17:30

Пусть в 13:00 приходит событие: поезд № 200 задерживается на станции до 15:15. Необходимо перепланирование расписания, чтобы требование о прохождении БУ поездом № 200 встало в расписании на 15:15. Агент поезда № 200 пытается встать на требуемое ему место в расписании и, как видно из рис. 3, сразу обнаруживает конфликт с агентом Окна с перекрытием на дельту D_1 , равную 45 мин (пунктир). Тогда агент поезда № 200 решает, не может ли он уйти от конфликта, сдвинувшись влево, но тут наталкивается на агента поезда № 500, при этом зона конфликта уменьшается до 30 мин (дельта D_2). Пусть поезд № 200, который уже опаздывает к этому моменту, может сдвинуться влево за счет того, что сократит стоянку на станции на 15 мин до 15:00 (рис. 3).

Теперь агент поезда № 200 решает, что делать дальше. Либо попросить агента поезда № 500 сдвинуться влево на дельту D_2 , либо попросить агента Окна сдвинуться вправо на ту же дельту D_2 , причем можно попробовать оба варианта последовательно, либо запустить эти опции параллельно. При этом "параллельность" будет состоять в том, чтобы не перебирать все варианты последовательно до конца, один за другим, а начать их исследовать все сразу, но постоянно сопоставлять прогресс и "обрывать" нити вариантов как можно быстрее, по мере того, как в ходе переговоров выявляются серьезные ограничения.

Пусть агент поезда № 200 работает в таком параллельном режиме и делает запросы одновременно к агенту поезда № 500 на подвижку влево и к агенту Окна на подвижку вправо на D_2 . Агент Окна рассматривает вариант своей подвижки вправо, но сразу обнаруживает, что сдвинуться вправо на D_2 не сможет, так как существует ограничение, что за 15 мин до прохода ВСП "Сапсан", т. е. в 16:45 БУ должен быть свободен. Агент Окна сообщает об этом агенту поезда № 200, чтобы тот мог сравнить варианты и решить, в каком направлении следует продолжать поиск вариантов. Пусть агент поезда № 500 со своей

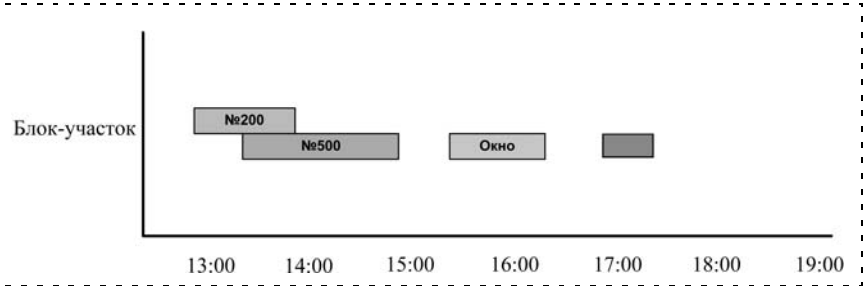


Рис. 2. Запланированное расписание Блок-участка

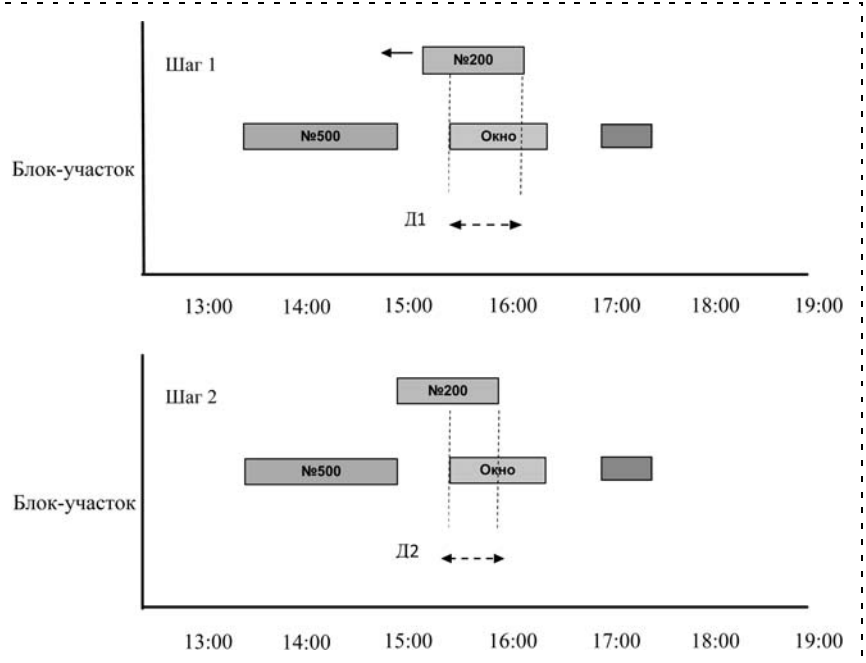


Рис. 3. Шаги 1 и 2: распространение волны переговоров при приходе нового требования: поезд № 200 меняет исходную постановку и уходит влево

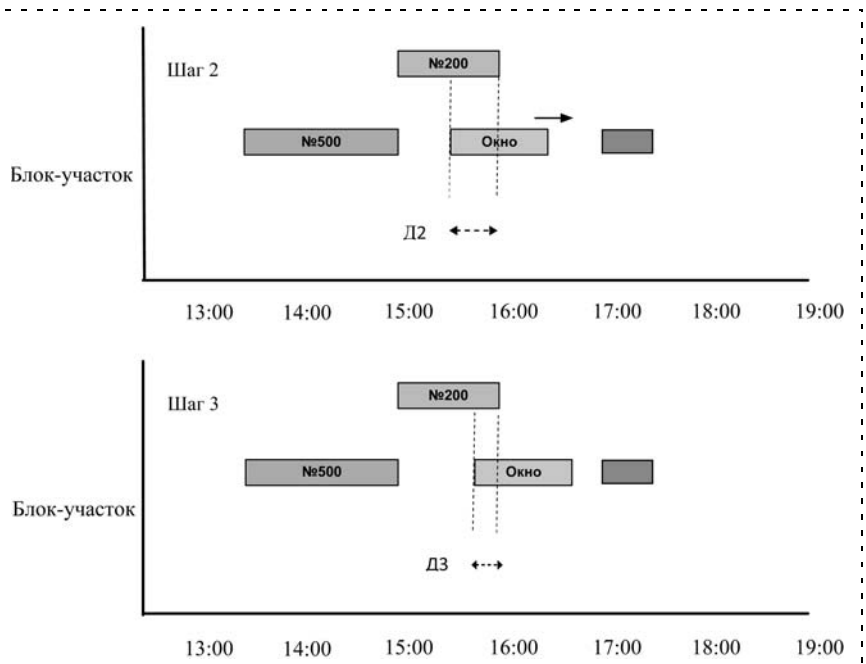


Рис. 4. Шаг 3: в результате дальнейших переговоров Окно уходит вправо

Запланированное расписание поездов по направлению

Станция	Поезд № 151 (Сапсан) прибытие/ отправление	Поезд № 6563 прибытие/ отправление
КЛИН	Нет/10.00	Нет/9.05
ПОДСОЛНЕЧНАЯ	10.09/10.09	9.30/9.30
ПОВАРОВО	10.11/10.11	9.40/9.43
КРЮКОВО	10.14/10.14	9.55/10.00
СХОДНЯ	10.20/10.20	10.15/10.21
ХИМКИ	10.25/10.25	10.35/10.35
ХОВРИНО	10.28/10.28	10.41/10.45
МОСКВА-ТОВАРНАЯ	10.33/10.33	11.00/11.00
МОСКВА-ПАСС.	10.38/Нет	11.10/Нет

стороны сообщает, что он готов двигаться влево, но на Д2 сдвинуться не может, так как в 13:00 поезд № 500 еще не будет готов к движению. Тогда агент поезда № 200 просит агента Окна сдвинуться вправо на дельту ДЗ, равную 15 мин. Агент Окна соглашается и уходит вправо на ДЗ (рис. 4). Далее агент поезда № 200 запрашивает агента поезда № 500, не может ли он сдвинуться влево на ДЗ, равную 15 мин. Поезд № 500 может начать движение в 13:15, т. е. на 15 мин раньше первоначально запланированного времени, о чем агент поезда № 500 сообщает агенту поезда № 200. Агент поезда № 200 просит агента поезда № 500 сдвинуться на ДЗ влево, агент поезда № 500 соглашается.

Когда процесс переговоров завершается согласием всех участников, т. е. решение задачи найдено, диспетчер завершает фазу планирования системы и дает команду агентам на переход к фазе исполнения, чтобы агенты могли исполнить намеченные планы и осуществить все подвижки. В результате проведенных переговоров и достигнутого согласия агент Окна сдвигается вправо на ДЗ, агент поезда № 500 сдвигается влево на ДЗ, т. е. агент поезда № 500 и агент Окна расступаются для предоставления агенту поезда № 200 возможности занять требуемое ему место, но это также требует от агента поезда № 200 сдвига влево на ДЗ (рис. 5, см. третью сторону обложки), чтобы выйти на БУ к 14:45.

В результате подвижек в расписании график движения ВСП "Сапсан" не нарушается.

Мультиагентный планировщик реализует различные способы разрешения конфликтов в реальном времени: выезд на встречный путь, обгон на стрелке, изменение скоростей прохождения БУ и длительности остановок, резервирование БУ согласно приоритетам поездов. За счет представления задачи в форме, близкой к естественной, логика принятия решений системы становится более прозрачной как для программистов, так и для пользователей, что позволяет встраивать большее число эвристик без увеличения сложности кода и уменьшает общее время разработки системы.

5. Пример адаптивного планирования расписания ВСП "Сапсан"

Рассмотрим направление железной дороги Москва — Санкт-Петербург, по которому перемещается ВСП "Сапсан". Данные о направлении: протяженность — 648 км, число путей — 2, 3 (на пригородных участках), в сутки планируется 14 поездов ВСП "Сапсан", 70...80 пар пассажирских поездов, порядка 10 грузовых поездов. В процессе движения могут возникнуть непредвиденные или конфликтные ситуации, которые приводят к задержке, причем задержка ВСП "Сапсан" свыше 5 мин считается критической. Задача состоит в том, чтобы в случае непредвиденных событий перепланировать движение ВСП "Сапсан" и других поездов таким обра-

зом, чтобы отклонение от графика движения ВСП "Сапсан" было минимальным.

Пусть согласно запланированному расписанию (табл. 2) ВСП "Сапсан" должен обогнать вышедший ранее поезд № 6563 на станции Сходня, как показано на рис. 6, а (см. третью сторону обложки).

Пусть в 10.05, после отправления со станции Крюково, агент поезда № 6563 сообщил о поломке поезда на перегоне между станциями Крюково и Сходня. Поезду пришлось снизить скорость движения до 5 км/ч, и он начал отставать от расписания, создавая помеху на пути следования ВСП "Сапсан". Вследствие этого мультиагентный планировщик, проведя предусмотренные протоколом переговоры между агентами, принимает решение перенаправить ВСП "Сапсан" по запасному пути на участке Крюково — Сходня, как показано на рис. 6, б (см. третью сторону обложки).

Заключение

В работе предложен мультиагентный подход для адаптивного управления ресурсами ОАО "РЖД" в реальном времени, при котором план движения пассажирских или грузовых поездов может гибко и оперативно перестраиваться в ответ на непредвиденные события, например, выход из строя участка путей.

Дано краткое описание подхода и рассмотрена архитектура мультиагентной системы адаптивного управления ресурсами ОАО "РЖД", логика мультиагентного планирования и схемы взаимодействия агентов. На примере перепланирования расписания движения высокоскоростных поездов "Сапсан" на участке Москва — Санкт-Петербург показывается, что предлагаемый подход позволяет при поступлении новых событий выявлять конфликты и адаптивно корректировать планы в режиме реального времени с учетом особенностей складывающейся ситуации.

Предлагаемая мультиагентная система адаптивного планирования ресурсов направлена на создание интеллектуальных систем управления движением РЖД, что является одним из актуальных и

значимых направлений развития автоматизированных систем управления железнодорожным транспортом будущего.

Авторы выражают благодарность Российскому Фонду Фундаментальных Исследований и Министерству науки и образования РФ, поддержавших разработки по созданию интеллектуальных систем управления железнодорожным транспортом в реальном времени по гранту РФФИ № 11-07-13119-офи-м-2011-РЖД и государственному контракту Минобрнауки РФ № 07.514.11.4094.

Список литературы

1. **Белая** книга ОАО "РЖД" / Документы РЖД. 2010. URL: http://doc.rzd.ru/doc/err403/doc?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&r_efererLayerId=5103&id=4038 (дата обращения 06.07.2012).
2. **Матюхин В. Г., Шаров В. А., Шабунин А. Б.** Управление железной дорогой онлайн // Пульс управления. 2012. № 1. URL: <http://pult.gudok.ru/archive/detail.php?ID=420035> (дата обращения 06.07.2012).
3. **Амелина Н., Лада А., Майоров И., Скобелев П., Царев А.** Исследование моделей организации грузовых перевозок с при-

менением мультиагентной системы для адаптивного планирования мобильных ресурсов в реальном времени // Проблемы управления. 2011. № 6. С. 31–37.

4. **Виттих В. А., Скобелев П. О.** Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и Телемеханика. 2003. № 1. С. 177–185.

5. **Виттих В. А., Скобелев П. О.** Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном времени // Автоматика. 2009. № 2. С. 78–87.

6. **Шабунин А. Б., Чехов А. В., Скобелев П. О., Кузнецов Н. А., Симонова Е. В., Бабанин И. О., Кожевников С. С., Степанов М. Е., Царев А. В., Сазуров С. В., Курбатов Е. В., Дмитриев Д. В.** Сетевый подход к созданию распределенных систем управления ресурсами ОАО "РЖД" на основе мультиагентных технологий // Тр. XIV междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах" ПУМСС'2012 / СНЦ РАН. Самара, 2012. С. 724–734.

7. **Шабунин А. Б., Чехов А. В., Сазуров С. В., Курбатов Е. В., Дмитриев Д. В., Кузнецов Н. А., Скобелев П. О., Бабанин И. О., Кожевников С. С., Симонова Е. В., Степанов М. Е., Царев А. В.** Разработка сетецентрического подхода к созданию интеграционной платформы и интеллектуальной системы управления ресурсами грузовых сортировочных станций в реальном времени // Тр. III Всерос. конф. с междунар. участием "Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения" УКИ'2012 / ИЛУ РАН. 2012. С. 1560–1572.

ИНФОРМАЦИЯ

XXVI Международная научная конференция

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ — ММТТ-26

Научная конференция ММТТ-26 проводится 24–26 апреля 2013 г. в Саратове на базе Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А., 27–30 мая 2013 г. в Н. Новгороде на базе Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева. Учредителями конференции ММТТ-26 являются Минобрнауки РФ, Институт вычислительной математики РАН, Институт гидродинамики АН Чехии, СГТУ, НГТУ, МГУИЭ, СПбГТИ (ТУ), КНИТУ, ТамбГТУ и ряд других ведущих вузов.

Председатель конференции – академик РАН Г. И. Марчук, сопредседатели Оргкомитетов – ректор СГТУ проф. И. Р. Плева, ректор НГТУ проф. С. М. Дмитриев; председатель Программного комитета – профессор А. А. Большаков (СГТУ).

Научная конференция ММТТ-26 проводится для обсуждения опыта использования математических методов в технике и технологии и современных направлений математического и компьютерного обеспечения технологических и технических систем.

НИЖЕГОРОДСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ММТТ-26

состоит из двенадцати секций:

1. Качественные и численные методы исследования дифференциальных и интегральных уравнений
2. Оптимизация и оптимальное управление технологическими процессами
3. Математическое моделирование технологических процессов
4. Математическое моделирование и проектирование инженерно-экологических систем
5. Математическое моделирование механических и машиностроительных процессов и систем
6. Компьютерная поддержка производственных процессов
7. Интеллектуальные системы в технике и технологиях
8. Математические методы и задачи в медицине и биофизике
9. Математические методы в экономике, менеджменте и гуманитарных науках
10. Математические методы в сельскохозяйственных науках и производстве
11. Информационные технологии в технике и образовании
12. Математическое моделирование информационно-измерительных и телеметрических систем

и трех секций ШМУ-18:

13. Интеллектуализация управляемых технологических процессов
14. Информатизация технических систем и процессов
15. Автоматизация технологических и производственных процессов

Официальный сайт конференции ММТТ-26 <http://mmtt26.sstu.ru>

УДК 621.865.8

С. Н. Григорьев, д-р техн. наук, проф., ректор,
rector@stankin.ru,

А. Г. Андреев, канд. техн. наук,
проректор по развитию,
andreev_ag@stankin.ru,

Московский государственный
технологический университет "СТАНКИН",

С. П. Ивановский, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
ivanovsky@stankin.ru,

Центр разработки электронных компонентов
и средств автоматизации машиностроительных
производств ГИЦ Московского государственного
технологического университета "СТАНКИН"

Современное состояние и перспективы развития промышленной робототехники

Дан обзор современного технического уровня промышленной робототехники, показано ее сегодняшнее место в мировом производстве и перспективы на будущее. Представлены стратегические направления исследований и планы ведущих европейских разработчиков промышленной робототехники.

Ключевые слова: промышленная робототехника, сварочный робот, окрасочный робот, сборочный робот, робот-сборщик, адаптивная производственная ячейка, автономное программирование, Стратегическая программа исследований

Место робототехники в мировом производстве

Наиболее полный обзор состояния мировой робототехники проводит Международная федерация робототехники (International Federation of Robotics — IFR, www.ifr.org). Согласно публикуемому ей ежегодному статистическому сборнику [1] за 2011 г. в мире будет продано рекордное число промышленных роботов — около 140 000 штук (рис. 1).

При этом более 81 тыс. всех купленных роботов (58 %) приходится на страны Азии — мировой промышленный центр. Следом по объему вложений в роботизацию идут США с 21 тыс. купленных за год роботов (15 %) и Германия с 15,5 тыс. (11 %). Остальные страны — далеко позади. Всего же в мировой промышленности сегодня работает более 1 млн роботов.

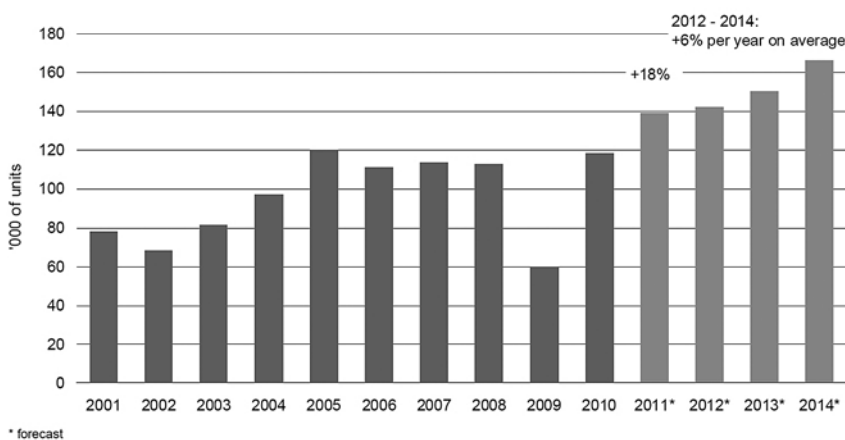
Более всего роботизирована промышленность Японии, Республики Корея и Германии, использующая в среднем от 250 до 300 роботов на 10 000 работников (рис. 2).

Среди отраслей промышленности наибольшая плотность роботизации отмечается в автомобилестроении. Лидирует здесь также Япония — 1400 роботов, далее следуют Италия, Германия и США — от 1100 до 1200 роботов на 10 000 работников отрасли.

Что касается применений роботов на производстве, то самыми популярными из них являются: перенос грузов (40 % роботов), сварка (28 % роботов), работа в чистых помещениях (14 % роботов). Остальные роботы занимаются сборкой, нанесением покрытий, механической обработкой и т. д.

Рост числа продаваемых в мире роботов свидетельствует о непрерывном расширении сферы их применения. Экономические трудности заставляют производителей перестраивать старые производства, расширяя номенклатуру выпускаемой продукции, используя новые материалы и технологии. И здесь все более привлекательными становятся технологические достоинства промышленных роботов — точность выполнения повторяющихся операций, простота перехода на другую задачу, небольшие вес и габаритные размеры.

Worldwide annual supply of industrial robots
2001 - 2014



Source: IFR World Robotics 2011

Рис. 1. Ежегодные продажи промышленных роботов в мире

Показательной иллюстрацией сказанного является авиастроение [2]. Сейчас здесь широко используется квалифицированный ручной труд, применяются громоздкие технологические установки, индивидуально спроектированные под конкретное изделие. Робот, в отличие от человека, гарантирует стабильное качество работы, ему для выполнения операции не требуются специальные кондукторы и сложный инструмент. Вместе с тем, работа можно легко переставить на другую рабочую позицию, изменив конфигурацию оборудования под новое изделие, что гораздо труднее проделать с многотонной порталной установкой. Так, по словам специалистов, свер-

лительный комплекс на базе универсальных роботов потребует на монтаж и наладку в четыре раза меньше времени, чем традиционная система.

Массовое применение новых материалов и технологий демонстрируют перспективные авиалайнеры Airbus 350 и Boeing 787, конструкция которых наполовину состоит из композитов. Организация производства для них множества композитных оболочек сложных форм и больших размеров требует создания гибкого, легко перенастраиваемого оборудования для автоматической выкладки композитов.

Подобное решение на базе универсального промышленного робота предлагает французская фирма Coriolis Composites (www.coriolis-composites.com), специализирующаяся на разработке технологии и оборудования для производства изделий из композитов. Комплекс предназначен для выкладки волокна на форму с помощью специальной выкладочной головки, перемещаемой роботом по поверхности формы (рис. 3).



Рис. 3. Роботизированный выкладочный комплекс (Coriolis Composites)

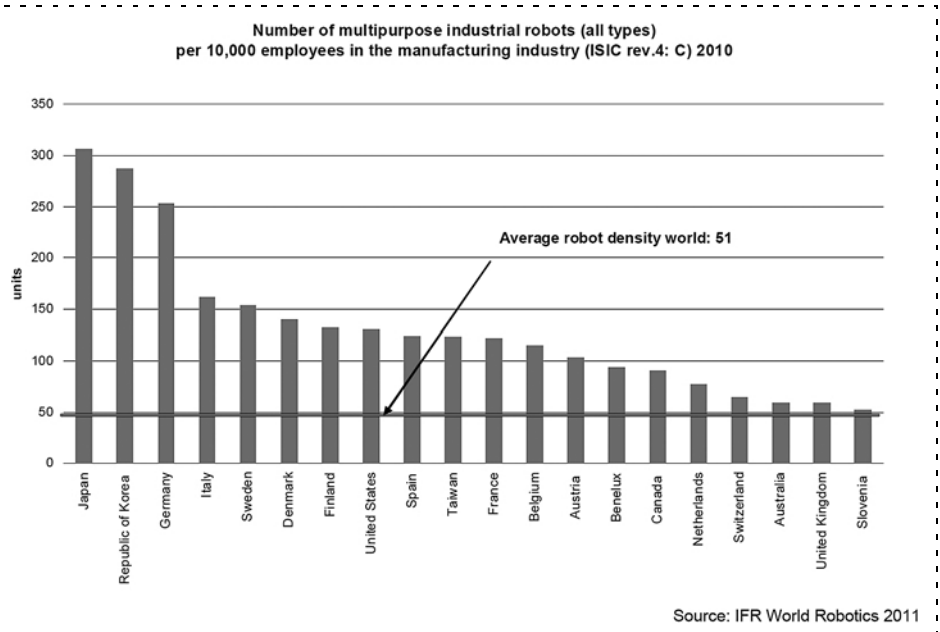


Рис. 2. Плотность роботизации по странам мира

Современный промышленный робот

Сегодня понятие "промышленный робот" в первую очередь ассоциируется с универсальным антропоморфным роботом-манипулятором — упрощенным кинематическим подобием человеческой руки (рис. 3). Роботы этого типа являются основными в линейках продукции почти всех мировых производителей (см. *Приложение Мировые производители промышленных роботов*). Универсальный робот-манипулятор имеет шесть управляемых осей подвижности и заканчивается фланцем для крепления технологического инструмента. Помимо осей манипулятора система управления современного робота способна синхронно управлять не менее чем двумя осями подвижности периферийных устройств, обеспечивающих удобное взаимное расположение манипулятора и объекта обработки.

Однако специфика различных применений промышленных роботов заставляет производителей идти на их технологическую специализацию. Так, наиболее массовая роботизируемая процедура — укладка изделий на поддоны и транспортеры — породила отдельный класс специальных роботов-укладчиков с упрощенной кинематикой (рис. 4). Подобные модели появились сейчас в каталогах фирм Fanuc, Hyundai, Kawasaki, Nachi-Fujikoshi, Yaskawa Electric, ABB, Comau, KUKA.

Робот-укладчик (palletizer) имеет всего четыре управляемые оси и может переориентировать переносимый груз только в горизонтальной плоскости, чего вполне достаточно для выполняемых им операций. Простота кинематики позволяет иметь одну систему управления сразу для нескольких роботов. Например, система управления DX100 (yaskawa electric) способна одновременно управлять восемью манипуляторами.



Рис. 4. Робот-укладчик Motoman MPK50 (Yaskawa Electric)



Рис. 5. Сварочный робот TB-1400 (Panasonic)

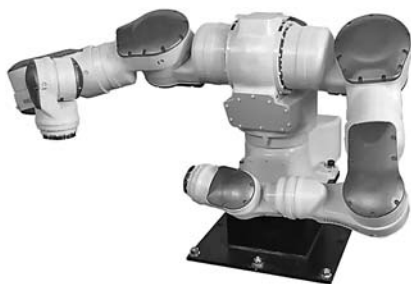


Рис. 6. Сборочный робот Motoman SDA20D (Yaskawa Electric)

Другая значительная область применения роботов, требующая специальных решений, — электродуговая сварка (arc welding). Канал подачи сварочной проволоки к газовому соплу допускает только ограниченную длину, большие радиусы изгиба, критичен к скручиванию. Громоздкое крепление сопла к фланцу универсального робота существенно снижает двигательные возможности манипулятора, затрудняя доступ к свариваемым стыкам. Все это заставило производителей роботов разработать специальную конструкцию запястья манипулятора, позволяющую пропускать коммуникации к инструменту сквозь последнее вращающееся сочленение (рис. 5). При этом механизм подачи проволоки вешается на рычаг предплечья с противоположной стороны от локтевого шарнира в качестве противовеса. Подобные сварочные роботы производят фирмы Fanuc, Nachi-Fujikoshi, OTC Daihen, Panasonic, Yaskawa Electric, ABB, Carl Cloos Schweisstechnik, Comau, KUKA. Роботы поставляются с интегрированным кабельным подводом через запястье, что существенно упрощает монтаж сварочного оборудования.

Сварочные роботы сегодня являются самыми адаптивными. В этом классе стандартными стали технологии поиска стыка касанием (touch sensing) и отслеживания стыка через дугу (through-arc tracking). Первая позволяет автоматически определять положение деталей, касаясь их концом сварочной проволоки до электрического контакта, вторая — отслеживать отклонение от свариваемого стыка по параметрам сварочной дуги. Эти технологии позволяют программировать сварочные операции полностью автономно, не прибегая к трудоемкой процедуре ручного обучения робота. Появляется также возможность сваривать элементы крупногабаритных конструкций, собранных с большими допусками.

Свои особенности имеют и роботы для окраски и напыления (painting). Небольшие технологические нагрузки позволяют использовать в таких роботах специальное полое запястье (hollow wrist). Как и в сварочных роботах, такое запястье имеет сквозной канал для прокладки коммуникаций к распылительной форсунке. При этом полое запястье компактно, герметично и не имеет выступающих частей, что позволяет легко защитить робот от брызг с помощью чехла. Роботов такой конструкции предлагают фирмы Fanuc, Kawasaki, ABB, Stäubli.

Среди разработок последних лет особо выделяются двурукие сборочные (assembly) роботы (рис. 6). Такие роботы производятся фирмой Yaskawa Electric, а фирма ABB представила недавно концепцию безопасного настольного двурукого робота FRIDA.

Каждая рука такого робота имеет семь степеней подвижности, полностью воспроизводя избыточные двигательные возможности руки человека. Дополнительная ось служит для поворота основания — торса робота. Благодаря своей конструкции робот может полностью копировать действия человека при выполнении достаточно сложной операции.

Предполагается, что такие роботы будут работать непосредственно по соседству с людьми, поэтому особое внимание в их конструкции уделено безопасности. Так, вся проводка к инструментам выполняется внутри рук, а снаружи руки робота не имеют острых и цепляющихся элементов. Программное обеспечение особо сфокусировано на исключении столкновений, ограничении скоростей и развиваемых усилий.

Одной из проблем, стоящих на пути роботизации, является высокая трудоемкость программирования робота с ручным обучением точек программной траектории. С увеличением числа роботов и номенклатуры выпускаемой продукции затраты на программирование часто становятся недопустимо большими. Выходом из положения могут стать системы автономного программирования (off-line programming, simulation) для роботов (рис. 7). Подобные системы предлагает сегодня большинство производителей роботов.

Такая система запускается на любом персональном компьютере и позволяет полностью создать и отладить программу для одного или нескольких роботов с использованием трехмерной компьютерной модели комплекса. Моделирование позволяет отследить столкновения, проверить достижимость точек траектории, оптимизировать параметры отработки программы. Для таких больших классов задач, как укладка грузов, напыление покрытий и электродуговая сварка такой подготовки программы оказывается вполне достаточно. Даже для сложных применений компьютерное моделирование процесса позволяет проделать существенную часть работы предварительно.

Особое внимание в современной промышленной робототехнике уделяется безопасности. Действующие требования безопасности для промышленных роботов определяются международным стандартом ISO 10218 (Robots and robotic devices — Safety requirements for industrial robots), последняя редакция которого опубликована в июле 2011 г. [3]. Первая часть стандарта касается роботов, вторая — робототехнических систем и вопросов интеграции. В дополнение к стандарту готовится техническая спецификация TS 15066, призванная оказать помощь в организации взаимодействия робота с человеком и оценке возможных опасностей.

Направления исследований

Интересно посмотреть, какие задачи ставят перед собой робототехники Европы, обеспокоенные

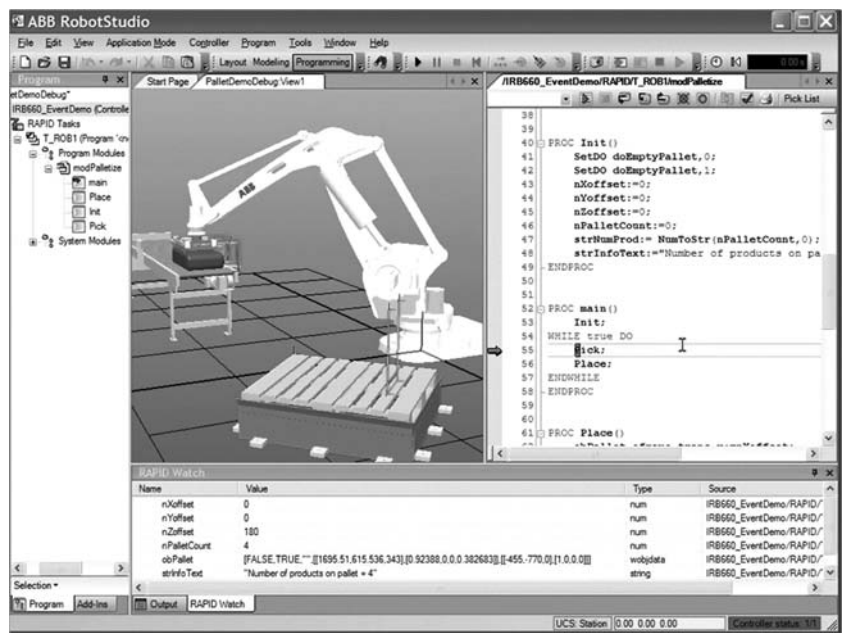


Рис. 7. Система автономного программирования RobotStudio (ABB)

необходимостью повышения конкурентоспособности своей продукции. Их совместное видение будущего представлено в документе "Видение робототехники до 2020 и далее — Стратегическая программа исследований для робототехники в Европе" [4]. Эту программу с 2006 г. разрабатывает и дополняет Европейская робототехническая технологическая платформа (European Robotics Technology Platform — EUROP, www.robotics-platform.eu) — структура, организующая взаимодействие исследователей и разработчиков робототехники в рамках Евросоюза. В области промышленной робототехники программа предлагает разработчикам решить к 2020 г. следующие задачи:

- развить решения с увеличением зоны обслуживания робота за счет дополнительной транспортной системы (авиастроение, судостроение, строительство). Увеличить точность установки робота на позицию до 0,1 мм за счет внутрицеховой системы глобального позиционирования. Синхронизировать работу нескольких роботов на одной транспортной системе;
- развить решения для сложных технологических процессов (сварка, пайка, склеивание, резка, сверление, фрезерование, шлифование). Объединить управление технологическим процессом, траекторией и контроль качества в одной системе. Создать инструментарий для автоматического планирования стратегии, траектории и технологического процесса;
- развить адаптивные многофункциональные производственные ячейки с совместной работой нескольких роботов. Реализовать полуавтоматическое и автоматическое программирование взаимодействия роботов. Обеспечить автоматическую реконфигурацию ячейки;

- развить человекоподобные сборочные роботы с трехмерным зрением. Обеспечить работу податливыми многопальцевыми схватами, захват мягких деталей, планирование захвата;
- развить концепцию робота-соратника, выполняющего технологическую операцию совместно с человеком. Обеспечить интуитивное взаимодействие с роботом, обеспечить пассивную податливость руки, реализовать алгоритмы оценки и предсказания ситуаций для исключения критических ситуаций.

Выводы

Приведенные данные однозначно показывают, что промышленная робототехника стала неотъемлемой частью современного производства [5–8]. Рост во всем мире продаж новых роботов говорит о постоянно растущем интересе к роботизации со стороны промышленности. Неизбежная перестройка старых производств, появление новых технологий постоянно открывают для промышленной робототехники все новые сферы применения.

Вместе с тем, роботы становятся проще и удобнее в использовании. Специализация роботов позволяет потребителю найти наиболее подходящее для своей задачи решение.

В планах разработчиков — дальнейшее увеличение мобильности, безопасности, адаптивности, простоты интеграции и использования роботов [9–14]. Все это позволяет надеяться на то, что и в будущем интерес к промышленной робототехнике будет только возрастать.

Приложение

Мировые производители промышленных роботов

Азия

Fanuc, Япония (www.fanuc.co.jp, www.fanucrobotics.ru)
 Hyundai Heavy Industries, Республика Корея (www.hyundai-engine.com)
 Kawasaki Heavy Industries, Япония (www.khi.co.jp/english/)
 Mitsubishi Electric, Япония (www.mitsubishi-automation.com)
 Nachi-Fujikoshi, Япония (www.nachirobotics.com)
 OTC Daihen, Япония (www.otc-daihen.de)
 Panasonic, Япония (industrial.panasonic.com)
 Seiko Epson, Япония (www.epson.jp/e/products/fa/)
 Yaskawa Electric, Япония (www.motoman.com)

Европа

ABB, Швейцария (www.abb.com)
 Carl Cloos Schweisstechnik, Германия (www.cloos.de)
 Comau, Италия (www.comau.com)
 KUKA, Германия (www.kuka.com)
 Stäubli, Швейцария (www.staubli.com)

Америка

Adept Technology, США (www.adept.com)

Список литературы

1. World Robotics 2011 — Industrial Robots. URL: www.worldrobotics.org
2. High Flying Robots. Assembly magazine. May, 2009. URL: www.assemblymag.com/Archives
3. IFR press release — Standardisation Activities Prepare for Future Safe Human-Robot-Collaboration. URL: www.ifr.org/news/ifr-press-release
4. Robotic Visions to 2020 and beyond — The Strategic Research Agenda for Robotics in Europe, 07/2009. URL: www.robotics-platform.eu
5. Григорьев С. Н. Тенденции и проблемы модернизации машиностроительного производства на базе отечественного станкостроения // Вестник МГТУ Станкин, 2010. № 3. С. 7—13.
6. Григорьев С. Н., Кутин А. А., Схиртладзе А. Г. Подготовка технологов для модернизации машиностроительного комплекса России // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 5. С. 18—20.
7. Подураев Ю. В. Технологические роботы с контурным силовым управлением для операций механообработки // Вестник машиностроения. 1993. № 8. С. 14.
8. Андреев А. Г., Григорьев С. Н. Построение компьютерных систем программного управления мехатронными устройствами по модульному принципу // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 10. С. 8.
9. Ермолов И. Л. Повышение автономности мобильных роботов как важнейшее направление развития современной робототехники // Вестник МГТУ Станкин. 2010. № 2. С. 121—127.
10. Ермолов И. Л. Автономность мобильных роботов, ее сравнительные меры и пути повышения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 6. С. 23—29.
11. Григорьев С. Н., Мартинов Г. М. Концепция построения базовой системы числового программного управления мехатронными объектами // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2011. № 2. С. 21—27.
12. Текшева И. В., Цой Дуньюз, Подураев Ю. В., Карлов К. Р., Ермолов И. Л. Особенности использования нечетких моделей в задачах управления движением мехатронных объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 10. С. 30—34.
13. Зеленский А. А., Подураев Ю. В., Бондарь Д. В. Способ повышения точности интерполяции сложного контура для мехатронных модулей и промышленных роботов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 9. С. 44—48.
14. Зеленский А. А., Бондарь Д. В., Валюкевич В. А. Способ формирования траектории перемещения рабочего инструмента для цифровых систем управления промышленными роботами // Успехи современной радиоэлектроники. Зарубежная радиоэлектроника. 2011. № 9. С. 77—80.

Ф. Н. Притыкин, д-р техн. наук, доц.,
pritykin@mail.ru,

Е. А. Чукавов, аспирант,
chuk_evgeniy@mail.ru,

Омский государственный технический университет

Анализ показателей маневренности механизмов манипуляторов, имеющих различную структуру моделей кинематических цепей

Рассмотрены количественные оценки показателей маневренности пространственных механизмов манипуляторов при наличии двигательной избыточности. Исследовано влияние кинематической структуры и геометрических параметров механизмов манипуляторов на показатели маневренности при виртуальном моделировании движений по вектору скоростей.

Ключевые слова: виртуальное моделирование движений роботов, пространственные механизмы манипуляторов, двигательная избыточность при синтезе движений по вектору скоростей, показатели маневренности манипуляторов

Введение

В различных областях деятельности человека широкое применение получили адаптивные роботы. Данные роботы имеют в качестве исполнительного устройства многосвязные манипуляторы с избыточностью в степенях свободы, позволяющие осуществлять выполнение различных операций в условиях неоднородного, организованного рабочего пространства. При разработке конструктивных особенностей исполнительных механизмов подвижных рук в указанных робототехнических системах существует необходимость в решении ряда геометрических задач, связанных с моделированием процессов управления движением. Одной из центральных проблем, возникающих при разработке адаптивных роботов, является обоснование различных конструкций исполнительных механизмов и анализ их

функциональных и двигательных возможностей. Двигательные возможности с определенными допущениями оцениваются средствами виртуального моделирования с использованием компьютерной графики [1, 2]. Одним из параметров, описывающих указанные функциональные возможности манипуляторов, является маневренность, характеризующая подвижность механизма при неподвижном захвате [3, 4]. В работах [3, 5–6] приведены методы определения количественных оценок маневренности при наличии двигательной избыточности незамкнутых механизмов манипуляторов, движения которых моделируются с использованием метода построения движений по вектору скоростей. Однако в указанных работах не исследована маневренность в зависимости от кинематической структуры незамкнутых пространственных механизмов манипуляторов.

Задание геометрических моделей механизмов подвижных рук робототехнических систем

На рис. 1, 2 изображены кинематические схемы механизмов подвижных рук робототехнических систем, имеющих различную структуру моделей кинематических цепей. Робототехнические системы обеспечивают перемещения объектов манипулирования с использованием адаптивной, интеллектуальной системы управления. Движение объектов манипулирования обеспечивается изменением обобщенных координат φ_j . Оси вращательных кинематических пар пятого класса на рис. 2, а изображены в виде прямых a_1, a_2, \dots, a_7 . При этом оси a_1, a_3, a_5 и a_7 на рис. 2, б проецируются в точки. Пространственные механизмы манипуляторов, изображенные на рис. 1, 2, имеют, соответственно, четыре и семь степеней подвижности. Условимся незамкнутые механизмы обозначать МЗ-2-3-2, МЗ-2-6-2 и т. д. Числа обозначений задают, соответственно, порядок кодов используемых преобразований систем координат при задании геометрических моделей механизмов роботов, принятый в работах [1, 2]. Положение узловых точек и начал систем координат O_k , связанных со звеньями механизма робототехниче-

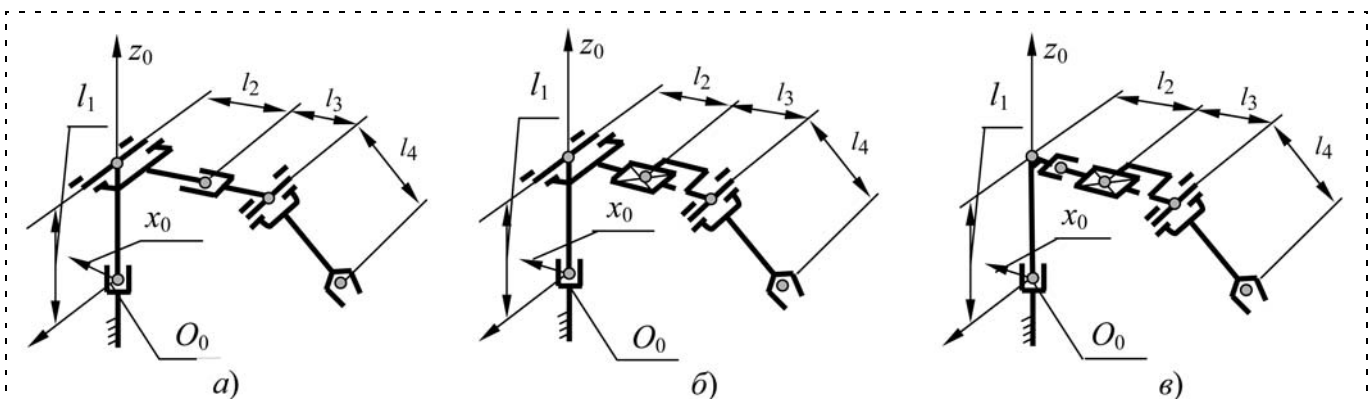


Рис. 1. Изображение кинематических схем механизмов:
а — МЗ-2-3-2; б — МЗ-2-6-2; в — МЗ-8-3-6-2

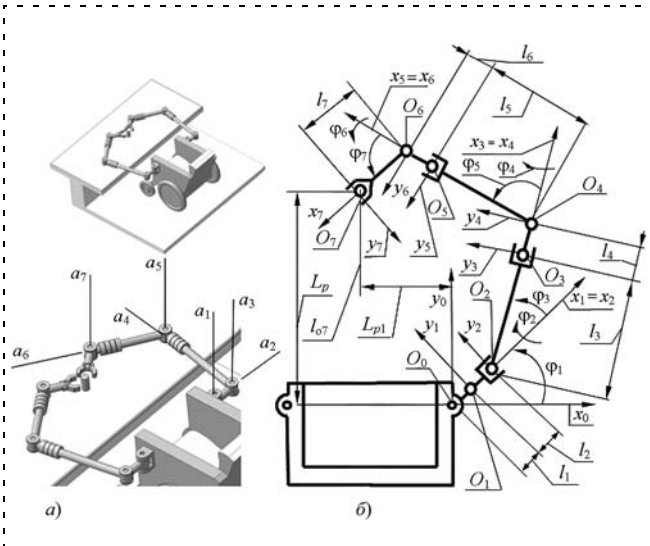


Рис. 2. Изображение механизма М3-1-3-1-3-1-3 подвижной руки инвалидной коляски:
a — положения осей a_1 — a_7 вращений кинематических пар; *b* — кинематическая схема подвижной руки и системы координат, связанные со звеньями механизма

Таблица 1

Значения массивов, определяющих геометрическую модель механизмов М3-2-3-2, М3-2-6-2 и М3-8-3-6-2, осуществляющих движение выходного звена подвижной руки

М3-2-3-2					
№ преобразований систем координат	1	2	3	4	
$\varphi_i, ^\circ$	45	50	45	50	
$l_k, \text{см}$	0	20	0	20	
$l_{sm}, \text{см}$	20	0	20	0	
n_{kod}	3	2	3	2	
М3-2-6-2					
№ преобразований систем координат	1	2	3	4	
$\varphi_i, ^\circ$	45	50	20	50	
$l_k, \text{см}$	0	20	0	20	
$l_{sm}, \text{см}$	20	0	0	0	
n_{kod}	3	2	6	2	
М3-8-3-6-2					
№ преобразований систем координат	1	2	3	4	5
$\varphi_i, ^\circ$	45	0	45	20	50
$l_k, \text{см}$	0	0	0	0	20
$l_{sm}, \text{см}$	20	85	20	0	0
n_{kod}	3	8	3	6	2

Значения массивов, определяющих геометрическую модель механизма М3-1-3-1-3-1-3, осуществляющих движение выходного звена подвижной руки

М3-1-3-1-3-1-3							
№ преобразований систем координат	1	2	3	4	5	6	7
$\varphi_i, ^\circ$ (конфигурация № 1)	70	0,1	32	0,1	13	0,1	32
$\varphi_i, ^\circ$ (конфигурация № 2)	50	0,1	25	0,1	115	0,1	48
$l_k, \text{см}$	$l_1 = 1$	0	$l_3 = 35$	0	$l_5 = 35$	0	$l_7 = 10$
$l_{sm}, \text{см}$	0	$l_2 = 1$	0	$l_4 = 1$	0	$l_6 = 1$	0
n_{kod}	3	1	3	1	3	1	3

Таблица 2

ской системы, определяют матрицы $\mathbf{M}_{0,1}, \mathbf{M}_{0,2}, \dots, \mathbf{M}_{0, nm}$ размерности 4×4 [3, 4]. Параметр mn определяет число систем O_1, O_2, \dots, O_{nm} , используемых при задании геометрической модели механизма манипулятора. Для расчета элементов матриц $\mathbf{M}_{k-1, k}$ используют массивы φ_i, l_k, l_{sm} и n_{kod} [2]. Указанные массивы задают, соответственно, значения обобщенных координат φ_i , длины звеньев механизмов l_k , смещения вдоль осей систем координат l_{sm} , неподвижно связанных со звеньями механизма, и коды преобразований систем координат n_{kod} . Для механизмов, изображенных на рис. 1, 2, геометрические модели кинематических цепей подвижных рук будут определять значения массивов, заданных в табл. 1, 2. Механизмы М3-2-3-2-2, М3-2-6-2-2 и М3-8-3-6-2-2 получены добавлением к указанным ранее механизмам (см. рис. 1) одного звена с использованием кинематической пары, код которой равен двум.

Вычисление количественных оценок показателей маневренности манипуляторов

Исследуем значения параметров маневренности незамкнутых пространственных механизмов манипуляторов, определяемые в соответствии с заданной линейной системой уравнений, задающей взаимосвязь обобщенных скоростей со скоростями выходного звена манипулятора [3]. Условимся размерности вектора обобщенных скоростей $\mathbf{Q}(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$ и вектора скоростей выходного звена $\mathbf{V}(V_x, V_y, V_z, \dots)$ задавать соответственно параметрами n и r . В n -мерном пространстве обобщенных скоростей Q_n для случая, когда $r < n$, указанная линейная система уравнений определяет p -плоскость Γ , размерность которой равна $p = n - r$ [7]. Степень двигательной избыточности при синтезе движений манипулятора при этом задает параметр p . Для однозначности установления отображения $\mathbf{V} = f(\mathbf{Q})$ в работе использован известный критерий, основанный на минимизации квадратичного функционала объема движения [3]. В соответствии с этим критерием в p -плоскости Γ при $p \geq 1$ для значения вектора \mathbf{V} однозначно определяется точка $M^Q \in \Gamma$, имеющая наименьшее удаление от начала координат O^Q n -мерного пространства Q_n . Здесь и в дальнейшем верхний индекс Q означает принадлежность точек n -мерному пространству Q_n . Для задания по-

ложения произвольной точки N^Q в p -плоскости Γ используется p -мерный репер с началом, совпадающим с точкой M^Q . Орты $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2, \dots, \mathbf{Q}_p$, задающие направления осей этого репера в пространстве Q_n , определяются коэффициентами уравнений p гиперплоскостей $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_p$, перпендикулярных гиперплоскостям, определяемым системой линейных уравнений, и проходящих через начало координат O^Q . Мгновенные состояния механизма манипулятора задает точка $N^Q \in \Gamma$, которая определяется векторным уравнением [3]

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_M + \sum_{i=1}^p k_i m \mathbf{Q}_i, \quad (1)$$

где \mathbf{Q}_M — вектор, задающий точку $M^Q \in \Gamma$; k_1, k_2, \dots, k_p — координаты точки N^Q в p -плоскости Γ ; m — единичный отрезок репера p -плоскости Γ ($i = \overline{1, p}$). Обозначим величину, которая определяет точное число конфигураций (число точек N^Q из области $Q^\delta \in \Gamma$ многомерного пространства Q_n) параметром K_i [5, 6]. Область Q^δ задает точки, удовлетворяющие заданным погрешностям реализаций δ . В работе при проведении исследований значение параметра δ для механизмов принято $\delta \leq 3$ см. Данное значение, как правило, обеспечивает перемещение объектов манипулирования роботом с заданным отклонением от заданной траектории выходного звена.

Направление вектора \mathbf{V} при проведении исследований принято параллельным оси O_0Y_0 неподвижной системы координат. Размерность указанного вектора в работе равна трем, т. е. ориентация выходного звена при синтезе движений не учитывается. При этом $V_x = 0, V_y = 3$ см/с, $V_z = 0$. Количественные оценки маневренности будем вычислять по следующим зависимостям [5, 6]:

$$Q^{ob} = \sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i; \quad Q_n^{ob} = \left(\sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i \right) / n; \quad \lambda_i = Q^{ob} / K_i, \quad (2)$$

$$Q_{mn}^{xyz} = \left(\sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^{mn} (x_{ji}^{\max} - x_{ji}^{\min}) \right) / m_n; \quad \mu = Q_{mn}^{xyz} / \sum_{i=1}^{mn} l_i \quad (3)$$

Параметр Q_n^{ob} определяет средний объем движения, приходящийся на одну степень подвижности. Данный параметр вычисляется при реализации значений векторов \mathbf{Q} (1) из области Q^δ . Реализации находятся из соотношений $\varphi_i^H = \varphi_i + \varphi_i^*$, где φ_i^H — новые значения обобщенных координат, $\varphi_i^* \approx \Delta\varphi_i$ — компоненты вектора \mathbf{Q} , $\Delta\varphi_i$ — разность максимальных и минимальных значений обобщенных координат для множества K_i . Заметим, что единицей изме-

рения параметра Q_n^{ob} в работе приняты сантиметры и градусы, т. е. сумма поступательных смещений в кинематических парах измеряется в сантиметрах, а угловых вращений — в градусах. Значение параметра λ_i отражает удельное изменение объема движения, приходящееся на одну конфигурацию множества K_i . Параметр Q_{mn}^{xyz} характеризует способность изменять положение узловых точек механизма робота вдоль осей неподвижной системы координат O_0 ; $x_{ji}^{\max}, x_{ji}^{\min}$ — максимальные и минимальные значения координат узловых точек механизма манипулятора в системе O_0 при реализации значений векторов (1) из области Q^δ ; j — номер координаты в системе O_0 ($1 \leq j \leq 3$); i — номер узловой точки механизма манипулятора. Параметр μ характеризует среднее смещение узловых точек с учетом суммарной длины звеньев механизма. Параметр m_n задает число узловых точек механизма манипулятора, которое равно числу матриц, используемых при задании геометрической модели механизма робота [2].

Результаты расчета показателей маневренности манипуляторов, имеющих различную структуру моделей кинематических цепей

Механизмы МЗ-2-3-2, МЗ-2-6-2 и МЗ-8-3-6-2, изображенные на рис. 1, имеют степень двигательной избыточности, равную одному, а механизмы МЗ-2-3-2-2, МЗ-2-6-2-2, МЗ-8-3-6-2-2 и МЗ-1-3-1-3-1-3 — двум и четырем, соответственно. Анализ реализаций мгновенных состояний показал, что значения параметров $Q^{ob}, Q_n^{ob}, Q_{mn}^{xyz}$ в значительной степени не зависят от ориентации вектора скоростей выходного звена \mathbf{V} при значениях $5 \leq \varphi_i \leq 175$. На рис. 3, а–в представлены графики функции, отражающие влияние длин звеньев манипулятора на значения параметра Q^{ob} для механизмов МЗ-2-3-2, МЗ-2-6-2, МЗ-8-3-6-2, МЗ-2-3-2-2, МЗ-2-6-2-2 и МЗ-8-3-6-2-2. Из анализа графиков видно, что с увеличением длин звеньев механизмов показатели маневренности манипуляторов снижаются.

В табл. 3 приведены значения показателей маневренности для механизмов манипуляторов, имеющих различную структуру кинематических цепей. Для механизмов манипуляторов МЗ-2-3-2, МЗ-2-6-2, МЗ-8-3-6-2, МЗ-2-3-2-2, МЗ-2-6-2-2 и МЗ-8-3-6-2-2 приведены максимальные и минимальные значения параметров маневренности при изменении длин звеньев от 20 до 120 см. Параметры маневренности механизма МЗ-1-3-1-3-1-3 рассчитаны для конфигурации № 1. Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 3, показывает, что наибольшие значения показателей маневренности имеют механизмы МЗ-2-3-2-2 и МЗ-8-3-6-2-2. Механизмы с поступательными кинематическими парами имеют

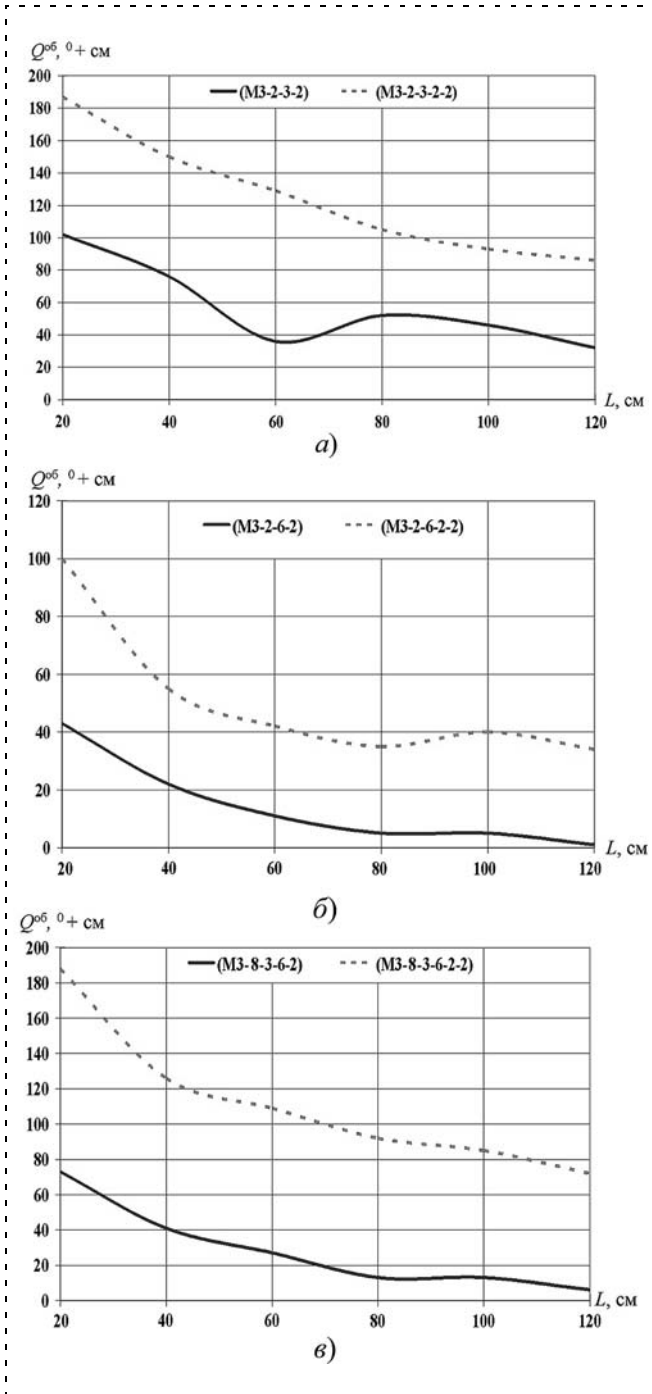


Рис. 3. Графики функции $Q^{об} = f(L)$ для механизмов:
 а — М3-2-3-2, М3-2-3-2-2; б — М3-2-6-2, М3-2-6-2-2;
 в — М3-8-3-6-2, М3-8-3-6-2-2

показатели маневренности, более низкие по сравнению с механизмами, где используются только вращательные кинематические пары. Анализ значений параметра λ_i , представленных в табл. 3, показывает необходимость изменения длины единичного отрезка m соотношения (1) для различных механизмов роботов при синтезе движений по вектору скоростей. На рис. 4, 5 представлены реализации значений векторов Q на горизонтальной и фронтальной проекциях для механизмов М3-2-3-2 при $l_i = 20$ см, механизма М3-8-3-6-2-2 при $l_i = 120$ см и механизма М3-1-3-1-3-1-3.

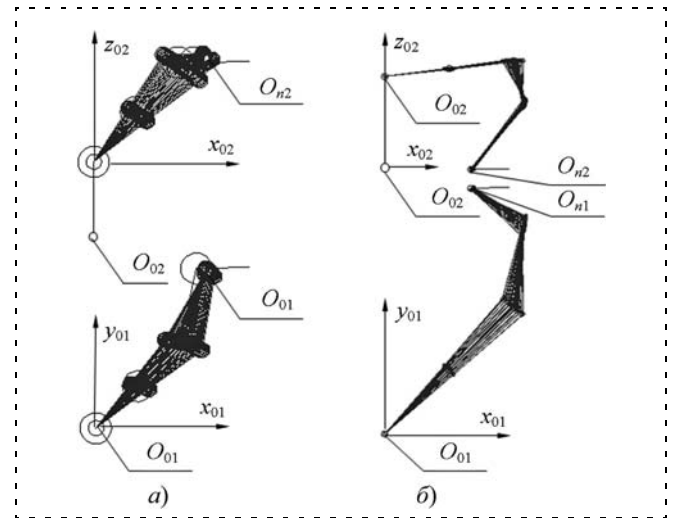


Рис. 4. Реализации значений векторов Q :
 а — для механизма М3-2-3-2 при $l_i = 20$ см; б — механизма М3-8-3-6-2-2 при $l_i = 120$ см

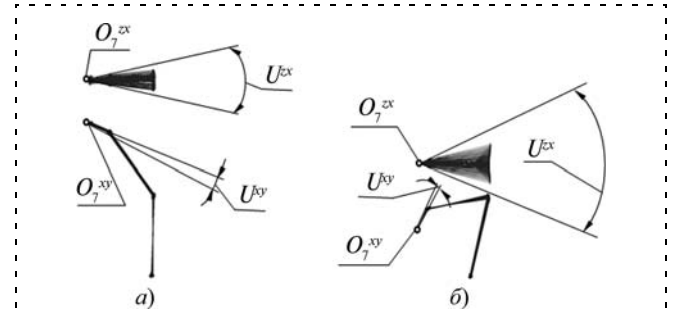


Рис. 5. Изображения проекций углов U_s , образованных схватителем механизма М3-1-3-1-3-1-3:
 а — конфигурация № 1; б — конфигурация № 2

Таблица 3

Значения параметров, характеризующих маневренность для механизмов, имеющих различные модели кинематических цепей

Обозначение механизма	K_i	$Q_n^{об}, ^\circ + \text{см}$	$\lambda_i, ^\circ + \text{см}$	$Q_{mn}^{xyz}, \text{см}$	μ
М3-2-3-2	13...37	8...25	2,47...2,7	9...18	0,09...0,46
М3-2-3-2-2	90...315	17...37	0,59...0,86	13,8...34	0,35...0,86
М3-2-6-2	1...17	0,25...1,1	1,29...2,51	2,5...4,5	0,02...0,22
М3-2-6-2-2	13...53	6,8...20	1,9...2,91	7...13,4	0,11...0,35
М3-8-3-6-2	3...23	1,5...18	1,89...3,17	1,8...4,4	0,06...0,21
М3-8-3-6-2-2	37...219	14...37	0,86...1,98	12,1...22,5	0,18...0,6
М3-1-3-1-3-1-3, конфигурация № 1	8561	27	0,03	9	0,75

На рис. 5 представлены изображения проекций телесного угла U_S на трех плоскостях проекций [5]. Множество отдельных положений оси O_7x_7 схватоносителя при заданной точности позиционирования центра выходного звена определит при этом телесный угол, который обозначим U_S . Угол U_S при этом образуется конической поверхностью, проходящей через отдельные крайние положения оси O_7x_7 схватоносителя (рис. 5, а, б). Эти положения получаются реализацией множества значений вектора \mathbf{Q} (1), которые удовлетворяют заданному значению δ . Критерий, определяемый телесным углом U_S , будет в этом случае иметь существенное отличие от

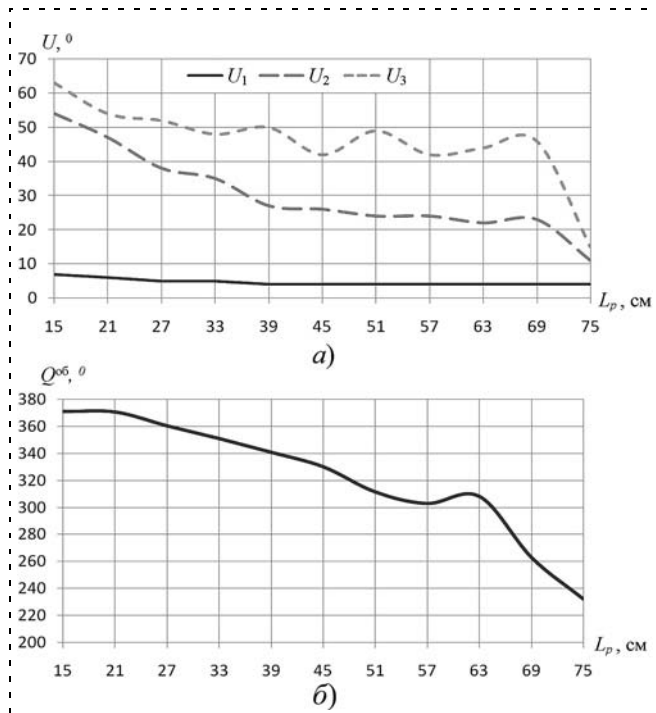


Рис. 6. Графики-функции для механизма МЗ-1-3-1-3-1-3, отражающие: а — $U_1 = f(L_p)$, $U_2 = f(L_p)$, $U_3 = f(L_p)$; б — $Q^{об} = f(L_p)$

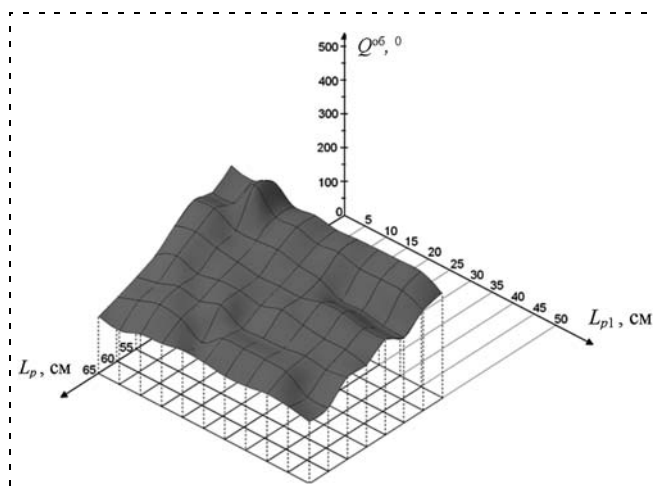


Рис. 7. График-функция $Q^{об} = f(L_p, L_{p1})$

угла сервиса в силу неизбежных погрешностей реализации. На рис. 5, а, б представлены изображения проекций U^{zx} и U^{xy} угла U_S и положения продольной оси схватоносителя при реализации мгновенных состояний. На рис. 5 изображена совокупность конфигураций, полученных реализацией значений векторов \mathbf{Q} для первой и второй конфигураций, заданных соответствующими значениями обобщенных координат в табл. 2. На рис. 5 точки O_7^{xy} и O_7 , соответственно, определяют горизонтальную и фронтальную проекцию точки O_7 . На рис. 6, а представлены графики изменения значений проекций $U^{zx} = U_1$, $U^{xy} = U_2$ и $U^{zy} = U_3$ угла U_S на горизонтальной, фронтальной и профильной проекциях в зависимости от длины L_p (см. рис. 2, б). Длина L_p задает удаление центра захвата от оси O_0x_0 . При этом исследованы конфигурации, при которых центр захвата, заданный точкой O_7 , находится на прямой $l_{o7} \perp x_0$, $O_7 \in l_{o7}$, располагающейся на середине транспортной тележки. Соответственно на рис. 6, б представлен график изменения параметра $Q^{об}$ от длины L_p . На рис. 7 показана зависимость $Q^{об} = f(L_p, L_{p1})$ значения параметра $Q^{об}$ от L_p и L_{p1} , определяющих положение центра выходного звена в горизонтальной плоскости $O_7 \in \Delta$. Представленные графики отражают закономерность снижения маневренности робототехнической системы при удалении захватного устройства от транспортной тележки.

Проведенные исследования указывают на существование особых точек в конфигурационном пространстве, в которых происходит снижение показателей маневренности.

Список литературы

1. Притыкин Ф. Н. Геометрически обоснованные принципы построения адаптивной системы управления мобильного робота, функционирующего в сложноорганизованных средах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. Часть 1. № 3. С. 31—35. Часть 2. № 4. С. 2—8.
2. Притыкин Ф. Н. Методы и технологии виртуального моделирования движений адаптивных промышленных роботов с использованием средств компьютерной графики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 6. С. 34—41.
3. Кобринский А. А., Кобринский А. Е. Манипуляционные системы роботов. М.: Наука, 1985. 344 с.
4. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными робототехническими системами. М.: МВТУ, 2000. 400 с.
5. Притыкин Ф. Н. Графическое представление телесного угла и окружающего пространства руки при реализации мгновенных состояний манипуляторов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2002. № 3. С. 93—101.
6. Притыкин Ф. Н. Графическое представление маневренности интеллектуального мобильного робота с помощью анализа многообразий точек пространства мгновенных скоростей изменения обобщенных координат // ГрафиКон-2002: Тр. XII Междунар. конф., 16—18 сентября 2002 г. Н. Новгород, 2002. С. 64—70.
7. Иванов Г. С. Теоретические основы начертательной геометрии: Учебное пособие. М.: Машиностроение, 1998. 157 с.

Оси связанной СК совпадают с осями симметрии ПА, при этом ось Y^* является его продольной осью. Вектор $P^*(t) \in R^3$ задает текущее желаемое положение характерной точки A рабочего органа ММ в СК $X^*Y^*Z^*$, в которой он работает, вектор $P(t) \in R^3$ — положение этой же точки в СК XYZ , а вектор $P_C(t) \in R^3$ — смещение точки C в СК XYZ . Координаты точки A в СК XYZ определяются выражениями [3]

$$\begin{cases} \dot{x} = v(t)/\Phi(x); \\ y = g_y(x); \\ z = g_z(x), \end{cases} \quad (1)$$

где $v(t)$ — модуль вектора желаемой скорости движения этой точки по траектории; $g_y(x)$, $g_z(x)$ — функции, описывающие соответствующие проекции траектории движения точки A на оси СК XYZ ;

$$\Phi(x) = \sqrt{\left(\frac{dg_y(x)}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dg_z(x)}{dx}\right)^2 + 1}.$$

Из рис. 1 видно, что при отклонении ПА от исходного положения в процессе работы манипулятора $x^* \neq x$, $y^* \neq y$, $z^* \neq z$. Поэтому использовать выражения (1) для определения траектории движения рабочего органа ММ в СК $X^*Y^*Z^*$ уже нельзя.

Будем полагать, что ПА оснащен высокоточной навигационной системой, позволяющей в пределах рабочей зоны ММ определять его местоположение с точностью не ниже 0,01 м [4—9], бортовыми гироскопами, точно измеряющими углы крена, дифферента и рысканья ПА, а также специальной системой автоматической стабилизации аппарата в пространстве [1], которая за счет соответствующих упоров движителей обеспечивает приемлемую компенсацию силовых и моментных воздействий на ПА со стороны работающего ММ.

Ставится задача создания системы, которая на основе измерения текущего смещения ПА (вместе с СК $X^*Y^*Z^*$) относительно его исходного положения позволяла бы, автоматически определяя положение точки A в СК $X^*Y^*Z^*$, так управлять рабочим органом ММ, чтобы он продолжал двигаться по траектории, непрерывно вычисляемой в СК XYZ с помощью выражения (1). При этом угловые и линейные смещения ПА относительно его исходного положения при наличии указанной выше системы автоматической стабилизации не должны превышать некоторых пределов, зависящих от параметров и кинематической схемы ММ, т. е. конструкция ММ в процессе слежения за некоторой точкой на траектории должна быть способна отработать возникающие смещения ПА.

2. Построение системы автоматической коррекции программной траектории движения рабочего органа ММ в связанной с ним СК

Будем полагать, что в некоторый момент времени при работе ММ произошли смещение точки C ПА относительно начала СК XYZ и некоторый его

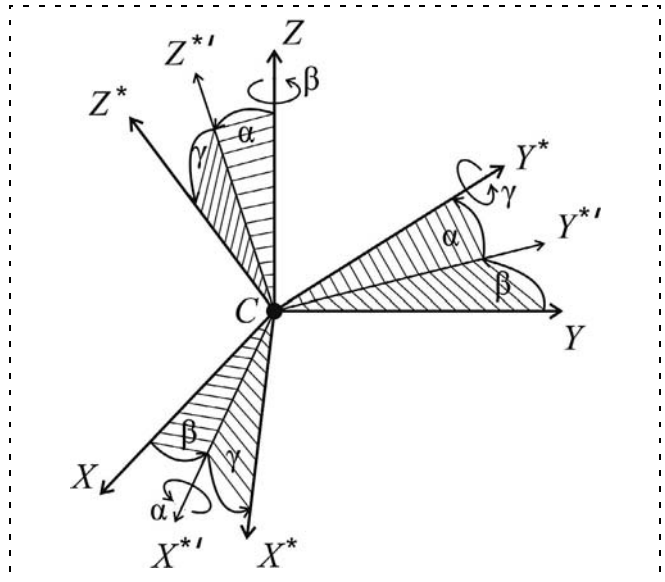


Рис. 2. Угловые перемещения связанной СК

произвольный поворот в этой СК. Бортовые гироскопы измеряют угол тангажа α , образуемый продольной осью Y^* ПА с горизонтальной плоскостью XY (рис. 2), угол β рысканья, образуемый проекцией Y^* продольной оси Y^* на горизонтальную плоскость и направлением оси Y , и угол крена γ , образуемый при повороте ПА вокруг его продольной оси Y^* [10, 11]. При этом координаты $\Delta x(t)$, $\Delta y(t)$ и $\Delta z(t)$ вектора $P_C(t) \in R^3$, определяющего линейное смещение точки C в СК XYZ (см. рис. 1) относительно исходного положения ПА, измеряются высокоточной навигационной системой.

Для решения поставленной задачи необходимо найти элементы вектора $P^*(t)$ в СК $X^*Y^*Z^*$, зная элементы векторов $P(t)$ и $P_C(t)$ в СК XYZ . Очевидно (см. рис. 1), что элементы вектора $P^*(t)$ в СК XYZ можно получить с помощью разности двух векторов $P(t) - P_C(t)$, а элементы этого вектора в СК $X^*Y^*Z^*$ — с помощью выражения

$$P^*(t) = R^T(P(t) - P_C(t)), \quad (2)$$

где $R \in R^3 \times 3$ — матрица поворотов СК $X^*Y^*Z^*$ относительно СК XYZ [12], T — символ транспонирования.

Для составления матрицы R необходимо представить поворот ПА вместе с СК $X^*Y^*Z^*$ в виде последовательности элементарных поворотов. Оси, относительно которых отсчитываются углы соответствующих поворотов СК $X^*Y^*Z^*$, и последовательность этих поворотов должны выбираться такими, чтобы получаемые при этом углы α , β и γ действительно соответствовали углам, которые будут измеряться бортовыми гироскопами. Данное условие выполняется при следующей последовательности элементарных поворотов СК $X^*Y^*Z^*$ (рис. 2): вначале осуществляется поворот на угол β вокруг оси Z

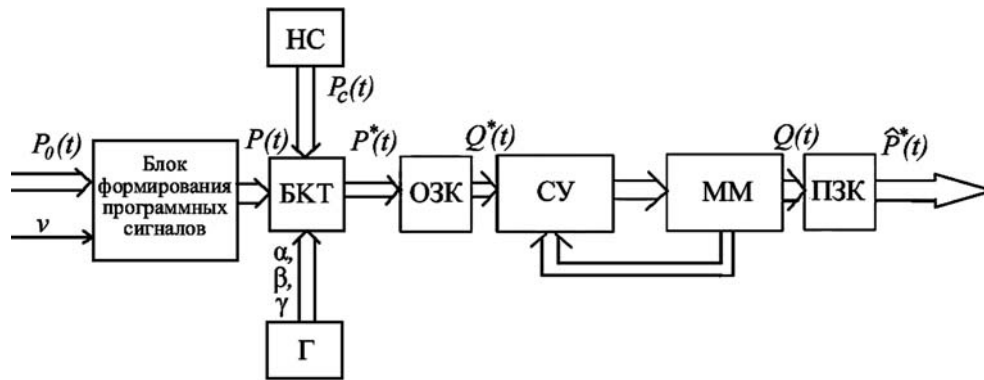


Рис. 3. Обобщенная схема системы автоматической коррекции программной траектории движения рабочего органа ММ, установленного на ПА

(ему соответствует матрица элементарного поворота $R_{Z, \beta}$). Затем выполняется поворот на угол α вокруг повернутой оси X^{*} (ему соответствует матрица элементарного поворота $R_{X^{*}, \alpha}$). И, наконец, осуществляется поворот на угол γ вокруг оси Y^{*} (ему соответствует матрица элементарного поворота $R_{Y^{*}, \gamma}$). Указанные матрицы поворотов имеют стандартный вид [13]:

$$R_{X^{*}, \alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha & -S\alpha \\ 0 & S\alpha & C\alpha \end{bmatrix}, R_{Y^{*}, \gamma} = \begin{bmatrix} C\gamma & 0 & S\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\gamma & 0 & C\gamma \end{bmatrix},$$

$$R_{Z, \beta} = \begin{bmatrix} C\beta & -S\beta & 0 \\ S\beta & C\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $S\alpha = \sin\alpha$; $S\beta = \sin\beta$; $C\alpha = \cos\alpha$; $C\beta = \cos\beta$; $C\gamma = \cos\gamma$. Учитывая выражения (3), составим матрицу R для описанной последовательности поворотов СК $X^{*}Y^{*}Z^{*}$ вместе с ПА:

$$R = R_{Z, \beta} R_{X^{*}, \alpha} R_{Y^{*}, \gamma} =$$

$$= \begin{bmatrix} C\beta C\gamma - S\alpha S\beta S\gamma & -S\beta C\alpha & S\gamma C\beta + S\alpha S\beta C\gamma \\ S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma C\beta & C\alpha C\beta & S\beta S\gamma - S\alpha C\beta C\gamma \\ -S\gamma C\alpha & S\alpha & C\alpha C\gamma \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Необходимо подчеркнуть, что только матрица (4) может использоваться в выражении (2) для определения элементов вектора $P^{*}(t)$, так как любая другая, составленная посредством иной последовательности элементарных поворотов, не может быть реализована на основе информации, получаемой от бортовых гироскопов.

После подстановки транспонированной матрицы R в выражение (2) получим

$$P^{*}(t) =$$

$$= \begin{bmatrix} (C\beta C\gamma - S\alpha S\beta S\gamma)(x - \Delta x) + (S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma C\beta)(y - \Delta y) - S\gamma C\alpha(z - \Delta z) \\ -S\beta C\alpha(x - \Delta x) + C\alpha C\beta(y - \Delta y) + S\alpha(z - \Delta z) \\ (S\gamma C\beta + S\alpha S\beta C\gamma)(x - \Delta x) + (S\beta S\gamma - S\alpha C\beta C\gamma)(y - \Delta y) + C\alpha C\gamma(z - \Delta z) \end{bmatrix}.$$

Обобщенная схема разработанной системы автоматической коррекции программной траектории движения рабочего органа ММ показана на рис. 3. На этой схеме введены следующие обозначения: СУ — система управления приводами ММ; БКТ — блок коррекции траектории движения ММ; НС — навигационная система ПА; Г — блок гироскопов; $P_0(t) = [x_0, y_0, z_0]^T \in R^3$ — вектор начального положения рабочего органа ММ в СК XYZ ; ОЗК — блок решения обратной задачи кинематики ММ; ПЗК — блок решения прямой задачи кинематики ММ; $Q^{*}(t) = [q_1^{*}(t), q_2^{*}(t), \dots, q_n^{*}(t)]^T \in R^n$ — вектор желаемых значений обобщенных координат ММ; $Q(t) = [q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)]^T \in R^n$ — вектор реальных значений обобщенных координат ММ; $\hat{P}^{*}(t) = [\hat{x}^{*}, \hat{y}^{*}, \hat{z}^{*}]^T \in R^3$ — вектор реального положения рабочего органа ММ в СК XYZ .

3. Исследование синтезированной системы

Для исследования синтезированной системы будем использовать ММ типа PUMA, кинематическая схема которого, имеющая три степени подвижности, изображена на рис. 4. На этом рисунке $l_1 = 0,05$ м, $l_2 = l_3 = 0,5$ м — длины звеньев ММ; $m_1 = 0,4$ кг, $m_2 = m_3 = 3,9$ кг — массы этих звеньев. Полагаем,

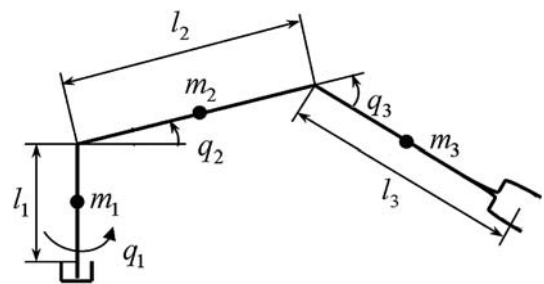


Рис. 4. Кинематическая схема ММ

что в процессе работы ММ его основание, являющееся неточно стабилизируемым в пространстве ПА, изменяет свои линейные и угловые координаты по закону: $P_C(t) = [0,04\sin(1,5t) \ 0,05\sin(2t) \ 0,03\sin(2t)]^T$; $\alpha = 0,06\sin(2,5t)$; $\beta = 0,04\cos(2t)$; $\gamma = 0,06\cos(2t)$.

Центры величины звеньев ММ совпадают с их центрами масс, каждое из звеньев имеет форму цилиндра с радиусом основания $\hat{r} = 0,05$ м и нейтральную плавучесть. Тензоры инерции этих звеньев относительно их центров масс имеют диагональный вид, причем $\tau_{111} = 5 \cdot 10^{-4}$, $\tau_{122} = \tau_{133} = 3,3 \cdot 10^{-4}$ — элементы тензора инерции τ_1 первого звена; $\tau_{211} = \tau_{311} = 5 \cdot 10^{-3}$, $\tau_{222} = \tau_{233} = \tau_{322} = \tau_{333} = 8,4 \cdot 10^{-2}$ — элементы тензоров инерции второго τ_2 и третьего τ_3 звеньев.

Для определения сил и моментов, действующих в сочленениях ММ, воспользуемся алгоритмом решения обратной задачи динамики ММ вида [1]

$$\omega_i = A_i^{i-1} \omega_{i-1} + e_i \dot{q}_i, \omega_0 = \omega_i^*, i = \overline{1, n};$$

$$\dot{\omega}_i = A_i^{i-1} \dot{\omega}_{i-1} + [(A_i^{i-1} \omega_{i-1}) \times e_i \dot{q}_i + e_i \ddot{q}_i], \\ \dot{\omega}_0 = \dot{\omega}_i^*, i = \overline{1, n};$$

$$\ddot{P}'_i = A_i^{i-1} (\ddot{P}'_{i-1} + \delta_{i-1} p_{i-1}^*), \ddot{P}'_0 = \ddot{P}_{ПА}, i = \overline{1, n};$$

$$\ddot{r}_{mi} = \ddot{P}'_i + \delta_i r_i^*, i = \overline{1, n};$$

$$v_i = A_i^{i-1} (v_{i-1} + \omega_{i-1} \times p_{i-1}^*), v_1 = v_0, i = \overline{2, n};$$

$$v_{Ai} = v_i + \omega_i \times r_i^*, i = \overline{1, n};$$

$$\psi_i = \arccos \frac{v_{Ai} \cdot p_i^*}{|v_{Ai}| |p_i^*|}, \alpha_i = \arccos \frac{v_i \cdot p_i^*}{|v_i| |p_i^*|},$$

$$\beta_i = \arccos \frac{\omega_i \cdot p_i^*}{|\omega_i| |p_i^*|}, i = \overline{1, n};$$

$$r_{pi} = r_i^* + K_{Ai} v_{Ai}, i = \overline{1, n};$$

$$v_{pi} = v_i \sin \alpha_i, v_{Li} = v_i \cos \alpha_i, i = \overline{2, n};$$

$$\omega_{pi} = \omega_i \sin \beta_i, \omega_{Li} = \omega_i \cos \beta_i, i = \overline{1, n};$$

$$F_{Li} = \eta k_{Li} v_{Li}, F_{pi}^v = \eta k_{pi} v_{pi},$$

$$F_{pi}^\omega = \frac{1}{2} k_{pi}^* \eta (\omega_{pi} \times p_i^*), i = \overline{n, 1};$$

$$M_{pi}^v = \frac{1}{2} p_i^* \times F_{pi}^v, M_{pi}^\omega = \frac{2}{3} p_i^* \times F_{pi}^\omega,$$

$$M_{Li} = \eta k_{Li}^* \hat{r}_i^2 |\omega_{Li}| \cdot \frac{p_i^*}{|p_i^*|}, i = \overline{n, 1};$$

$$F_i = A_i^{i+1} F_{i+1} + (m_i + \Pi_{mi}) \ddot{r}_{mi} + F_{Li} + F_{pi}^v + F_{pi}^\omega,$$

$$F_{n+1} = 0, i = \overline{n, 1};$$

$$M_i = A_i^{i+1} M_{i+1} + p_i^* \times (A_i^{i+1} F_{i+1}) + r_i^* \times (m_i \ddot{r}_{mi}) + \\ + r_{pi} \times (\Pi_{mi} \ddot{r}_{mi}) + (\tau_i + T_i) \dot{\omega}_i +$$

$$+ \omega_i \times ((\tau_i + T_i) \omega_i) + M_{pi}^v + M_{pi}^\omega + M_{Li},$$

$$M_{n+1} = 0, i = \overline{n, 1},$$

где

$$\delta_i = \begin{bmatrix} -(\omega_{i(2)}^2 + \omega_{i(3)}^2) & \omega_{i(1)} \omega_{i(2)} - \dot{\omega}_{i(3)} & \omega_{i(1)} \omega_{i(3)} + \dot{\omega}_{i(2)} \\ \omega_{i(1)} \omega_{i(2)} + \dot{\omega}_{i(3)} & -(\omega_{i(1)}^2 + \omega_{i(3)}^2) & \omega_{i(2)} \omega_{i(3)} - \dot{\omega}_{i(1)} \\ \omega_{i(1)} \omega_{i(3)} - \dot{\omega}_{i(2)} & \omega_{i(2)} \omega_{i(3)} + \dot{\omega}_{i(1)} & -(\omega_{i(1)}^2 + \omega_{i(2)}^2) \end{bmatrix},$$

в матрице δ_i нижний индекс указывает на номер элемента в соответствующих векторах; $\omega_i, \dot{\omega}_i \in R^3$ — угловая скорость и угловое ускорение звена i , соответственно; v_i — линейная скорость звена i ММ; $\omega_0, \dot{\omega}_0 \in R^3$ — угловая скорость и угловое ускорение основания ММ, соответственно; v_{Ai} — линейная скорость центра величины звена i ММ; v_i — линейная скорость звена i ММ; v_0 — линейная скорость основания ММ; $\ddot{P}_{ПА}$ — линейное ускорение основания ММ; v_{Li} и v_{pi} — продольная и поперечная составляющие v_i , соответственно; ω_{Li} и ω_{pi} — продольная и поперечная составляющие ω_i , соответственно; $\Pi_1 = 0,1$ кг, $\Pi_2 = \Pi_3 = 1,075$ кг — присоединенные к соответствующему звену массы жидкости; \ddot{r}_{mi} — линейное ускорение центра масс звена i ; p_i^* — вектор, задающий положение шарнира $i + 1$ относительно шарнира i ; r_{pi} — вектор, задающий положение центра присоединенной массы жидкости Π_i относительно шарнира i ; r_i^* — вектор, задающий положение центра масс звена относительно шарнира i ($|r_{11}^*| = 0,025$ м, $|r_{22}^*| = |r_{33}^*| = 0,25$ м); $e_i = (0 \ 0 \ 1)^T$ — вектор, направленный вдоль оси шарнира i ; $F_i, M_i \in R^3$ — сила и момент этой силы, действующие в шарнире i , соответственно; $\eta = 1,3 \cdot 10^{-3}$ — вязкость воды; $k_{Li}, k_{pi}, k_{pi}^*, k_{Li}^*$ — коэффициенты вязкого трения, $k_{L2} = k_{p2} = k_{p2}^* = k_{L2}^* = k_{L3} = k_{p3} = k_{p3}^* = k_{L3}^* = 1$; K_{Ai} — некоторый параметр, зависящий от $|v_{Ai}|$ и угла ψ_i , $K_{A2} = \sin \psi_2$, $K_{A3} = \sin \psi_3$; $T_{111} = 1 \cdot 10^{-4}$, $T_{122} = T_{133} = 3 \cdot 10^{-5}$, $T_{211} = T_{311} = 1,4 \cdot 10^{-3}$, $T_{222} = T_{233} = T_{322} = T_{333} = 2,6 \cdot 10^{-2}$ — диагональные элементы тензоров инерции масс жидкости, присоединенных к соответствующим звеньям ММ;

A_i^{i-1} — матрица направляющих косинусов для рассматриваемой кинематической схемы ММ (рис. 4),

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & \sin q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \sin q_1 & -\cos q_1 & 0 \end{bmatrix}, A_3^2 = \begin{bmatrix} \cos q_2 & \sin q_2 & 0 \\ -\sin q_2 & \cos q_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ причём}$$

чем $A_{i-1}^i = (A_i^{i-1})^T$.

Будем полагать, что в СУ электроприводами каждой степени подвижности ММ уже включены описанные в работе [14] адаптивные корректирующие устройства, обеспечивающие требуемую динамическую точность и инвариантность показателей качества их работы к эффектам взаимовлияния между всеми степенями подвижности этого ММ, перемещающегося в вязкой среде. В результате передаточные функции скорректирован-

ных электроприводов каждой степени подвижности манипулятора будут иметь вид

$$W_{\Pi}(s) = \frac{q_i(s)}{q_i^*(s)} = \frac{k_{\Pi}}{(T_1 s + 1)s}$$

при любых законах изменения обобщенных координат в процессе его движения, где $k_{\Pi} = \frac{1}{i_p k_{\omega}}$,

$T_1 = \frac{R_a J}{k_m k_{\omega}}$, $R_a = 0,2$ Ом — активное сопротивление якорной цепи; $k_{\omega} = 0,02$ В · с — коэффициент противоЭДС; $k_m = 0,02$ Н · м/А — моментный коэффициент; $J = 10^{-4}$ кг · м² — момент инерции ротора электродвигателя и вращающихся частей редуктора; $i_p = 100$ — передаточное отношение редуктора.

Для исследования работы подводного ММ с указанными выше параметрами и синтезированной СУ (см. рис. 3) было выполнено математическое моделирование движения его схвата в горизонтальной плоскости по траектории, описываемой уравнением ($z^* = g_z(x^*) = \text{const}$)

$$y^* = -0,3 \sin(7x^*) - 0,1,$$

когда значение $x^*(t)$ сформировалось с помощью выражения

$$\dot{x}^* = \frac{v^*(t)}{\sqrt{1 + (-2,1 \cos(7x^*))^2}},$$

полученного на основе (1). При этом начальная точка траектории движения схвата имела координаты $x_0^* = 0$; $y_0^* = -0,1$; $z_0^* = 1$.

На рис. 5 показаны процессы изменения $\hat{x}^*(t)$, $\hat{y}^*(t)$, $\hat{z}^*(t)$ и отклонения схвата от заданной траектории $\varepsilon_n(t)$ во время его движения по этой траектории при использовании синтезированной системы (см. рис. 3), а на рис. 6 — это же отклонение при движении схвата по указанной траектории, но без использования синтезированной системы. Из этих рисунков видно, что синтезированная СУ позволяет в 60 раз повысить точность перемещения схвата подводного ММ в заданную точку пространства. Это же имеет место и в тех случаях, когда требуется существенно увеличить динамическую точность при непрерывном перемещении ММ по любым другим пространственным траекториям.

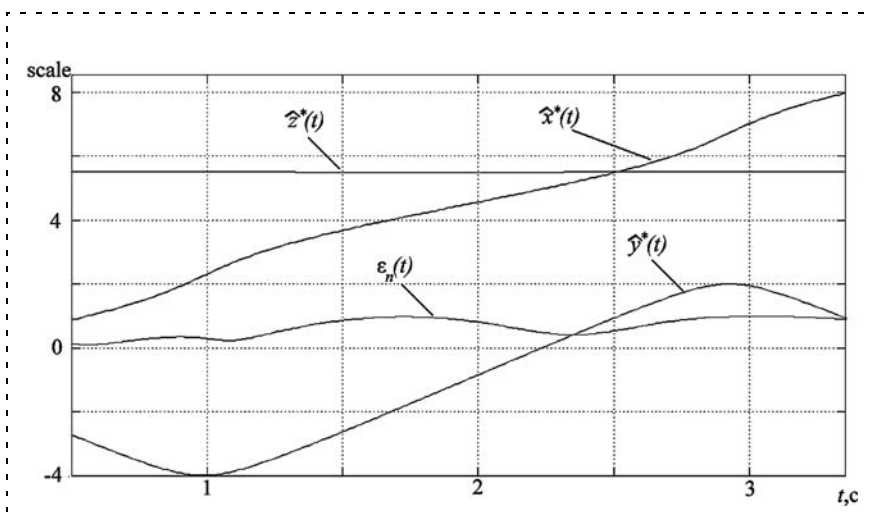


Рис. 5. Процессы изменения $\hat{x}^*(t)$, $\hat{y}^*(t)$, $\hat{z}^*(t)$ и $\varepsilon_n(t)$ в синтезированной системе: $\hat{y}^*(t) = \text{scale} \cdot 0,1$ м; $\hat{x}^*(t) = \text{scale} \cdot 0,1$ м; $\hat{z}^*(t) = \text{scale} \cdot 0,1$ м; $\varepsilon_n(t) = \text{scale} \cdot 0,002$ м

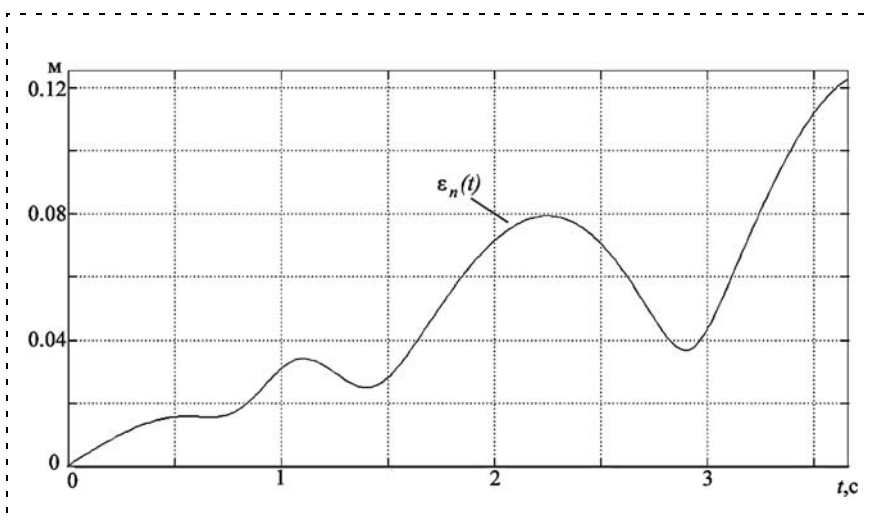


Рис. 6. Процесс изменения ошибки движения схвата $\varepsilon_n(t)$

Заключение

В данной статье рассмотрен метод синтеза системы автоматической коррекции программой траектории движения схвата ММ, установленного на ПА, которая позволяет с высокой точностью выполнять манипуляционные операции в режиме зависания ПА вблизи объекта работ. Использование этой системы предполагается в сочетании с известными способами стабилизации ПА в режиме его зависания. Разработанная система за счет введения дополнительных движений манипулятора позволяет точно компенсировать ошибки отработки его схватом всех предписанных траекторий. При этом коррекция траектории движения этого схвата происходит на основе информации о текущей конфигурации ММ, а также о линейных и угловых смещениях ПА под действием внешних возмущений. Реализация синтезированной системы не вызывает затруднений.

Список литературы

1. Филаретов В. Ф., Алексеев Ю. К., Лебедев А. В. Системы управления подводными роботами / Под ред. В. Ф. Филаретова. М.: Круглый год, 2001. 288 с.
2. Филаретов В. Ф., Лебедев А. В., Юхимец Д. А. Устройства и системы управления подводных роботов. М.: Наука, 2005. 270 с.
3. Лебедев А. В. Формирование желаемой траектории пространный движения динамического объекта // Сб. тр. ДВО РИА. Вып. 9. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2004. С. 68—71.
4. Xianbo Xiang, Lionel Lapiere, Bruno Jouvencel, Guohua Xu and Xinhua Huang. Cooperative acoustic navigation scheme for heterogeneous autonomous underwater vehicles // Underwater Vehicles. In-Tech, 2009, 582 p., 531—544 p.
5. Бобков В. А., Борисов Ю. С. Навигация подводного аппарата на малых дистанциях по оптической информации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 2. С. 75—78.
6. Eustice R., Pizarro O. Hanuman Singh Visually augmented navigation for autonomous underwater vehicles // IEEE Journal oceanic engineering. 2009. 1—18 p.
7. Horgan J., Toal D. Computer vision applications in the navigation of unmanned underwater vehicles // Underwater Vehicles. In-Tech. 2009. 582 p.
8. Инзарцев А. В., Киселев Л. В., Матвиенко Ю. В., Рылов Н. И. Навигационно-управляющий комплекс многоцелевого автономного подводного робота и особенности его применения в высоких широтах Арктики // Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана. Новосибирск. 2010. С. 13—18.
9. Hinüber E. New approaches in high-performance navigation solutions for AUVs and ROVs / iMAR. URL: www.imar-navigation.de
10. Фридендер Г. О., Козлов М. С. Авиационные гироскопические приборы. М.: Оборонгиз, 1961. 390 с.
11. Пельпор Д. С., Михалев И. А., Бауман В. А. Гироскопические приборы и системы: Учеб. для вузов по спец. "Гироскоп. приборы и устройства" — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1988. 424 с.
12. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 624 с.
13. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 832 с.
14. Филаретов В. Ф. Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2000. 304 с.

ИНФОРМАЦИЯ



22—25 апреля 2013 г.
в Пензенском государственном университете состоится

XXX Международная научно-техническая конференция **"ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ — 2013" (ПАУТС2013)**



Основные направления работы конференции:

- новые принципы построения систем автоматизации и управления в различных отраслях науки и техники;
- современные методы представления и преобразования информации;
- физические эффекты и их использование в преобразователях физических величин;
- теория и практика построения преобразователей и датчиков;
- интеллектуальные системы контроля и управления;
- программное обеспечение информационных и управляющих систем;
- программное обеспечение АСУ ТП и SCADA-системы;
- моделирование систем автоматики и их элементов;
- цифровая обработка сигналов и изображений;
- мехатроника и робототехника;
- методика преподавания и обучения студентов в области автоматизации и управления.

Среди участников конференции в возрасте до 28 лет будет проведен отборочный тур конкурса по Программе "Участник молодежного научно-инновационного конкурса" (У.М.Н.И.К.) в номинации "За научные результаты, обладающие существенной новизной и среднесрочной (до 6—8 лет) перспективой их эффективной коммерциализации".

Контактные телефоны:

Тел.: (8412) 56-46-83, (8412) 36-82-10, Факс: (8412) 56-51-22.

Адрес для переписки:

440026, г. Пенза, ул. Красная 40, ПГУ, кафедра "АиТ".
avitel@pnzgu.ru

УДК 681.518.5

Л. Е. Рудометкин, аспирант,
RudometkinL@rambler.ru,
А. А. Антонов, д-р техн. наук, проф.,
trp91@rambler.ru,
М. Ю. Рачков, д-р техн. наук, проф.,
michyur@gmail.com,
Московский государственный
индустриальный университет

Автоматизация контроля остаточных напряжений конструкций

Представлен программно-аппаратный комплекс, который позволяет проводить автоматические измерения остаточных напряжений для различных типов конструкций. Предложены критерии оценки полученных изображений, анализа и обработки интерферограмм. Приведены экспериментальные результаты.

Ключевые слова: автоматизация, контроль, остаточные напряжения

Введение

Остаточными напряжениями называют напряжения, существующие в конструкции при отсутствии внешних воздействий, образующиеся практически при всех технологических операциях изготовления и обработки материалов, таких как литье, сварка, ковка, прокатка, штамповка, механическая обработка, термообработка. Остаточные напряжения снижают прочность конструкций при переменных циклических нагрузках, влияют на износ при трении, стимулируют процессы коррозии. При



Рис. 1. Комплекс для контроля остаточных напряжений

расчете элементов конструкции часто учитываются только эксплуатационные нагрузки, и практически не принимается во внимание технологическая наследственность по остаточным напряжениям. Это объясняется сложностью расчетных методов определения остаточных напряжений, а также отсутствием аппаратуры, позволяющей осуществить измерения на реальных конструкциях в ходе жизненного цикла изделия. Для повышения функциональных свойств изделий и надежности их работы необходимо уметь измерять напряженное остаточное состояние и находить способы управления технологическими процессами и вызываемыми ими напряжениями.

Наиболее перспективным среди методов определения остаточных напряжений является метод засверливания глухого отверстия и регистрации состояния поверхности методами лазерной интерферометрии [1–4].

Общий вид комплекса, реализующего данный метод измерения, показан на рис. 1.

Комплекс состоит из оптического блока и персонального компьютера с программно-математическим обеспечением. Основное отличие разработанного комплекса контроля остаточных напряжений от других аналогичных лазерно-интерферометрических комплексов состоит в обеспечении возможности его применения в полевых условиях. Применение известных комплексов [5] для исследования полей остаточных напряжений на реальных конструкциях в полевых условиях связано со значительными сложностями при жесткой фиксации приборов на поверхности изделий, невозможностью крепления на небольших поверхностях, долгой настройкой перед началом работ, сильным влиянием солнечного излучения на качество получаемых интерферограмм, громоздкостью и привязанностью к внешней электросети.

Оптический блок комплекса

Общий вид оптического блока изображен на рис. 2.

Комплекс построен по так называемой схеме Лейта—Упатниекса (рис. 3). Элементы интерферометра жестко закрепляются на плоскости корпуса. При ослаблении креплений они имеют возможность ограничено перемещаться в оптической плоскости, что необходимо при юстировке оптической схемы. Корпус интерферометра оборудован опорной системой для установки и крепления интерферометра к поверхности исследуемого объекта. Конструкция корпуса обеспечивает защиту от высокочастотных колебаний, а также позволяет раз-

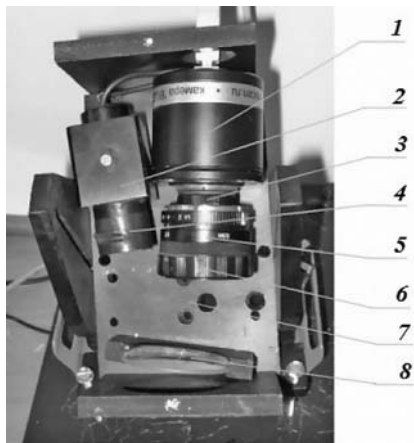


Рис. 2. Внешний вид оптического блока:
 1 — видеокамера; 2 — лазер; 3 — переходные кольца; 4 — рас-
 ширитель; 5 — объектив; 6 — интерференционный фильтр,
 7 — основание; 8 — делитель

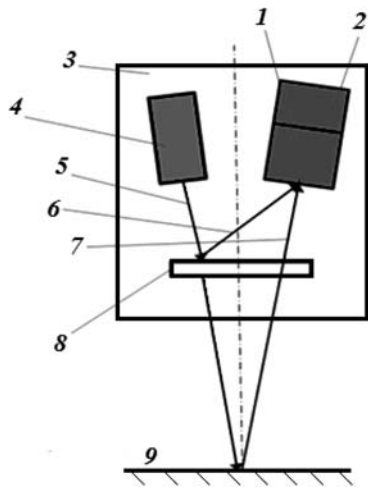


Рис. 3. Схема оптического блока комплекса:
 1 — объектив с диафрагмой; 2 — видеокамера; 3 — корпус ин-
 терферометра; 4 — полупроводниковый лазер; 5 — основной
 пучок; 6 — опорный пучок; 7 — предметный пучок; 8 — дели-
 тель; 9 — поверхность исследуемого объекта

местить аккумуляторы для автономного питания лазера и видеокамеры. Жесткое крепление корпуса к исследуемой поверхности реализуется за счет внедрения трех инденторов, закрепленных в основании корпуса, в поверхность исследуемого объекта.

Интерферометр оснащен цифровой видеокамерой "ВИДЕОСКАН-415-USB" и лазерным модулем "KLM-D532-30-5". Характеристики видеокамеры: разрешение 782×582 пикселей; размер пикселя $8,3 \times 8,3$ мкм; кадровая частота 25 Гц. Максимальная чувствительность видеокамеры находится в зеленой области спектра, что позволяет наиболее эффективно применять ее для записи зеленого лазерного излучения. Лазерный модуль имеет следующие характеристики: длина волны лазерного излучения 532 нм, расходимость 0,5 мрад, мощность лазерного излучения 30 мВт.

При разработке оптического блока были решены следующие задачи: обеспечение стабильного качества интерференционной картины полей перемещений; снижение влияния внешних факторов (вибраций, засветки от внешних источников света за счет использования интерференционного фильтра и т. п.) на качество интерферограмм; обеспечение надежной фиксации оптического блока на поверхности изделия; наличие возможности оперативной перенастройки оптического блока для измерения напряжений как на плоских поверхностях, так и на поверхностях различной кривизны; устранение вероятности механического воздействия на оптический блок при засверливании зондирующих отверстий; регулирование чувствительности измерений в зависимости от имеющегося уровня остаточных напряжений.

Определение значений остаточных напряжений по измеренным перемещениям осуществляется по специальным методикам, в основе которых лежит решение трехмерной задачи теории упругости для глухого отверстия [4, 6]. Методика определения остаточных напряжений по перемещениям возмущенного деформированного состояния основана на предположении, что перемещения или деформации, возникшие в окрестности отверстия, являются упругими.

Интерферограмма имеет две оси симметрии, которые совпадают с главными осями остаточных напряжений в точке, являющейся центром высверленного отверстия (рис. 4). Число полос вдоль каждой из осей определяет значение остаточных напряжений по этим осям. Интерференционная картина свидетельствует и о знаках напряжений по главным осям. Знак напряжений определяется по характеру сопряжений интерференционных полос с границей отверстия [7], либо путем дополнительной точечной пластической деформации вблизи кромки отверстия (кернение). По взаимодействию интерференционных полос от зондирующего отверстия

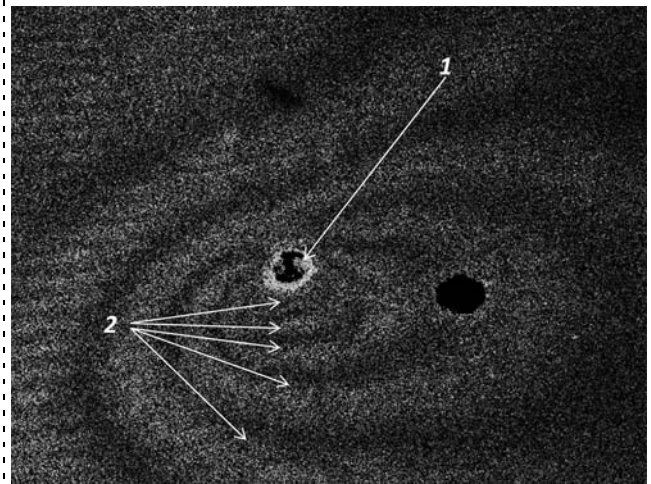


Рис. 4. Спекл-интерферограмма:
 1 — высверленное отверстие; 2 — интерференционные полосы

и точечной деформации от кернения определяется знак напряжений.

На рис. 4 справа от отверстия 1 видно отверстие от предыдущих измерений. Предполагается, что полная картина распределения напряжений получается по совокупности нескольких измерений.

Для определения остаточного напряжения вдоль выбранного направления на интерференционной картине для целей экспресс-анализа используется формула [8]

$$\sigma = \left(\frac{A}{h} + B \right) \frac{D_0}{D} \frac{E}{E_{Al}} N,$$

где E и $E_{Al} = 70$ ГПа — соответственно модули упругости исследуемого материала и алюминия, который используется в качестве эталонного материала; h и D — глубина и диаметр лунки; $D_0 = 2$ мм — эталонный диаметр лунки; N — число полос на интерферограмме; $A = 20$ МПа и $B = 25$ МПа — аппроксимирующие константы.

Программное обеспечение

Программное обеспечение комплекса позволяет проводить съемку и анализ изображений с последующим вычислением остаточного напряжения. Блок-схема работы программной части измерительного комплекса представлена на рис. 5.

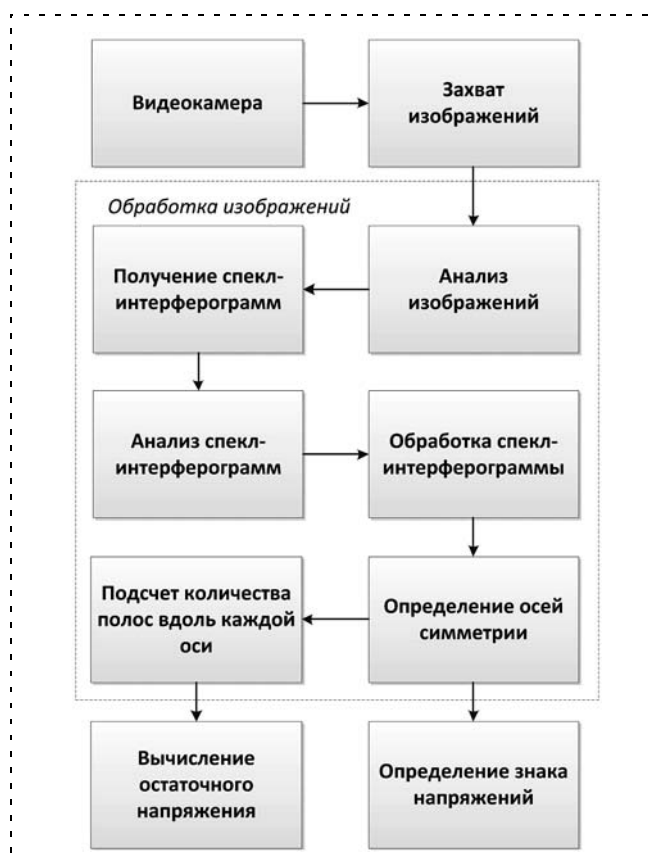


Рис. 5. Схема программного обеспечения

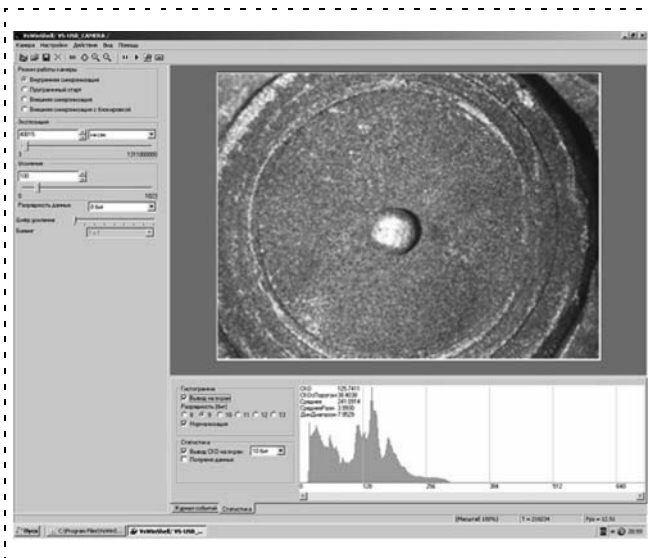


Рис. 6. Интерфейс программы сохранения изображений с камеры

◆ Захват изображений

Для захвата изображений используется программное обеспечение VsWinShell 2.4.5 [9]. Интерфейс программы изображен на рис. 6. Видекамера функционирует под управлением унифицированных драйверов и библиотеки VS-LIB, версии 3. Программа VsWinShell 2.4.5 работает в Microsoft Windows XP SP2 и Windows 7 и имеет встроенную возможность вызова программы обработки изображений.

Программа обработки изображений разработана в среде MATLAB. Графический интерфейс представлен на рис. 7. MATLAB имеет встроенный язык программирования, а также содержит библиотеки функций по обработке изображений.

◆ Анализ изображений

Для повышения надежности измерений проводится захват сразу серии изображений. Экспериментальным путем установлено, что наиболее оптимальное число изображений каждой группы кадров равно пяти. Это связано с тем, что во время измерений могут быть различные помехи как в оборудовании, так и в окружающей среде. Такие помехи носят случайный характер возникновения. Для автоматического исключения изображений с подобными помехами предлагается использовать алгоритм сравнения всех изображений группы между собой по среднему значению пикселей. Если среднее значение пикселей изображения отличается от остальных изображений третьим знаком для формата файлов tif и вторым знаком для формата файлов bmp, то оно исключается (рис. 8).

После анализа каждой из групп изображений до и после воздействия и отбраковки изображений, содержащих помехи, из оставшихся изображений

формируются спекл-интерферограммы по следующей формуле:

$$I_{\text{инт}} = \{I_{ij}\}_{i=1, M}^{j=1, N} = \\ = I_{\text{после}}(m) - I_{\text{до}}(n),$$

где $I_{\text{инт}}$ — спекл-интерферограмма, представляющая собой матрицу размерности $N \times M$ (N — число пикселей по горизонтали, M — число пикселей по вертикали), со значениями от 0 до 255 в каждом пикселе; $I_{\text{до}}$ — изображение до высверливания, представляющее собой матрицу размерности $N \times M$, со значениями от 0 до 255 в каждом пикселе; $I_{\text{после}}$ — изображение после высверливания, представляющее собой матрицу размерности $N \times M$, со значениями от 0 до 255 в каждом пикселе, m — порядковый номер изображения из группы изображений после высверливания, n — порядковый номер изображения из группы изображений до высверливания.

Анализ спекл-интерферограмм

Сформированные спекл-интерферограммы отображаются списком в окне программы обработки (см. рис. 7, область 4). Это позволяет выбрать любую полученную спекл-интерферограмму для последующего анализа.

Анализ проведенных экспериментов показал, что полученные комбинации не всегда имеют характерные полосы (рис. 9).

Эксперименты по сравнению полученных спекл-интерферограмм между собой позволили установить зависимость между визуальными свойствами

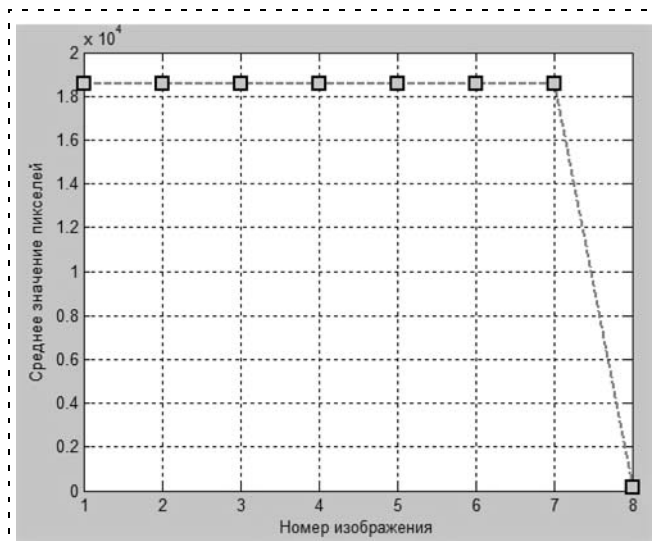


Рис. 8. График среднего значения пикселей группы изображений

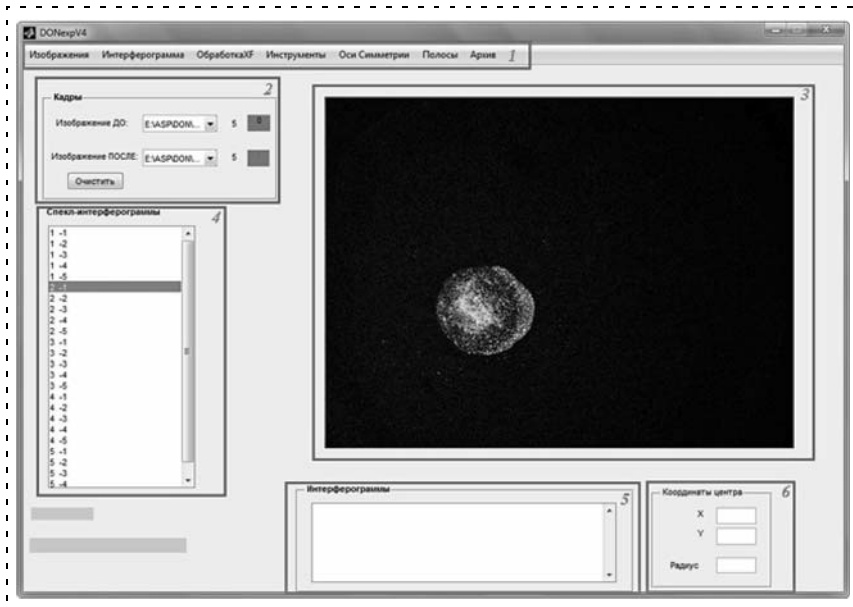


Рис. 7. Интерфейс программы обработки:

1 — панель меню; 2 — группы кадров до и после высверливания отверстия; 3 — область визуализации; 4 — список спекл-интерферограмм; 5 — панель доступа к ранее сохраненным спекл-интерферограммам; 6 — панель установки/отображения координат центра осей симметрии

и количественными параметрами. Для автоматического выбора наиболее информативных спекл-интерферограмм предложен алгоритм оценки среднего значения пикселей (рис. 10). Выбирается интерферограмма (или группа интерферограмм) с наибольшим средним значением яркости пикселей. Среднее значение вычисляется по формуле:

$$I_{\text{сред}} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{N, M} I_{ij}}{NM},$$

где N — число пикселей по горизонтали, M — число пикселей по вертикали.

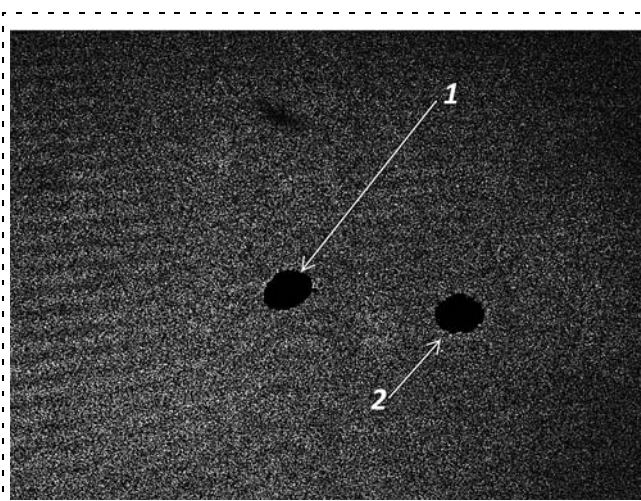


Рис. 9. Отсутствие полос на спекл-интерферограмме:

1 — высверленное отверстие; 2 — отверстие от предыдущих измерений (не рассматривается)

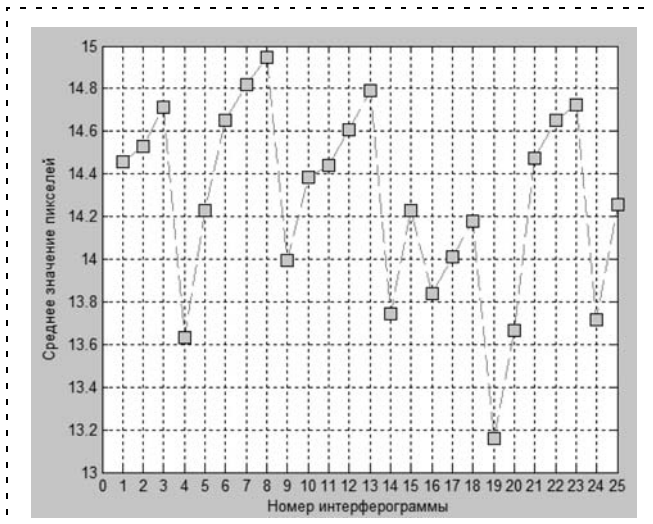


Рис. 10. Средние значения пикселей интерферограмм

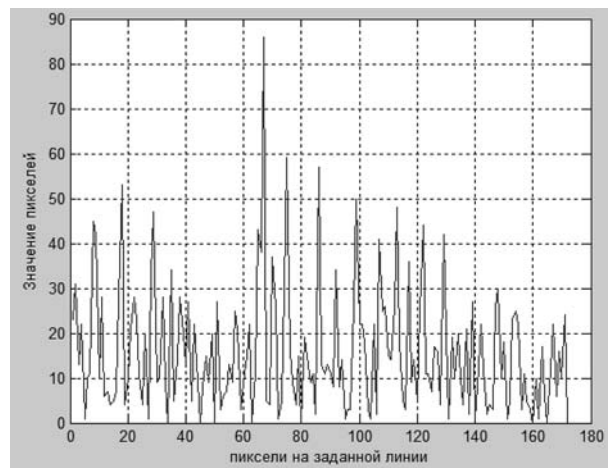


Рис. 11. График значений пикселей на зашумленной интерферограмме

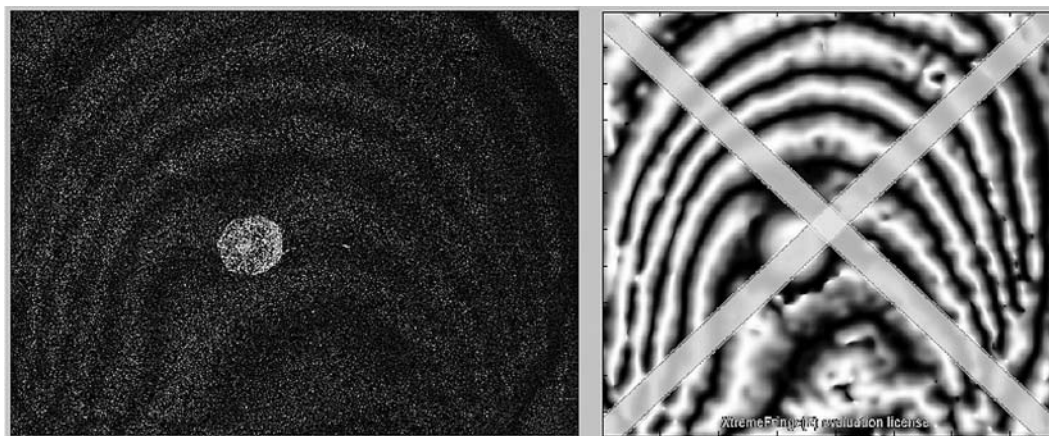


Рис. 12. Интерферограмма до и после однородной нормализации

◆ Обработка спекл-интерферограмм

Получаемые спекл-интерферограммы имеют достаточно низкое качество полезной информации. Полосы на них сильно зашумлены и имеют низкий контраст (рис. 11). Существует множество методов повышения качества интерферограмм для выделения необходимой информации:

- медианная фильтрация;
- повышение контраста;
- фильтрация Винера;
- фильтрация Гаусса;
- фильтрация Фурье и др.

Были проведены эксперименты по применению различных методов повышения качества интерферограмм, среди которых наиболее эффективным оказался метод однородной нормализации (рис. 12) [10].

Из рис. 12 видно, что после применения однородной нормализации на обработанной интерферограмме значительно выражены полосы, что показано на рис. 13. После обработки диапазон зна-

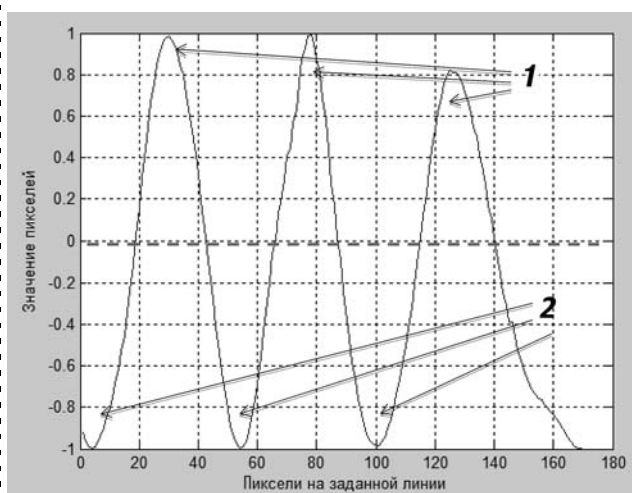


Рис. 13. График значений пикселей на обработанной интерферограмме:
1 — светлые полосы; 2 — темные полосы

чений пикселей меняется от -1 до 1 . Значению 1 соответствуют светлые полосы, значению -1 — темные. Для определения числа светлых полос вдоль заданной линии необходимо подсчитать число максимумов (пиков) на графике.

◆ *Определение осей симметрии*

Определение центра высверленного отверстия и осей координат выполняется пользователем вручную. Автоматическое определение данных параметров является актуальной задачей и находится в стадии проработки. Для решения данной задачи необходимо разработать методику определения ориентации полос по интерферограмме. Также существенные сложности могут создавать имеющиеся на образце отверстия от предыдущих измерений. Для задания центра координат программа имеет встроенные возможности (см. рис. 7, область б). Пользователь указывает на изображении точку центра и радиус отверстия, и программа автоматически заносит координаты этой точки и значение радиуса в область б и затем на основе этих данных проводит на изображении рабочую область (рис. 14), которая определяется как три радиуса высверленного отверстия.

◆ *Подсчет числа полос вдоль осей*

График значений пикселей, принадлежащих отрезку 1 (рис. 14), изображен на рис. 15. График значений пикселей, принадлежащих отрезку 2, изображен на рис. 16. По данным графикам программа автоматически подсчитывает число полос и сохраняет полученные значения в памяти и использует для расчета остаточного напряжения.

Определение знака напряжений

Знак напряжений вдоль осей симметрии может быть как положительным, так и отрицательным. Знак может быть определен по характеру расположения полос относительно высверленного отверстия. Ввиду сильной зашумленности и потери некоторой информации в результате преобразования интерферограмм разработка методов и алгоритмов автоматического определения знака по характеру расположения полос вызывает большие трудности.

Альтернативным подходом может быть метод восстановления волнового фронта [11]. Данный подход находится в стадии проработки.

Экспериментальные результаты

Были проведены эксперименты по подсчету числа полос на различных образцах. В качестве примера приводится реальный образец — сварной шов на стальной пластине (рис. 17, 18).

Анализ первой и второй групп кадров изображен на рис. 19.

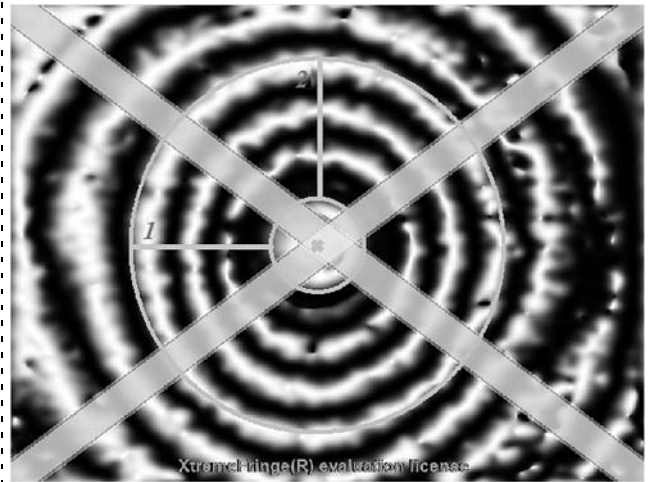


Рис. 14. Интерферограмма с указанием заданной области и осей координат:

1 — ось X; 2 — ось Y

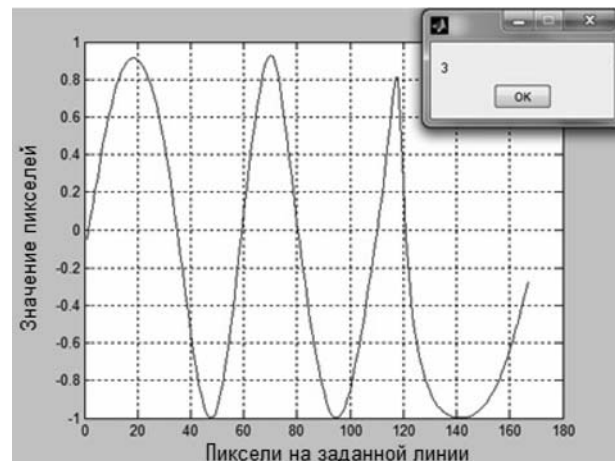


Рис. 15. График значений пикселей отрезка 1 на рис. 13

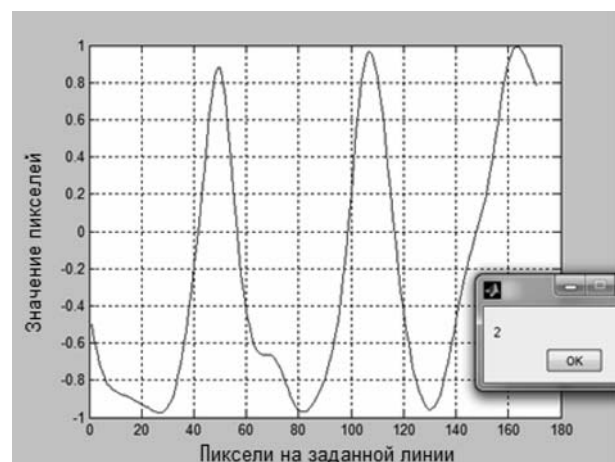


Рис. 16. График значений пикселей отрезка 2 на рис. 13

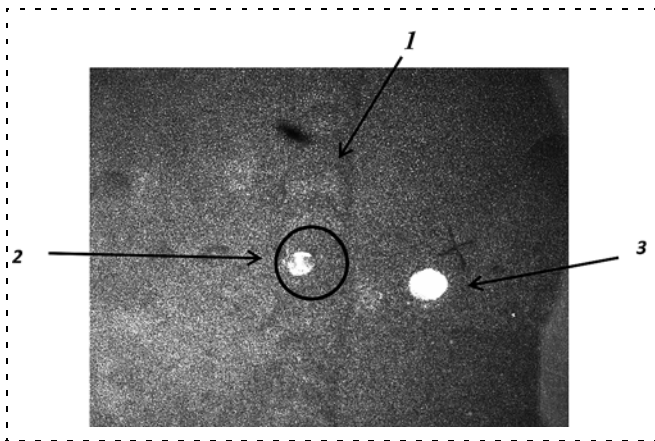


Рис. 17. Изображение сварного шва на стальной пластине: 1 — сварной шов; 2 — метка для высверливания; 3 — отверстие от предыдущих измерений (не рассматривается)

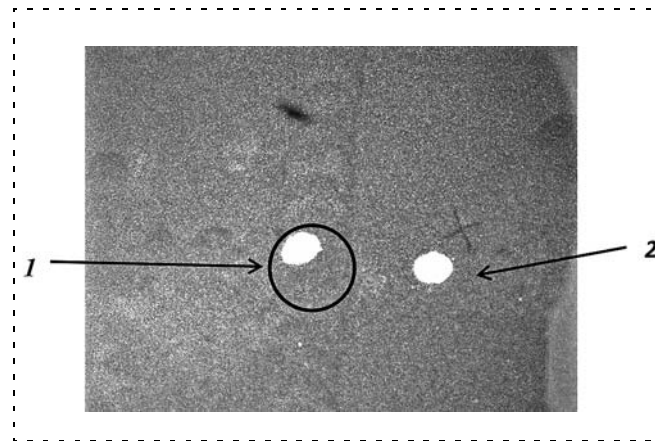
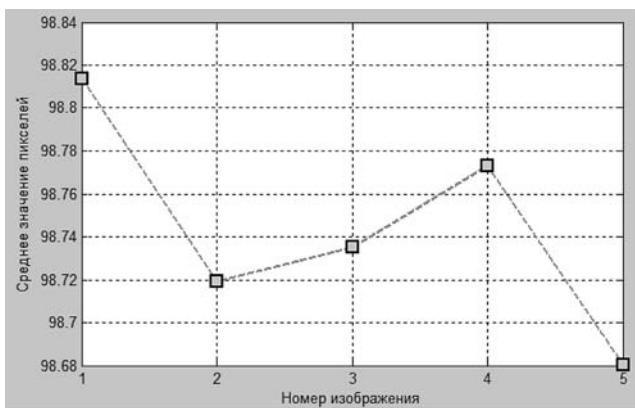
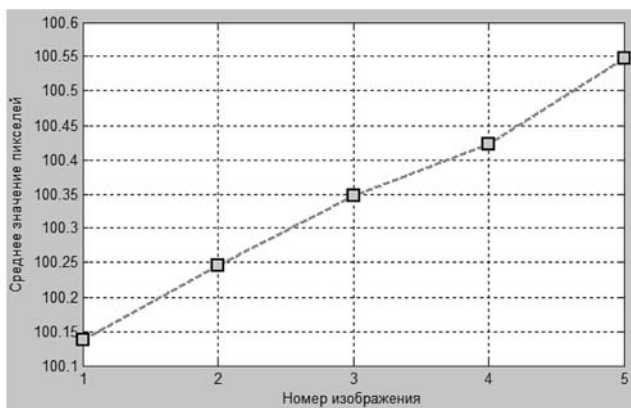


Рис. 18. Сварной шов после высверливания отверстия: 1 — высверленное отверстие; 2 — отверстие от предыдущих измерений (не рассматривается)



а)



б)

Рис. 19. Анализ первой (а) и второй (б) групп кадров

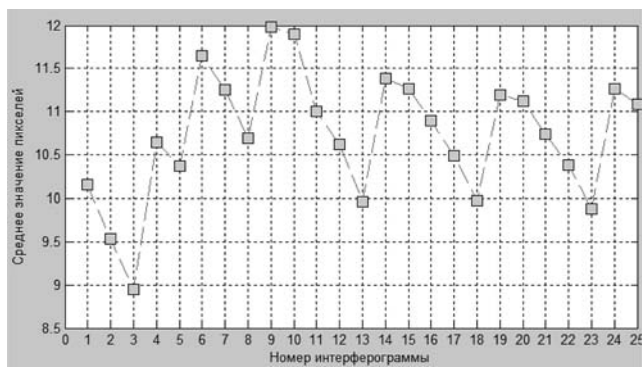


Рис. 20. Средние значения интерферограмм

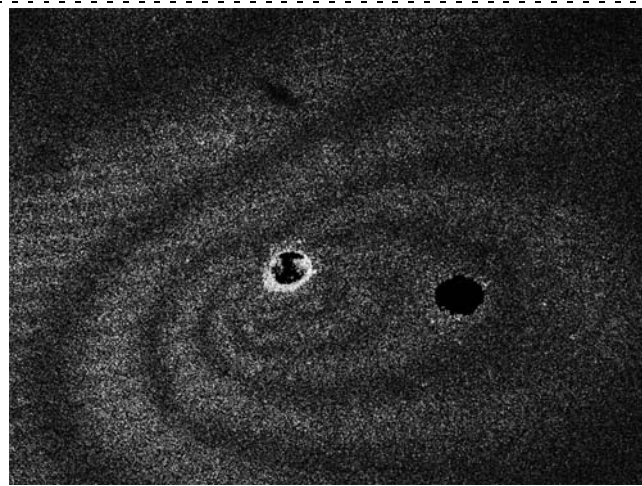


Рис. 21. Лучшая интерферограмма

Из рис. 19 видно, что все изображения соответствуют установленным параметрам качества и не содержат помех. На рис. 20 изображен результат анализа среднего значения пикселей интерферограмм, полученных в результате вычитания изображений каждой из групп между собой.

Из рис. 20 видно, что интерферограмма 9, полученная в результате вычитания изображений 2 (до воздействия) и 4 (после воздействия) имеет наибольшее среднее значение пикселей — 11,9839. Соответственно на ней наиболее отчетливо проявлены полосы. Программа автоматически выберет

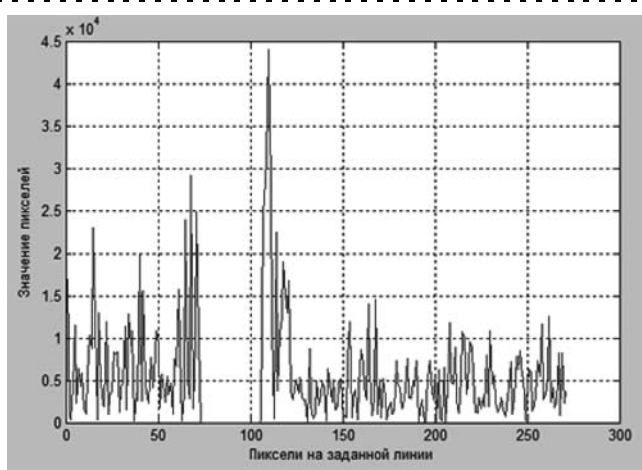


Рис. 22. Распределение пикселей по линии на зашумленной интерферограмме

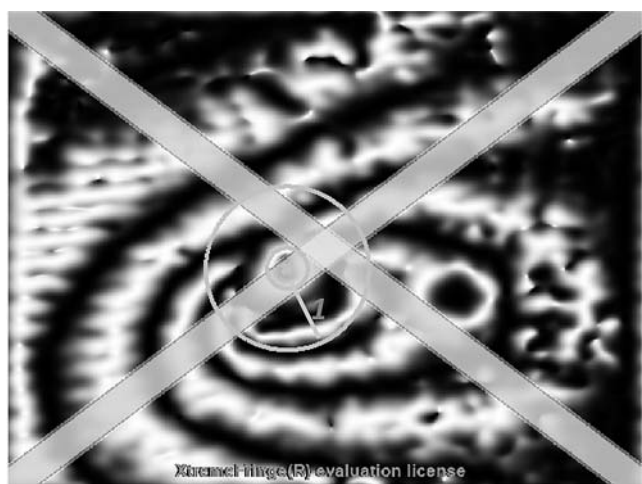


Рис. 23. Отфильтрованная интерферограмма

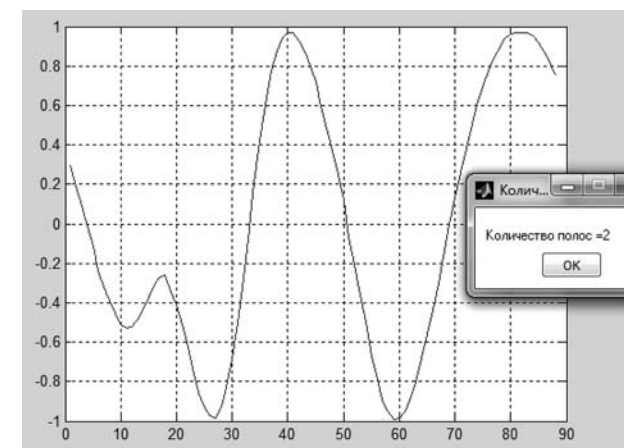


Рис. 24. График отрезка 1 (см. рис. 23)

ее для дальнейшей обработки. Интерферограмма изображена на рис. 21.

Выбранная интерферограмма имеет сильную помеху (рис. 22).

Применение функции Normilize (однородной нормализации) из библиотеки XtremeFringeLib [12] отфильтровывает интерферограмму для необходимой в дальнейшем автоматической обработки и анализа качества (рис. 23, 24).

Заключение

Представленный в статье программно-аппаратный комплекс позволяет проводить измерения остаточных напряжений для различных типов конструкций. Реализация программной части позволит автоматизировать работу программно-аппаратного комплекса по контролю остаточных напряжений. Предложены критерии оценки полученных изображений, анализа и обработки интерферограмм. Проведены эксперименты с различными образцами и получены результаты, подтверждающие эффективность функционирования разработанной автоматической системы контроля остаточных напряжений конструкций.

Список литературы

1. Антонов А. А., Бобрик А. И., Морозов В. К., Чернышев Г. Н. Определение остаточных напряжений при помощи создания отверстий и голографической интерферометрии // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1980. № 2. С. 182–189.
2. Антонов А. А. Определение уровня остаточных напряжений в сварных соединениях лазерной интерферометрией // Сварочное производство. 1983. № 3. С. 29–31.
3. Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Андрущенко С. Т. Переносной голографический модуль для определения остаточных напряжений // Тр. 2 Всесоюз. симп. "Остаточные технологические напряжения". М.: ИПМ РАН, 1985. С. 215–219.
4. Nelson D. V., McCrickerd J. T. Residual-Stress Determination Through Combined Use of Holographic Interferometry and BlindHole Drilling // Proc. Of the Society for Experimental Mechanics. 1986. V. 43. P. 371–378.
5. URL: <http://www.stresstech.fi/content/en/11501/460/460.html>
6. Антонов А. А., Морозов В. К., Чернышев Г. Н. Измерение напряжения методом голографирования возмущенной поверхности тела // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1988. № 3. С. 185–189.
7. Одинцев И. Н., Щепинов В. П., Щиканов А. Ю. Применение голографической интерферометрии для измерения остаточных напряжений методом зондирующего отверстия // Журнал технической физики. 2003. Т. 73. № 11. С. 106–110.
8. ГОСТ Р 52891–2007. Контроль остаточных технологических напряжений методом лазерной интерферометрии.
9. URL: <http://videoscan.ru/page/732>
10. Quiroga J. A., Servin M. Isotropic n-dimensional fringe pattern normalization // Opt. Comm. 224, 2003. P. 221–227.
11. Ковязин Р. Р. Двумерное восстановление фазы интерферограмм 267–275.
12. Quiroga J. A., Crespo D., Gomez-Pedrero J. A. Fringe Xtreme: XtremeFringe: state-of-art software for automatic processing of fringe patterns // Proc. SPIE 6616 66163-1-66163-10 (2007).

В. Н. Дианов¹, д-р техн. наук, проф.,
vuyaches'lav-dianov@yandex.ru,

Т. А. Гевондян², канд. физ.-мат. наук, доц.,

И. М. Белоусов¹, аспирант,

Е. С. Люминарская¹, аспирант,

¹ Московский государственный
индустриальный университет

² Пензенский филиал ВУНЦ СВ ОВА ВС РФ

Повышение информативности мехатронных систем при воздействии кодоимпульсных сигналов

На основе обнаруженных новых свойств пассивных элементов радиоэлектронной аппаратуры и по аналогии с понятием "безотказность" предложено новое понятие надежности — "бессбойность", устанавливающее связь между сбоями в аппаратуре и скрытыми дефектами в ней. Приведен пример обнаружения скрытых дефектов в катушках зажигания и асинхронных двигателях. Дана совокупность информативных признаков для обнаружения скрытых дефектов.

Ключевые слова: сбой, активная диагностика сбоев, информативные параметры сбоев, бессбойность, скрытый дефект

Введение

Развитие элементной базы, усложнение программного обеспечения решаемых задач и ужесточение условий эксплуатации современной аппаратуры (вычислительной техники, датчиков, исполнительных механизмов, оптико-телевизионных комплексов и т. д.) требуют совершенствования существующих и поиска новых подходов в повышении надежности. Особенно много проблемных вопросов возникает при создании высоконадежной аппаратуры для объектов ракетной, космической и авиационной техники, в частности, при обеспечении высоких требований безотказности и долговечности в условиях воздействия сверхнизких и сверхвысоких (до сотен градусов) температур и высоких уровней нагрузок [1]. Среди перечня отказов аппаратуры самыми проблемными для контроля и диагностики следует признать перемежающиеся отказы, называемые также кратковременными, скрытыми, плавающими, самоустраняющимися или мерцающими отказами. Такие отказы приводят к сбоям в работе всего оборудования и могут привести не только к существенным материальным потерям, но и к человеческим жертвам. Под сбоем понимают самоустраняющееся нарушение нормального функционирования аппаратуры вследствие кратковременных воздействий на некоторый элемент (или совокупность элементов) внешних и внутренних факторов.

После сбоя аппаратура длительное время может работать нормально, но при этом может быть ис-

кажена информация при операциях передачи, хранения или обработки.

Проблемой сбоев в аппаратуре как у нас в стране, так и за рубежом занимаются уже несколько десятков лет начиная с 60-х гг. XX в., но пока эта проблема полностью не решена. Более того, в последнее время ей уделяется повышенное внимание. Так, например, одной из важнейших характеристик автономной системы навигации в создаваемой сегодня международной станции является ее устойчивость к сбоям, причем приоритетность задач обеспечения высокой надежности по параметру сбоев выше приоритетности задач управления объектами, классически стоявших на первом месте по приоритетности [2].

При разработке аппаратуры, имеющей в своем составе большое (до нескольких десятков тысяч) число потенциальных источников сбоя (многоконтактные соединители, контактирующие устройства больших интегральных схем (БИС) и сверхбольших интегральных схем (СБИС), печатные проводники, линии связи — интерфейсные шины, шины электропитания и заземления и т. д.), ключевой проблемой кардинального повышения надежности является диагностика сбоев, непосредственно связанная с обнаружением и регистрацией источников сбоев в аппаратуре.

Анализ отечественных и зарубежных исследований по данному вопросу показал, что существуют многочисленные методы контроля, направленные на выявление и устранение не источников сбоя, а результатов их проявления, при этом устраняется не сама причина (в данном случае источник сбоев), а ее следствие (т. е. ошибка, вызванная сбоем), оставляя тем самым потенциальную возможность существования в аппаратуре скрытых дефектов [3—5].

Концептуальный подход

Принципиальная особенность новой концепции резкого повышения надежности аппаратуры за счет исключения воздействия на нее сбоев состоит в том, что, в отличие от всех ранее используемых подходов к решению данной проблемы, обнаруживаются и регистрируются не места сбоев, а источники сбоев [6]. В зависимости от принципов формирования и получения информативных признаков, по совокупности которых оценивается сбойное состояние элементов аппаратуры как источников сбоев, предложены различные методы обнаружения и регистрации источников сбоев (рис. 1), имеющие значительный отечественный приоритет [7].

Причинами сбоев в пассивных элементах (ПЭ) современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) могут быть как различные внешние воздействия (вибрации, силовые электрические поля, температурные и химические воздействия), так и многочисленные скрытые дефекты аппаратуры, ускоренно приводящие к ее деградации. Наиболее сложным для описания является такой важный элемент ап-

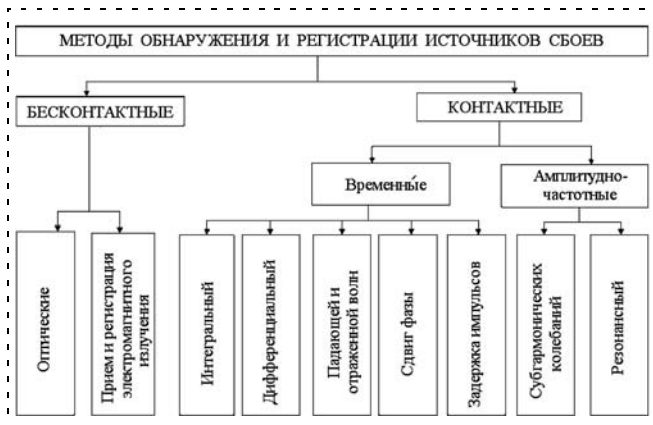


Рис. 1. Классификация методов обнаружения и регистрации источников сбоев

паратуры, как соединитель (электрический контакт). Современная теория представляет электрический контакт в виде колебательного контура с элементами R , L и C — соответственно омическим, индуктивным и емкостным сопротивлениями переходной зоны контактов (переходным сопротивлением) [4, 5]. Данные параметры, определяющие резонансные колебания в области высоких частот, зависят от множества факторов, трудно контролируемых при эксплуатации, и, следовательно, делают актуальной задачу интегральной и оперативной их оценки.

Диагностирование пассивных элементов РЭА как процесс определения их сбойного состояния включает решение трех задач: изучение пассивных элементов как объекта диагностирования сбоев; построение алгоритмов диагностирования сбоев; разработка средств диагностирования сбоев.

Теоретическое обобщение процесса диагностирования сбоев пассивных элементов РЭА при ограниченной информации об их техническом состоянии предопределяет использование формального описания ПЭ РЭА, т. е. их математической модели диагностирования. Эта модель должна обеспечивать диагностирование сбоев и быть пригодной для дальнейшего синтеза и реализации алгоритмов диагностирования.

При разработке математической модели диагностирования сбоев ПЭ РЭА приходится учитывать, что в ПЭ РЭА как в объекте диагностирования тесно взаимосвязаны механические, химические, физические, электрические и электромагнитные свойства элементов. При описании их технического состояния необходимо использовать соответствующие способы формализации процессов (дифференциальные, разностные и логические уравнения, структурные схемы, ориентированные графы и конечные автоматы).

Синтез разнородных математических моделей ПЭ РЭА предусматривает их общее описание как объекта диагностирования сбоев (скрытых дефектов). Наиболее целесообразным поэтому является

использование абстрактной динамической системы, процесс функционирования которой состоит в изменении состояния системы под воздействием внешних и внутренних причин. Математическая модель такой системы предложена в работе [7].

В соответствии с существующими нормами [8] одним из важнейших показателей качества является надежность технической системы (объекта). Вместе с тем, работа любой технической системы может характеризоваться ее качеством, под которым понимается совокупность свойств, определяющих способность системы выполнять определенные задачи [9]. В свою очередь, одной из характеристик надежности является безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени. Сбой в соответствии с ГОСТ — это самоустранимый отказ, поэтому очевидно, что в понятие "безотказность" входит и понятие "сбой". Таким образом, вводя активную диагностику сбоев (посредством фиксации их источников) через регистрацию промежуточного состояния ("предсбой") и различные информативные параметры, выводим понятие "сбой" в самостоятельную категорию — "бессбойность". Учитывая, что понятие качество оперирует с такими понятиями, как дефекты явные и неявные, т. е. не выявляемые по нормативно-технической документации (НТД), устанавливаем связь между сбойми и скрытыми дефектами [10]. Поэтому существующие основные показатели надежности технических систем целесообразно дополнить новым понятием "бессбойности". Введение этого понятия в качество, в частности, через измерения параметров сбоев бесконтактными и контактными методами позволит управлять им, используя тонкий (до 10...15 мкм) пограничный слой предсбойного состояния пассивных элементов аппаратуры. В соответствии с изложенным на рис. 2 надежность связана с качеством через бессбойность обратной связью (толстые линии).



Рис. 2. Новое свойство технических систем — бессбойность — и связь бессбойности с существующей структурой диагностики объектов (толстые линии)

Предложенное решение

Широко известными, т. е. используемыми в течение десятков лет и ставшими уже классическими, являются методы повышения надежности сложной современной аппаратуры с применением различных кодов [11—13]. К этим кодам, не потерявшим своей актуальности до наших дней, следует отнести коды Хемминга, Боуза—Чоудхури—Хоквингема, Рида—Соломона и др. Данные коды способны обнаруживать ошибки (как одиночные, так и многократные), определять места их проявления и исправлять в цифровой информации. Тем не менее, всем им присущ ряд недостатков, основными из которых являются следующие:

1) их "пассивность", заключающаяся в том, что они "работают" с отказами, т. е. с установившимися неисправностями, и невозможность "работать" по сбоям (самоустрашимым отказам);

2) непригодность (или функциональная ограниченность) при диагностике датчиков и исполнительных механизмов.

С этой точки зрения более универсальным и лишенным указанных недостатков является код Вьюшкова—Дианова, названный по фамилиям авторов, впервые предложивших его для решения задач прямого цифрового управления объектами [14]. Основная идея — "цифровизировать" объект (в данном случае — исполнительный механизм) и управлять им от цифровой машины, минуя цифроаналоговый преобразователь. Разработанная теория, основой которой явилось совместное рассмотрение преобразования сигналов как в частотной, так и во временной областях, позволила не только универсализировать управление от цифровой электронной вычислительной машины (ЭВМ) с любым числом разрядов, начиная с восьми (при меньшем числе цифровое или кодовое управление вырождается в число-импульсное или широтно-импульсное), но и оптимизировать его с точки зрения электрической нагрузки исполнительного механизма [15]. В частности, предложенный метод управления исполнительными механизмами, на-

званный *кодом импульсным управлением*, оказался эффективным как при управлении исполнительными двигателями малой (десятки и сотни ватт) мощности (летательные аппараты), так и большой (тысячи киловатт) мощности (блюминги, прокатные станы). Имеет место и другой важный параметр универсализации — тактовые частоты работающих ЭВМ (от низких частот до десятков и сотен мегагерц) и частот питающих напряжений нагрузки (от нулевых и низких (50-герцовых) частот до частот 400 и 1000 Гц). Характерен и тот факт, что данный метод обработки сигналов предложила в конце 80-х гг. XX в. одна из ведущих зарубежных фирм в области вычислительной и контрольно-диагностической аппаратуры — Хьюлетт-Паккард — и использовала его при построении сигнальных анализаторов [16, 17]. В общем виде код ЭВМ, "привязанный" к нагрузке, представляет совокупность единиц (импульсов) и нулей (отсутствие импульсов) и может иметь форму [18]

$$\underbrace{111\dots1}_{k_1} \underbrace{000\dots0}_{k_2} \underbrace{111\dots1}_{k_3} \dots \underbrace{111\dots1}_{k_{i+1}} \dots \underbrace{000\dots0}_{k_m},$$

$$\sum_{i=1}^m k_i = N,$$

где N — разрядность ЭВМ.

Данный код, "привязанный" к прямоугольным питающим импульсам напряжения, приведен на рис. 3. На этом рисунке наличие элементарного импульса длительностью T ($T = 1/F$, где F — тактовая частота процессора) соответствует логической единице, его отсутствие — логическому нулю. Период повторения кода (в данном случае кодовой последовательности) — T_c . В случаях, когда в качестве исполнительного механизма рассматривается катушка зажигания, двигатель переменного тока, трансформатор, в качестве элементарного импульса выбирается единичный синусоидальный импульс с частотой питающей сети нагрузки (например, 50 Гц).

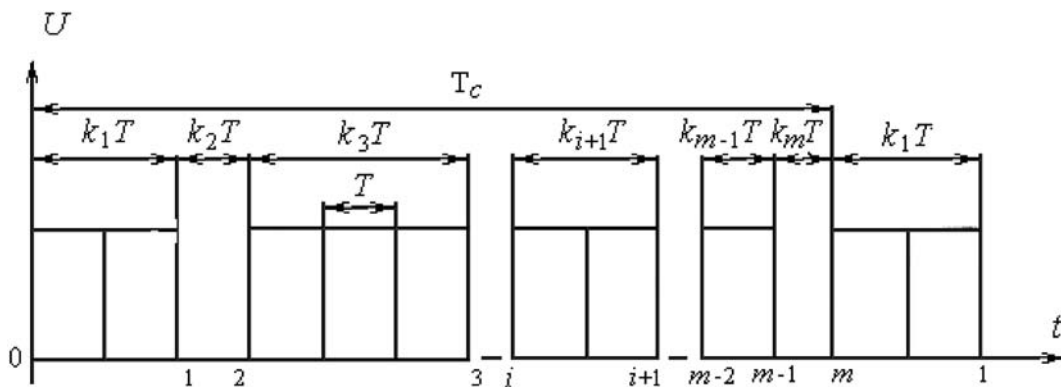


Рис. 3. Прямоугольное напряжение в виде кода, "привязанное" к коду ЭВМ и поступающее в исполнительный механизм

Математическая модель катушки зажигания с замкнутыми витками в первичной обмотке и кодоимпульсной модуляцией сигналов при их определении

При разработке математической модели катушки зажигания с замкнутыми витками были приняты следующие допущения.

1. Активные сопротивления всех витков первичной обмотки одинаковые и равны

$$R_1^* = \frac{R_1}{w_1},$$

где R_1 — сопротивление первичной обмотки; w_1 — число витков первичной обмотки.

2. Все витки первичной (вторичной) обмотки имеют одинаковый коэффициент пропорциональности между силой тока, проходящего через них, и создаваемым каждым витком магнитным потоком в первичной (вторичной) обмотке

$$k_1 = \frac{L_1}{w_1^2}, \quad k_2 = \frac{L_2}{w_2^2},$$

где L_1, L_2 — индуктивности первичной и вторичной обмоток.

3. Все витки первичной обмотки имеют одинаковый коэффициент пропорциональности между силой тока, проходящего через них, и создаваемым каждым витком магнитным потоком во вторичной обмотке

$$k_{12} = \frac{M}{w_1 w_2}.$$

4. Все витки первичной обмотки пронизывает одинаковый магнитный поток Φ_1 .

5. Все витки вторичной обмотки пронизывает одинаковый магнитный поток Φ_2 .

Рассмотрим математическую модель катушки зажигания при замыкании w_{13} витков в первичной обмотке. Обозначим ток, проходящий через каждый замкнутый виток i_{13} , тогда магнитные потоки, пронизывающие витки первичной и вторичной обмоток, будут равны

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= k_1(w_1 - w_{13})i_1 + k_1 w_{13} i_{13} + k_{12} w_2 i_2, \\ \Phi_2 &= k_{12}(w_1 - w_{13})i_1 + k_{12} w_{13} i_{13} + k_2 w_2 i_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где i_1, i_2 — токи, проходящие через первичную и вторичную обмотки.

На незамкнутых витках первичной обмотки наводится ЭДС, определяемая по формуле

$$E_{1H} = -(w_1 - w_{13}) \frac{d\Phi_1}{dt}. \quad (2)$$

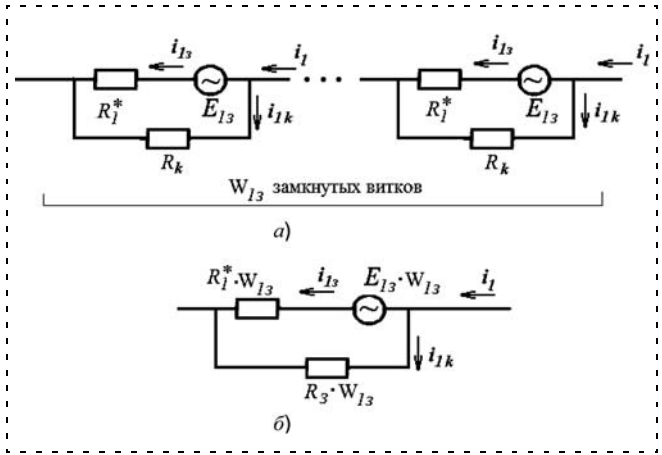


Рис. 4. Схемы замещения замкнутых витков

На каждом замкнутом витке первичной обмотки наводится ЭДС

$$E_{13} = - \frac{d\Phi_1}{dt}. \quad (3)$$

По аналогичной формуле вычисляется ЭДС, наводимая на витках вторичной обмотки

$$E_2 = -w_2 \frac{d\Phi_2}{dt}. \quad (4)$$

Схема замещения замкнутых витков представлена на рис. 4, а. В этой схеме предполагается, что через все замкнутые витки первичной обмотки проходит одинаковый ток i_{13} . Короткое замыкание витка учитывается параллельно включенным очень малым сопротивлением R_k , через которое проходит ток i_{13} .

Так как все замкнутые витки считаются одинаковыми, то рассматриваемая схема замещения может быть заменена схемой, изображенной на рис. 4, б. Такая эквивалентная замена позволяет значительно упростить программу расчета и сократить машинное время счета. Источник напряжения E_{13} вырабатывает переменное напряжение в соответствии с формулой (3).

Была разработана программа в MATLAB Simulink, моделирующая работу рассматриваемого объекта. По разработанной программе был составлен алгоритм и проведены расчеты среднего значения напряжения U_f^* за период кодоимпульсной последовательности для различных кодов и различным числе замкнутых витков в первичной обмотке.

Обнаружение скрытых дефектов в асинхронных двигателях

В настоящее время активно развивается механизация и автоматизация самых различных сфер общественного хозяйства, в результате чего растет число исполнительных механизмов, в частности, раз-

личных приводов на базе электрических двигателей. Важной инженерно-технической задачей является обеспечение бесшумной работы этих приводов.

Наиболее распространенный тип двигателя — асинхронный с короткозамкнутым ротором, такие двигатели обычно рассчитаны на 15...20 лет использования при условиях эксплуатации по нормам технических условий. Однако на практике срок эксплуатации двигателей и их узлов часто значительно меньше расчетного. Одной из причин является малая эффективность существующих способов и средств диагностического контроля [19].

К важным причинам, вызывающим повреждения асинхронного двигателя, относятся неполадки, связанные с работой электрооборудования. Среди них сетевые аварии, связанные со сбоями в питающей сети, токовые аварии, нарушения контактов и др. Основным типом электрических неисправностей асинхронного двигателя является повреждение обмотки статора (92 % от всех электрических аварий), в свою очередь, самым распространенным повреждением обмотки (свыше 90 % случаев) являются межвитковые замыкания, уменьшающие рабочий момент двигателя и ведущие к его выгоранию [20].

Традиционные схемы диагностирования, подразумевающие разбор и тщательный осмотр электрического двигателя, в условиях большого числа обслуживаемых устройств становятся неэффективными, поскольку эти операции должны проводиться специально обученным персоналом во избежание нарушения функциональных характеристик двигателя. Для решения этой проблемы можно применять различные методы автоматизированного неразрушающего контроля. В данной работе проводится сравнение следующих методов:

- 1) метод, основанный на последовательной проверке сопротивления фаз двигателя;
- 2) метод, основанный на оценке динамики разгона ротора [21];
- 3) метод, основанный на анализе вибрации двигателя [22];
- 4) метод, анализирующий силу тока в обмотках;
- 5) метод программного контроля, основанный на коде Вьюшкова—Дианова [18].

Оценка каждого метода проводится по таким параметрам, как возможность автоматического диагностирования (не требует наличия человека-опе-

ратора для проведения диагностики), сложность аппаратной части (требуется ли сложное оборудование для тестирования либо массив датчиков), способность обнаружения широкого спектра неисправностей (либо возможность распознавать только короткие замыкания в витках как наиболее распространенный тип неисправностей), способность непрерывного диагностирования (возможность осуществлять диагностический контроль без остановки двигателя), универсальность (возможность использовать метод с двигателями различной мощности и назначения). Данные сравнения представлены в сводной таблице.

1. Метод, основанный на последовательном измерении сопротивления фаз двигателя специальным тестером-омметром, является классическим методом определения межвитковых замыканий и широко используется в настоящее время различными организациями, на балансе которых состоит большое число электродвигателей (к числу таких организаций относится, например, Московский метрополитен). Метод обладает такими достоинствами, как простота использования и относительная дешевизна, а также универсальность, поскольку измерения несут относительный характер. Однако для проведения обследования требуется отключить двигатель от сети и последовательно проверить все его фазы, что не может не влиять на производительность. Значительную проблему при таком методе вызывает проверка двигателей, к которым затруднен физический доступ. Помимо этого обнаруживается только один тип неисправности (короткозамкнутые витки), а оператор должен обладать определенными навыками.

2. Метод, основанный на оценке динамики разгона ротора, позволяет определять различные типы неисправностей, обладает сравнительно простой аппаратной частью (датчиком служит обычный тахогенератор), однако требует снятия двигателя с работы и подключения его к диагностическому стенду. Кроме того, метод не обладает универсальностью, так как для каждой модели двигателя динамические характеристики разгона ротора существенно различаются.

3. Метод вибрационной диагностики позволяет с высокой точностью определять различные механические неисправности, однако требует сложного

Сводные данные сравнения методов диагностики асинхронных двигателей

Методы	Универсальность	Автоматическое диагностирование	Постоянное диагностирование	Простота аппаратной части	Широкий спектр обнаружения
Измерение сопротивления фаз	Да	Нет	Нет	Да	Нет
Измерение времени разгона	Нет	Нет	Нет	Да	Да
Оценка вибрации двигателя	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
Контроль силы тока в обмотке	Да	Да	Да	Нет	Нет
Программный контроль, основанный на методе Вьюшкова—Дианова	Да	Да	Да	Да	Нет

стенда и снятия двигателя с работы, что делает его достаточно эффективным, но излишне сложным методом.

4. Контроль силы тока в обмотке статора базируется на микроконтроллерной системе управления двигателем и позволяет сравнивать текущие значения тока в обмотке с эталонными, хранящимися в памяти микроконтроллера. Операции диагностирования могут происходить как по программным запросам, так и через механизмы прерывания — такой способ предпочтительнее, если после обнаружения признаков неисправности требуется быстрая остановка двигателя. Метод выявляет только неисправности обмоток статора, но делает это еще на стадии скрытого дефекта, когда число замкнутых витков еще не влияет на работоспособность двигателя. Аппаратная часть достаточно сложна и представляет собой три датчика тока (в оригинальном проекте, рассмотренном одним из авторов для шагового двигателя, датчик был один), снятие значений с которых и последующее оперирование ими проводится микроконтроллером, общим для системы управления и системы диагностики.

5. Метод, основанный на использовании кода Вьюшкова—Дианова, является программным и заключается в "прозвоне" обмотки электродвигателя кодоимпульсными последовательностями. При наличии в обмотке дефектов — короткозамкнутых витков — эти последовательности будут приниматься в искаженной форме, что позволяет определить число замкнутых витков. Метод универсален, его алгоритмы схожи для двигателей любой мощности, общий для систем управления и диагностики микроконтроллер обеспечивает постоянное автоматическое диагностирование двигателя. Недостатком является то, что проводится диагностирование только на предмет наличия короткозамкнутых витков, прочие неисправности такой метод не регистрирует.

Как видно из таблицы, по исследуемым характеристикам лучшим оказался метод на основе кода Вьюшкова—Дианова. Недостаток метода — невозможность обнаружения широкого спектра неисправностей. Он может быть устранен путем объединения метода с другим, например, с методом измерения времени разгона ротора, а также посредством включения в систему контактных и бесконтактных датчиков сбоев.

Заключение

При реализации предложенных методов диагностирования в современную аппаратуру необходимо учитывать следующие обстоятельства. Контактные и бесконтактные датчики сбоев, как и датчики любого другого типа, являются системами с жестко заданными физическими свойствами и техническими характеристиками. Основой современных тонкопленочных датчиков являются структуры из нано- и микроразмерных пленок, нанесенных на упругую деформируемую подложку. Точность и чув-

ствительность датчиков определяется морфологией, геометрией и свойствами как самой микро- или нанопленки, так и подложки. Для обеспечения успешного функционирования датчиков сбоев должны быть решены вопросы деформации упругих элементов — подложек сложной формы, влияния пиковых и ударных воздействий на параметры датчиков, выбора зон размещения датчиков в целях снижения погрешности измерений, связанных с нелинейностью протекающих физических процессов.

Воздействие датчика на исследуемую систему должно быть минимизировано путем решения проблемы малых добавок на наноуровне. К тому же, как показали экспериментальные исследования магнитных свойств потенциальных материалов датчиков, проведенные Л. П. Страховым и В. Ф. Сакашом с макро- и микрокластерами халькогенов высокой химической чистоты, начинает проявляться изменение магнитных свойств материалов, что неизбежно приводит к появлению дополнительных частот электромагнитных излучений, влияющих на работу чувствительных нанодатчиков сбоя [23]. Альтернативой развитию аппаратных средств обнаружения и регистрации источников сбоев является программный метод тестовых кодов (код Вьюшкова—Дианова).

Рассмотрены и предложены методы активной диагностики сбоев аппаратуры, позволяющие обнаруживать и регистрировать источники сбоев по совокупности новых информативных признаков. Методы интеллектуальной диагностики сбоев фиксируют скрытые дефекты датчиков и исполнительных механизмов как в функции сбойности кода ЭВМ, так и в параметрах самих объектов. Предложена концепция комплексного решения задачи повышения надежности и качества на основе "бес-сбойности", позволяющая осуществлять проектирование, создание и эксплуатацию аппаратуры на новом уровне. Приведены примеры обнаружения скрытых дефектов в катушках зажигания и асинхронных двигателях, а также использования нанотехнологий при изготовлении датчиков сбоев.

Авторы выражают благодарность академикам РАН В. К. Левину и Ю. Г. Евтушенко и члену-корреспонденту РАН П. П. Пархоменко за помощь и поддержку в развитии данного направления исследований.

Список литературы

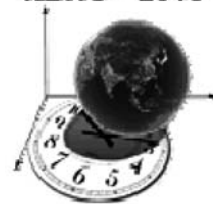
1. Андреев А. И., Баюков А. В. Проблемные вопросы создания высоконадежной радиоэлектронной аппаратуры для ракетной, космической и авиационной техники, вытекающие из требований комплекса государственных стандартов "Мороз-6". // Межд. НТК "Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных электронных и лазерных технологий". Матер. конф. Ч. 1. С. 45—47. Москва—Сочи, 2001.
2. Бодин А. Б., Дутов Е. Н., Почукаев В. Н. Задачи автономной системы навигации // Космонавтика и ракетостроение. 2000. С. 35—40.
3. Хольм Р. Электрические контакты. М.: ИИЛ, 1961.
4. Левин А. П. Контакты электрических соединителей радиоэлектронной аппаратуры. Расчет и конструирование. М.: Сов. радио, 1972.

5. **Кечиев Л. Н.** Расчет и конструирование многослойных печатных плат. М.: МИЭМ, 1983.
6. **Дианов В. Н.** Концептуальные особенности построения бесбойной аппаратуры // Автоматика и телемеханика. ИПУ РАН. 2012, № 7. С. 119—138.
7. **Дианов В. Н., Северцев Н. А., Евтушенко Ю. Г.** Свойство пассивных элементов радиоэлектронной аппаратуры увеличивать количество считываемой информации о системе под воздействием электрических колебаний. Открытие в области теории надежности, теории безотказности (диплом 47-S). Решение Президиума Российской Академии Естественных Наук от 23 декабря 2011 г.
8. **ГОСТ 27.002—89.** Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
9. **Машиностроение.** Энциклопедия. Раздел III. Технология производства машин. Том III — 7. Измерения, контроль, испытания и диагностика. М.: Машиностроение, 2001.
10. **Diakov V. N.** The concept of improving the reliability of non-destructive testing equipment // 10th Europ. Conf. on Non-Destructive Testing (ECNDT). Moscow, 2010. Abstracts. P. 2. P. 248—250.
11. **Контроль** функционирования больших систем / Под ред. Г. П. Шибанова. М.: Машиностроение, 1977.
12. **Соловьев Ю. А.** Системы спутниковой навигации. М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000.
13. **Кухарев А. Д., Кващенко В. В., Слепухин Ф. В.** Способ передачи информации с использованием адаптивного помехоустойчивого кодирования. Патент РФ № 2251814, МПК 7 H04 L 1/20, от 10.05.2005. Б. И. № 13.
14. **Вьюшков Ю. А., Дианов В. Н.** Асинхронный электропривод с широтно-импульсным управлением. Автор. свидет. СССР № 365789. Б. И. 1973. № 6.
15. **Дианов В. Н.** Исследование кодо-импульсного управления исполнительными асинхронными двухфазными двигателями. Автореф. дис. канд. техн. наук. М.: МАИ, 1973.
16. **Horneff Wilfried.** Die Frequenz-Zeit-Ebene-Eine neue Dimension. Elektron-Technol. Elektron-Anwend., Ekelectron-Market. 1989. № 9. P. 44—46.
17. **Плюшкин К. В., Саркисов А. А., Власов Д. В., Дианов В. Н.** Интеллектуальная диагностика сбоев исполнительных механизмов и датчиков с применением кода Вьюшкова—Дианова // Контроль, Диагностика. 2006. № 4 (94). С. 19—23.
18. **Синельников А. М., Боннет В. В.** Техническое обслуживание и эффективность диагностирования асинхронных электродвигателей // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. 2009. № 37. С. 94—95.
19. **Белоусов И. М., Дианов В. Н.** Устройство управления асинхронным электроприводом с обнаружением источников сбоев // Тр. межд. симпозиума "Надежность и качество". Пенза, 2010. Т. 2. С. 7—9.
20. **Синельников А. М., Боннет В. В.** Метод определения технического состояния асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в процессе пуска // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2010, № 4. С. 201—203.
21. **Красник В. М.** Вибродиагностика асинхронных двигателей // Технология машиностроения. 2010. № 4. С. 20—23.
22. **Сакаш В. Ф.** Исследование магнитных свойств макрокластеров халькогенов высокой чистоты. Автореф. канд. физ.-мат. наук. Л.: ЛГУ, 1981.

ИНФОРМАЦИЯ

с 15 по 19 апреля 2013 г. в Санкт-Петербурге
в Институте прикладной астрономии РАН состоится

КВНО - 2013



Пятая Всероссийская конференция

"ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ И ПРИКЛАДНОЕ КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННОЕ И НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ" (КВНО-2013)

Конференция приурочена к 25-летию создания Института прикладной астрономии РАН.

Основными задачами конференции являются обсуждение широкого круга научно-методических, технических и организационно-правовых вопросов в области фундаментального и прикладного координатно-временного и навигационного обеспечения.

Практическим выходом конференции будут рекомендации по повышению точности и надежности координатно-временного и навигационного обеспечения, эффективности совместного применения технических средств и систем КВНО

Председатель программного комитета конференции — академик РАН **Н. П. Лаверов**

Тематика конференции

- Теоретические основы фундаментального координатно-временного и навигационного обеспечения.
- Методы координатно-временного и навигационного обеспечения.
- Технические средства и системы координатно-временного и навигационного обеспечения.
- Программные средства, центры данных и распределенные центры обработки наблюдений и анализа данных.
- Международные программы и международное сотрудничество в области координатно-временного и навигационного обеспечения.
- Метрологическое обеспечение средств и систем координатно-временного и навигационного обеспечения: состояние и перспективы развития.
- Проблемные вопросы формирования и администрирования массовых услуг, основанных на применении КВНО.

Полную информацию о конференции можно найти на сайте ИПА РАН:
<http://www.ipa.nw.ru/conference/kvno2013/reg.html>

ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



Управление и информатика в авиакосмических и морских системах



Главный редактор:

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

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

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

Бронников А. М., Морозов Д. В.

Локализация непосредственно не наблюдаемых отказов бортовых систем на основе смешанных направленных графов . . . 62

**Пономаренко А. В., Василец В. М., Кулабухов В. С.,
Халтобин В. М., Грозов О. Б., Ключников А. А.**

Оценка автоматизированных учебных курсов авиационных систем обучения на основе метода анализа иерархий 66

А. М. Бронников, д-р техн. наук, нач. кафедры,
bronnikov_a_m@mail.ru,
ВУНЦ ВВС "ВВА им. профессора Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина, г. Москва,

Д. В. Морозов, адъюнкт,
stik-self@yandex.ru,
Военный авиационный инженерный университет,
г. Воронеж

Локализация непосредственно не наблюдаемых отказов бортовых систем на основе смешанных направленных графов*

Решается задача поиска места отказа бортовых систем по функциональным проявлениям. Для решения задачи используется способ локализации непосредственно не наблюдаемых отказов на основе смешанных направленных графов. В качестве примера рассматривается решение задачи определения места отказа в авиационном электрогидравлическом приводе с блоком управления и контроля.

Ключевые слова: смешанный граф, логическая модель, локализация отказов, электрогидравлический привод

Введение

Диагностирование технических систем включает в том числе поиск неисправностей, т. е. нахождение мест и возможных причин отказов, приведших к нарушению работоспособности или правильности функционирования объекта [1–3]. Под непосредственно не наблюдаемыми (далее — ненаблюдаемыми) отказами понимаются отказы подсистем, блоков, модулей или элементов технической системы (далее — объекта диагностирования (ОД)), которые не определяются непосредственно системами контроля или оператором. Возникновение ненаблюдаемого отказа в системе может приводить к нарушению ее работоспособности или нарушению правильности функционирования на всех либо отдельных режимах, а может и не приводить ни к каким проявлениям (например, при резервировании отказавшего элемента). Таким образом, под задачей локализации ненаблюдаемых отказов понимается поиск мест и возможных причин отказов по их внешним проявлениям.

В настоящее время большинство способов поиска ненаблюдаемых отказов в технических объектах основано на использовании в качестве диагностических моделей так называемых логических или булевых моделей [1, 2, 4]. Эти способы обладают рядом недостатков. К ним относятся значительные вычислительные затраты, невозможность получе-

ния корректного решения из-за неоднозначности получаемых результатов, невозможность получения решений в общем виде.

В работе [5] предложен логический метод распознавания ненаблюдаемых отказов, основанный на теории смешанных направленных графов. Его отличиями, во-первых, является применение триплексных логических моделей, когда элементы ОД находятся в одном из трех возможных состояний: работоспособен, неработоспособен и состояние элемента не определено. Во-вторых, для моделирования процессов распространения отказов используются специальные матричные конструкции, которые хотя и не являются алгебраическими объектами, но приспособлены для реализации в цифровых вычислителях. В результате авторам удалось предложить общий подход к решению задачи локализации ненаблюдаемых отказов. Этот подход не является полностью аналитическим. Решение получается на основе сочетания аналитических зависимостей и итерационного алгоритма. Однако данный подход позволяет получать решение задачи локализации отказов вне зависимости от размерности и структуры системы. Требуется только описать в специальном виде модель распространения отказа.

В данной статье метод локализации отказов [5] применен для решения задачи локализации отказов в цифровой системе контроля и управления электрогидравлического следящего привода.

Метод смешанных направленных графов

Принципиальной особенностью метода локализации отказов на основе смешанных направленных графов [5] является использование триплексных логических моделей. Элементы ОД могут находиться не в двух, как принято в булевой алгебре, а в трех состояниях: работоспособен, неработоспособен, состояние элемента не определено. Подробно с данным методом можно ознакомиться по работе [5]. Обозначим \mathbf{x} — n -мерный вектор состояний элементов, \mathbf{y} — m -мерный вектор состояний элементов, доступных для непосредственного контроля. Используется модель распространения отказов, описываемая следующими уравнениями:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{D}\mathbf{x}(k) + \mathbf{x}(0); \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{E}\mathbf{x}(k), \quad (2)$$

где \mathbf{D} (Dependency Matrix) — матрица, формализующая процесс распространения отказов по ОД; \mathbf{E} (Exit Matrix) — матрица формирования выходов, служащая для выделения из всех вершин смешанного графа только тех, которые соответствуют наблюдаемым проявлениям отказов; $\mathbf{x}(0)$ — вектор состояний отказов в условный момент времени 0; $\mathbf{y}(k)$ — вектор наблюдаемых проявлений отказов на предыдущем такте итерации; $\mathbf{x}(k)$, $\mathbf{x}(k+1)$ — векторы состояний на предыдущем и последующем такте итераций соответственно, k — номер дискретного интервала времени.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 11-08-01174-а.

Уравнение (1) описывает распространение влияния отказов от элемента к элементу, а уравнение (2) — внешнее проявление отказов.

Решение задачи заключается в обратном преобразовании модели (1), (2). Для этого используется понятие обратной Dependency Matrix (\mathbf{I}_D). Получить матрицу \mathbf{I}_D путем обращения матрицы \mathbf{D} невозможно. Хотя формула (1) внешне схожа с матричным уравнением, матрица \mathbf{D} не является алгебраическим объектом. Поэтому процедура обращения уравнения (1) выполняется на основе численного итерационного алгоритма. Алгоритм локализации отказов на основе смешанных направленных графов представлен на рис. 1 [5].

Основу общего алгоритма составляют шесть следующих частных алгоритмов:

- *Алгоритм 0* определяет начальное значение вектора \mathbf{x} по вектору проявления отказов \mathbf{y} , реализуя процедуру решения уравнения $\mathbf{y}(0) = \mathbf{E}\mathbf{x}(0)$ относительно вектора $\mathbf{x}(0)$. Результирующая формула имеет вид [5]:

$$\{\mathbf{x}(0)\}_\mu = (\mathbf{E})^T \mathbf{y}(0) + \overline{\mathbf{E}}^R \boldsymbol{\mu},$$

где все элементы вектора $\boldsymbol{\mu}$ (размера $(n - \text{rank} \mathbf{E})$) в дальнейшем представлены звездочками. Верхним

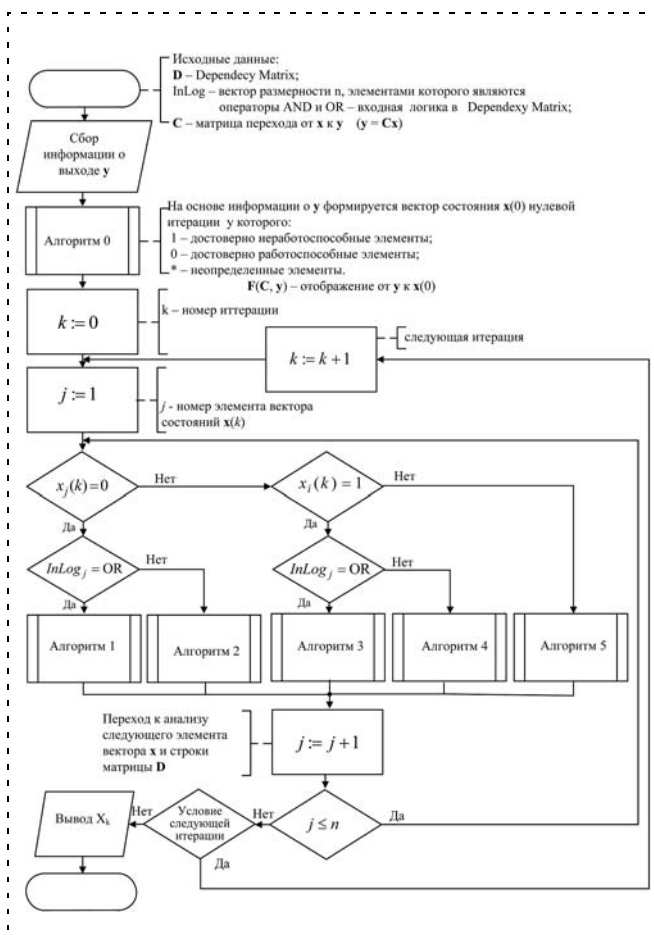


Рис. 1. Алгоритм локализации отказов на основе смешанных направленных графов

символом "т" обозначена операция транспонирования матрицы, верхней сплошной чертой с правым индексом "R" обозначен правый делитель нуля максимального ранга матрицы \mathbf{E} ($\mathbf{E}\overline{\mathbf{E}}^R = \mathbf{0}_{m \times (n - \text{rank} \mathbf{E})}$). Подробную информацию о делителях нуля матриц можно получить из монографии [6];

- *Алгоритм 1* определяет в j -м столбце матрицы \mathbf{I}_D единичные элементы и присваивает соответствующим им элементам вектора \mathbf{x} нулевое значение;
- *Алгоритм 2* находит в j -м столбце матрицы \mathbf{I}_D единичные элементы, проверяет значения соответствующих им элементов вектора \mathbf{x} . Если среди них все значения равны единице, а одно значение не определено (*), то неопределенному значению присваивается нулевое значение;
- *Алгоритм 3* находит в j -м столбце матрицы \mathbf{I}_D единичные элементы, проверяет значения соответствующих им элементов вектора \mathbf{x} . Если среди них все значения равны нулю, а одно значение не определено (*), то неопределенному значению присваивается единица.
- *Алгоритм 4* находит в j -м столбце матрицы \mathbf{I}_D единичные элементы и присваивает соответствующим им элементам вектора \mathbf{x} единичные значения;
- *Алгоритм 5* использует возможности прямого преобразования с помощью матрицы \mathbf{D} для уточнения элемента $X_j(k)$

$$X_j(k) = \mathbf{D}_j \mathbf{X}(k).$$

При этом реализуется следующая логика: если $\text{InLog}_j = \text{OR}$ и среди входных элементов $X_j(k)$ есть хотя бы одна единица, то $X_j(k)$ присваивается 1; если $\text{InLog}_j = \text{AND}$ и среди входных элементов $X_j(k)$ есть хотя бы один ноль, то $X_j(k)$ присваивается 0; если все входные значения определены, то $X_j(k) = \mathbf{D}_j \cdot \mathbf{X}(k)$. В противном случае $X_j(k)$ остается без изменения: $X_j(k) = *$.

Условие останова выполняется, если $\mathbf{X}(k) = \mathbf{X}(k - 1)$ или выполнено $2n$ и более шагов.

На возможные места достоверных отказов указывают получающиеся единичные значения компонент вектора состояния \mathbf{x} . Наличие нулевых элементов указывает на достоверно работоспособные элементы системы. Наличие звездочек (*) указывает на те элементы или блоки системы, по которым на основе располагаемой информации о проявлении отказов и о структуре системы не может быть сформулировано категоричное утверждение об отказе или исправности. В этом проявляется присутствующая системе неполнота контроля.

При наличии программного обеспечения, реализующего описанный выше алгоритм локализации отказов, решение задачи поиска отказов сводится к составлению уравнений (1), (2), а также внесению элементов матриц \mathbf{E} и \mathbf{D} в память вычислителя. После этого по входному сигналу \mathbf{y} , формируемому системой контроля, вычислитель определяет со-

Перечень отказов электрогидравлического привода

№ п/п	Наименование отказа	Код	Логика формирования отказа
1*	Выход за допуск сигнала Узад1	x_1	$x_{55} \text{ or } x_{59}$
2*	Выход за допуск сигнала Узад2	x_2	$x_{56} \text{ or } x_{60}$
3*	Выход за допуск сигнала Узад3	x_3	$x_{57} \text{ or } x_{61}$
4*	Выход за допуск сигнала Узад4	x_4	$x_{58} \text{ or } x_{62}$
5*	Выход за допуск сигнала ДОС РА резерв 1	x_5	$x_{35} \text{ or } x_{39} \text{ or } x_{43} \text{ or } x_{47} \text{ or } x_{73}$
6*	Выход за допуск сигнала ДОС РА резерв 2	x_6	$x_{36} \text{ or } x_{40} \text{ or } x_{44} \text{ or } x_{48} \text{ or } x_{73}$
7*	Выход за допуск сигнала ДОС РА резерв 3	x_7	$x_{37} \text{ or } x_{41} \text{ or } x_{45} \text{ or } x_{49} \text{ or } x_{74}$
8*	Выход за допуск сигнала ДОС РА резерв 4	x_8	$x_{38} \text{ or } x_{42} \text{ or } x_{46} \text{ or } x_{50} \text{ or } x_{74}$
9*	Выход за допуск сигнала ДОС ЭГУ рез. 11	x_9	$x_{43} \text{ or } x_{47} \text{ or } x_{63} \text{ or } x_{75} \text{ or } x_{82} \text{ or } x_{90}$ $\text{or } x_{92} \text{ or } x_{100} \text{ or } x_{108} \text{ or } x_{113} \text{ or } x_{115}$
10*	Выход за допуск сигнала ДОС ЭГУ резерв 12	x_{10}	$x_{43} \text{ or } x_{47} \text{ or } x_{63} \text{ or } x_{75} \text{ or } x_{82} \text{ or } x_{90}$ $\text{or } x_{92} \text{ or } x_{101} \text{ or } x_{108} \text{ or } x_{113} \text{ or } x_{115}$
...
35	Обрыв сигнальной обмотки ДОС РА 1	x_{35}	...
...
39	Обрыв обмотки питания ДОС РА 1	x_{39}	...
...
43	Отказ модуля питания (МП) БКУ1	x_{43}	...
...
73	Разрушение вала 1 ДОС РА	x_{73}	...
74	Разрушение вала 2 ДОС РА	x_{74}	...
...
96	Разрушение вала 1 ДОС РА и 2 ДОС РА	x_{96}	$x_{73} \& x_{74}$
118	МУКК БКУ3 и МУКК БКУ4 обнулили напряжение ЭКГ	x_{118}	$x_{88} \& x_{89}$
119	Обрыв обмотки ЭКГ рез. 1	x_{119}	
120	Обрыв обмотки ЭКГ рез. 2	x_{120}	
121	Обрыв обмотки ЭКГ рез. 3	x_{121}	
122	Обрыв обмотки ЭКГ рез. 4	x_{122}	

(*) – функциональные отказы (проявляемые).

алгоритм, осуществляется автоматический поиск отказавших элементов по функциональным проявлениям.

Рассмотрим несколько примеров.

Примером хорошо локализуемого единичного отказа может служить отказ модуля питания МП БКУ 1 ($x_{43} = 1$). Проявление такого отказа заключается в одновременном выходе за допуски сигналов обратной связи с ДОС РА 1 ($y_5 = x_5 = 1$), ДОС ЭГУ рез. 11 ($y_9 = x_9 = 1$) и ДОС ЭГУ рез. 12 ($y_{10} = x_{10} = 1$), определяемые в МК ДОС РА и МК ДОС ЭГУ.

При этом происходит отказ датчиков обратной связи ДОС РА 1, ДОС ЭГУ рез. 11, ДОС ЭГУ рез. 12. Для оценки правильности работы алгоритма проведем инженерный анализ возможных причин одновременного выхода данных сигналов ДОС РА 1, ДОС ЭГУ рез. 11 и ДОС ЭГУ рез. 12 за допуск. Причиной одновременного выхода данных сигналов за допуск в соответствии с рис. 2 может являться одновременный обрыв сигнальных обмоток или обмоток питания датчиков (что маловероятно), или отказ МП БКУ1, или отказ АЦП БКУ1, или отказ БКУ1, или отказ МО12.

Теперь рассмотрим результаты работы алгоритма локализации. Алгоритм локализации в данном случае по выходам $y_5 = 1$, $y_9 = 1$ и $y_{10} = 1$ достоверно определяет отказавший элемент:

$x_{43} = 1$ ("отказ МП БКУ1").

Примером плохо локализуемого единичного отказа может служить обрыв сигнальной обмотки ДОС РА 1 ($x_{35} = 1$). Проявление такого отказа заключается в выходе за допуск сигнала ДОС РА рез. 1 ($y_5 = x_5 = 1$), определяемого МК ДОС РА. При проведении инженерного анализа возможных причин выхода сигнала ДОС РА 1 за допуск приходим к выводу, что причиной выхода данного сигнала за допуск (в соответствии с рис. 2) может являться как обрыв сигнальной обмотки ДОС РА 1, так и обрыв обмотки питания ДОС РА 1. Таким образом, локализация данного отказа приводит к неоднозначности.

Теперь рассмотрим результаты работы алгоритма локализации.

Алгоритм локализации по входу $y_5 = 1$ в данном случае определяет состояние:

$x_{35} = *$ ("Обрыв сигнальной обмотки ДОС РА 1" — "Состояние не определено");

$x_{39} = *$ ("Обрыв обмотки питания ДОС РА 1" — "Состояние не определено").

Работа алгоритма соответствует результатам инженерного анализа причин выхода за допуск сигнала ДОС РА рез. 1.

Примером хорошо локализуемого множественного отказа может служить разрушение обоих валов блока ДОС РА ($x_{96} = 1$). Проявление такого отказа заключается в одновременном выходе за допуски

сигналов обратной связи ДОС РА рез. 1 ($y_5 = x_5 = 1$), ДОС РА рез. 2 ($y_6 = x_6 = 1$), ДОС РА рез. 3 ($y_7 = x_7 = 1$), ДОС РА рез. 4 ($y_8 = x_8 = 1$), определяемые в МК ДОС РА. При проведении инженерного анализа возможных причин одновременного выхода данных сигналов за допуск приходим к выводу, что причиной может являться разрушение "Вал 1 ДОС РА" ($x_{73} = 1$) и "Вал 2 ДОС РА" ($x_{74} = 1$).

Рассмотрим результаты работы алгоритма локализации. Алгоритм локализации по входу $y_5 = 1$, $y_6 = 1$, $y_7 = 1$, $y_8 = 1$ определяет состояние:

$x_{73} = 1$ ("Разрушение вала 1 ДОС РА");

$x_{74} = 1$ ("Разрушение вала 2 ДОС РА").

Работа алгоритма соответствует результатам инженерного анализа причин одновременного выхода за допуск сигналов ДОС РА рез. 1, ДОС РА рез. 2, ДОС РА рез. 3, ДОС РА рез. 4.

Заключение. На примере электрогидравлического привода с блоком контроля и управления показана методика применения и продемонстрирована практическая эффективность метода локализации отказов на основе смешанных направленных графов [5]. Данный метод ввиду его простоты и вычислительной экономичности целесообразно ис-

пользовать для локализации отказов в сложных бортовых системах, в том числе при наличии ограничений на время определения информации о месте отказа.

Список литературы

1. Глушенко П. В. Техническая диагностика. Моделирование в диагностировании и прогнозировании состояния технических объектов. М.: Вузовская книга, 2004. 248 с.
2. Биргер И. А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
3. ГОСТ 20911—89. Техническая диагностика. Термины и определения.
4. Колодежный Л. П., Чернодаров А. В. Надежность и техническая диагностика: учебник для слушателей и курсантов ВУЗов ВВС. М.: Изд. ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, 2010. 432 с.
5. Буков В. Н., Бронников А. М., Сельвесюк Н. И. Алгоритм локализации отказов бортового комплекса на основе смешанных направленных графов // Проблемы безопасности полетов. 2010. № 2. С. 57—71.
6. Буков В. Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. Калуга: Изд-во науч. лит-ры Н. Ф. Бочкаревой, 2006.
7. Редько П. Г. Гидравлические агрегаты и приводы систем управления полетом летательных аппаратов: Информационно-справочное пособие. М.: 2004. 471 с.

УДК 37.01.004 (06)

А. В. Пономаренко, д-р техн. наук, нач. отделения,
В. М. Василец, д-р техн. наук, проф., гл. специалист,
rskmig@rambler.ru,

ОАО "РСК "МиГ", г. Москва,

В. С. Кулабухов, канд. техн. наук, гл. конструктор,
ОАО МНПК "Авионика", г. Москва,

В. М. Халтобин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

О. Б. Грозов, канд. техн. наук, нач. лаб.,

А. А. Ключников, преподаватель,

Военный учебно-научный центр ВВС

"Военно-воздушная академия им. профессора
Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", г. Москва

Оценка автоматизированных учебных курсов авиационных систем обучения на основе метода анализа иерархий

Рассмотрена задача оценки автоматизированных учебных курсов на основе метода анализа иерархий в целях сравнения и апробации новых информационных учебных технологий. В качестве примера автоматизированных систем обучения рассмотрена интерактивная автоматизированная система обучения ИАСО-29, разработанная в КБ им. А. И. Микояна в сотрудничестве с ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского.

Ключевые слова: анализ иерархий, метод Саати, автоматизированные учебные курсы (АУК), попарные сравнения

Метод анализа иерархий (МАИ) в настоящее время широко используется при решении многокритериальных задач для сложных систем с иерархическими структурами и представляет собой математический инструмент системного подхода к проблемам принятия решений. Этот метод разработан Т. Саати [1] в 1970—1980 гг.

Метод анализа иерархий (метод Саати) — основа для решения многокритериальных задач

Метод анализа иерархий используется для принятия решений в бизнесе, промышленности, здравоохранении, образовании и др. областях, например, для составления прогнозов развития образования, сравнения национальных богатств и потребителей энергии ряда стран, сравнения автомобилей и др. [1, 2]. МАИ позволяет структурировать сложные проблемы принятия решений, например, при сравнении автоматизированных учебных курсов (АУК) и автоматизированных систем обучения (АСО), сформировать иерархии, сравнить и выполнить количественную оценку альтернативных вариантов решения. Анализ проблемы принятия решений в МАИ начинается с построения иерархической структуры, которая включает цель, критерии, альтернативы и другие факторы, влияющие на выбор решения. Центральный вопрос иерархии — насколько сильно влияют отдельные свойства, параметры иерархии на ее вершину (в нашем случае, на качество АСО, АУК).

Следующим этапом анализа является определение параметров, приоритетов, представляющих относительную важность или предпочтительность элементов построенной иерархической структуры, с помощью процедуры парных сравнений этих параметров. Парные сравнения значений параметров, критериев и заключения экспертов о весах параметров являются основой метода анализа иерархий Саати. На заключительном этапе анализа выполняется синтез (линейная свертка) приоритетов на иерархии, в результате чего вычисляются приоритеты альтернативных решений относительно главной цели. Лучшей считается альтернатива с максимальным значением приоритета. Итак, главными особенностями метода Саати являются:

- решения экспертов о значимости критериев, параметров систем с возможностью проверки этих решений на непротиворечивость;
- попарные сравнения значимости и значений введенных параметров;
- высокая строгость математической обработки данных, базирующейся на методе матричного анализа.

Важным компонентом метода МАИ является матрица суждений, в которой значения элементов формируются на основе решений экспертов:

$$P = (p_{ij}), i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где p_{ij} — число, соответствующее значимости объекта i по сравнению с j объектом (объектами могут быть параметры, критерии, средства и др.). Под иерархией понимают систему связанных уровней, каждый из которых состоит из многих элементов. В автоматизированных системах обучения, например, уровнями могут быть учебные кадры, темы, автоматизированные учебные курсы (АУК). Основы метода анализа иерархий изложены в работах [1–3].

Основные особенности ИАСО-29

Количественные параметры АУК сформированы на основе анализа данных АУК ИАСО-29 обучения летного и инженерно-технического состава самолета МиГ-29 [5, 6]. Аналогичные системы в России разработаны и для других самолетов. Таким образом, существуют десятки АСО и сотни АУК для изучения авиационной техники. При выборе и разработке АСО и АУК требуются методы, способы для их сравнения и оценки. Кратко рассмотрим особенности построения ИАСО-29.

Современные АУК и АСО являются по своей сути *суггестивными*, так как их дидактические элементы активно воздействуют на воображение, эмоции и подсознание обучаемого посредством образов, звуков, ассоциаций и могут обеспечить приобретение обучаемыми как теоретических знаний, так и в определенном объеме необходимых практических умений и навыков. Следует отметить, что авиационные АСО при правильном использовании дидактических средств позволяют обеспечить креативность обучения и достичь в технологиях обучения свойства *акмеизма* (греч. "акме" — высшая степень чего-либо), т. е. предельно достижимого качества обучения. АСО могут быть реализованы как на одиночных ЭВМ, так и на ЭВМ, объединенных в сеть, имеющих локальный или территориально-распределенный характер (при использовании сети Internet). АУК могут использоваться при взаимодействии с процедурными тренажерами и полнофункциональными тренажерами, с системами поддержки обслуживания авиационной техники [2].

Последняя версия интерактивной автоматизированной системы обучения ИАСО-29 предназначена для теоретической и практической подготовки летного и инженерно-технического состава и решения комплекса задач, связанных с эксплуатацией и обслуживанием самолетов-истребителей серии "МиГ-29". На сегодняшний день это сложная клиент-серверная система, состоящая из набора авторских программных продуктов. Ее ядром является система управления процессом обучения. Эта система в процессе своего функционирования использует базу данных, в которой хранятся данные по десяткам АУК, более чем по сотне учебных тем и данные по успеваемости всех обучаемых [5, 6]. На рис. 1

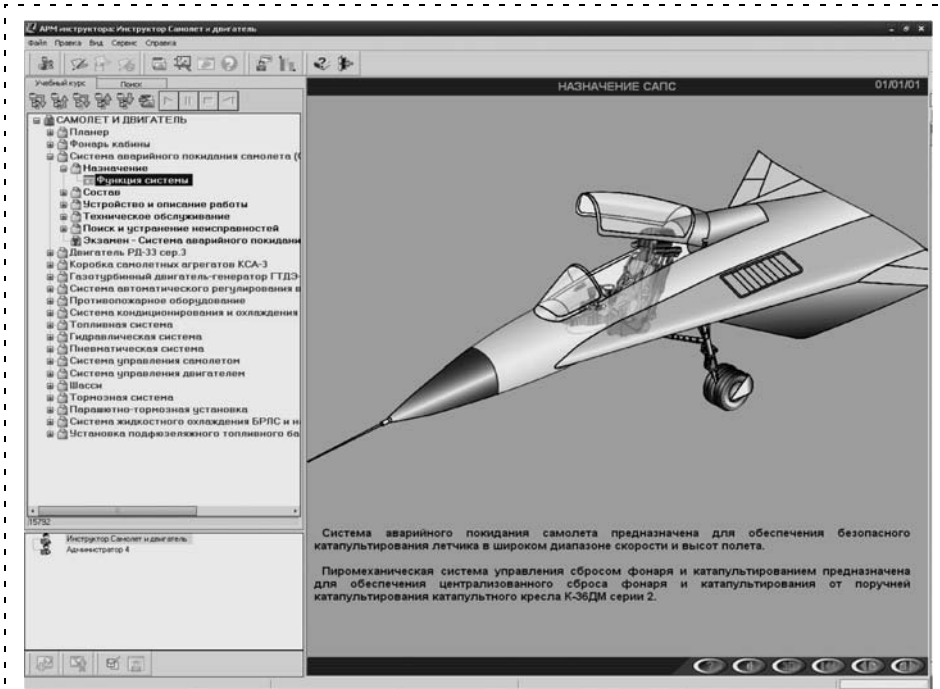


Рис. 1. Пример интерфейса одного из учебных кадров ИАСО-29

приведен пример интерфейса одного из учебных кадров ИАСО-29.

В состав ИАСО-29 входят следующие типы рабочих мест:

- ♦ автоматизированное рабочее место инструктора (преподавателя) (АРМИ);
- ♦ автоматизированное рабочее место обучаемого (АРМО) и
- ♦ автоматизированное рабочее место системного программиста.

Для проведения различных видов занятий и их подготовки в АРМИ, например реализованы следующие функции:

- дистанционного контроля инструктором обучаемых;
- проецирования учебных кадров с АРМИ на экран коллективного использования и на экраны АРМО;
- связи АРМИ с любым АРМО посредством обмена сообщениями;
- создания и подключения контрольных вопросов.

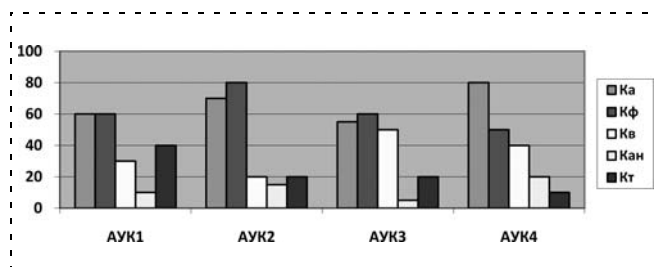


Рис. 2. Диаграмма распределения параметров сравниваемых АУК

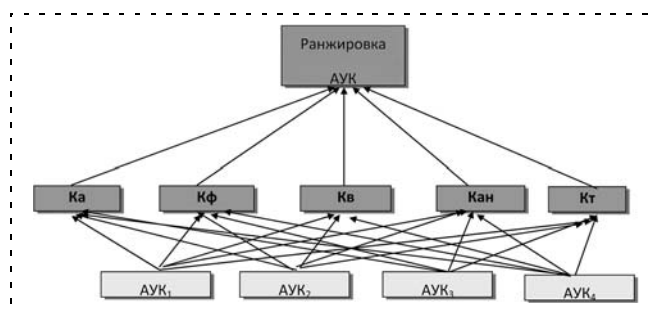


Рис. 3. Схема простейшей иерархии при выборе наилучшего АУК

Таблица 1

Параметры сравниваемых АУК

АУК	ДЭ				
	$K_{ау}$	$K_{ф}$	$K_{в}$	$K_{ан}$	$K_{т} \times 10^2$
АУК1	60	60	30	10	40
АУК2	70	80	20	15	20
АУК3	55	60	50	5	20
АУК4	80	50	40	20	10

Примечание. $K_{ау}$, $K_{ф}$, $K_{в}$, $K_{ан}$, $K_{т}$ — число аудиосюжетов, фотографий, видеосюжетов, анимаций, знаков в тексте соответственно.

Примерами АУК ИАСО-29 являются:

- пилотажно-навигационное оборудование;
- радиотехническое и радиосвязное оборудование;
- системы электропитания (постоянного и переменного тока).

Из перечисленного очевидно, что сравнение авиационных АУК является весьма сложной многопараметрической задачей.

Параметры сравниваемых АУК и схема простейшей иерархии при их оценке

Пусть имеем какие-то близкие по показателям четыре АУК: АУК1, АУК2, АУК3, АУК4. В табл. 1 и на рис. 2 приведены параметры этих курсов. Необходимо провести ранжировку АУК и определить лучший курс. Рассмотрим многокритериальный выбор АУК при простейшей иерархии. АУК будем оценивать по пяти введенным параметрам: числу аудиосюжетов, фотографий, видеосюжетов, анимаций, знаков в тексте.

На рис. 3 показана простейшая иерархия для этой задачи. Простейшая иерархия содержит три уровня: цель, критерии и альтернативы. Приоритеты альтернатив вычисляются путем линейной свертки локальных приоритетов всех элементов.

Анализируя данные табл. 1 и диаграмму на рис. 2, можно сделать вывод, что на основе исходных данных практически невозможно выбрать лучший АУК и, тем более, провести количественную ранжировку АУК.

Алгоритм решения задачи МАИ и оценка эффективности АУК

Разработанный алгоритм решения задачи для оценки АУК состоит из следующих этапов:

1. Нахождение вектора весов выбранных параметров и оценка согласованности матрицы суждений экспертов.
2. На основе матрицы параметров АУК формирование матриц их попарного сравнения.
3. Вычисление собственных векторов матриц результатов попарного сравнения.
4. Определение оценок эффективности АУК.

Метод анализа иерархий содержит процедуру синтеза приоритетов, вычисляемых на основе субъективных суждений экспертов.

1. Нахождение вектора весов выбранных параметров и оценка согласованности матрицы суждений экспертов

Для нахождения вектора весов (приоритетов) параметров АУК формируется матрица A попарных весов выбранных параметров. Эта матрица вычисляется экспертами для конкретных задач АУК на основе попарного сравнения выбранных параметров. Пример результатов работы экспертов по попарному сравнению выбранных параметров приведен в табл. 2.

На основе данных табл. 2 запишем матрицу A весов параметров:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0,5 & 0,25 & 2 \\ 0,5 & 1 & 0,25 & 1,5 & 3 \\ 2 & 4 & 1 & 0,8 & 7 \\ 4 & 0,67 & 1,25 & 1 & 3 \\ 0,5 & 0,33 & 0,14 & 0,33 & 1 \end{bmatrix}$$

Отметим, что матрица A является обратно симметричной квадратной матрицей. Для нахождения вектора приоритетов параметров необходимо вычислить собственные значения матрицы A и собственный вектор матрицы A , соответствующий ее максимальному собственному значению (МСЗ), для чего используем пакет MatCad.

После нормировки собственного вектора получим вектор X приоритетов (весов) выбранных параметров (рис. 4).

На основе вычисленного вектора приоритетов видно, что наибольший приоритет (вес) по мнению экспертов имеет число видеосюжетов, наименьшее значение — число знаков в тексте в АУК. Кроме того, он показывает количественное соотношение весов параметров АУК.

Определив вектор приоритетов, необходимо оценить согласованность матрицы суждений экспертов. Для этого используется главное собственное значение λ_{\max} этой матрицы. Чем ближе λ_{\max} к размерности матрицы суждений (n), тем более согласованы мнения экспертов.

Таблица 2

По парные веса параметров АУК по оценкам экспертов

Параметр	Параметр				
	Ау	Ф	В	Ан	Т
Ау	1	2	0,5	0,25	2
Ф	0,5	1	0,25	1,5	3
В	2	4	1	0,8	7
Ан	4	0,67	1,25	1	3
Т	0,5	0,3	0,14	0,33	1

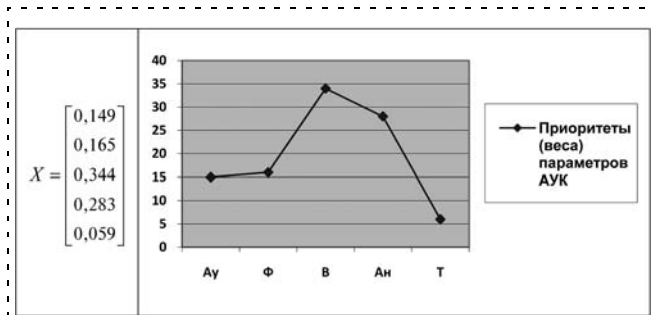


Таблица 3

Случайные индексы для матриц до 10-го порядка

Размер матрицы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Случайные индексы	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Отклонение от согласованности оценивается значением индекса согласованности (ИС): $ИС = (\lambda_{\max}(A) - n)/(n - 1)$. Для рассматриваемых условий $ИС = 0,158$. Индекс согласованности, сгенерированный случайным образом для обратно симметричной матрицы, называется случайным индексом (СИ). Вычислены СИ для матриц до 10-го и более порядка (табл. 3) [1].

СИ увеличивается с увеличением порядка матрицы. В нашем случае (5-й порядок матрицы) СИ равен 1,12. Отношение ИС к среднему СИ для матрицы того же порядка называется *отношением согласованности (ОС)*. Значение ОС, меньшее или равное 0,10, принято считать допустимым. В некоторых случаях допускается ОС до 0,2, но не более, иначе необходимо проверять суждения экспертов. ОС в рассматриваемом случае равно 0,14, что для практики обычно является приемлемым и свидетельствует о достаточно хорошей согласованности мнений экспертов.

2. Формирование матриц результатов попарного сравнения АУК на основе матрицы параметров АУК

Матрица M_{Π} параметров АУК, составленная на основе данных табл. 1, имеет следующий вид:

$$M_{\Pi} = \begin{bmatrix} 60 & 60 & 30 & 10 & 40 \\ 70 & 80 & 20 & 15 & 20 \\ 55 & 60 & 50 & 5 & 20 \\ 80 & 50 & 40 & 20 & 10 \end{bmatrix}$$

Проведя попарные сравнения АУК по введенным параметрам, получаем следующие матрицы попарного сравнения по числу аудиосюжетов ($M_{Ау}$), фотографий ($M_{Ф}$), видеосюжетов ($M_{В}$), анимаций ($M_{Ан}$), текста ($M_{Т}$):

$$M_{Ау} = \begin{bmatrix} 1 & 60/70 & 60/55 & 60/80 \\ 70/60 & 1 & 70/55 & 70/80 \\ 55/60 & 55/70 & 1 & 55/80 \\ 80/60 & 80/70 & 80/55 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M_{Ф} = \begin{bmatrix} 1 & 60/80 & 1 & 60/50 \\ 80/60 & 1 & 80/60 & 80/50 \\ 1 & 60/80 & 1 & 60/50 \\ 50/60 & 50/80 & 50/60 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M_B = \begin{bmatrix} 1 & 1,5 & 30/50 & 30/40 \\ 20/30 & 1 & 0,4 & 0,5 \\ 50/30 & 50/20 & 1 & 50/40 \\ 40/30 & 2 & 0,8 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M_a = \begin{bmatrix} 1 & 10/15 & 2 & 0,5 \\ 1,5 & 1 & 3 & 15/20 \\ 0,5 & 5/15 & 1 & 5/20 \\ 2 & 20/15 & 4 & 1 \end{bmatrix}; M_T = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 4 \\ 0,5 & 1 & 1 & 2 \\ 0,5 & 1 & 1 & 2 \\ 0,25 & 0,5 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}.$$

3. Вычисление собственных векторов сформированных матриц результатов попарного сравнения

После вычисления собственных чисел перечисленных выше матриц M_{ay} , M_{ϕ} , M_B , M_a , M_T определяют собственные векторы E этих матриц для их максимальных собственных чисел. Подстрочные индексы в обозначениях собственных векторов соответствуют индексам соответствующих матриц:

$$E_{ay} = \begin{bmatrix} 0,448 \\ 0,523 \\ 0,411 \\ 0,598 \end{bmatrix}; E_{\phi} = \begin{bmatrix} 0,473 \\ 0,63 \\ 0,473 \\ 0,394 \end{bmatrix}; E_B = \begin{bmatrix} 0,408 \\ 0,272 \\ 0,68 \\ 0,544 \end{bmatrix};$$

$$E_a = \begin{bmatrix} 0,365 \\ 0,548 \\ 0,183 \\ 0,73 \end{bmatrix}; E_T = \begin{bmatrix} 0,8 \\ 0,4 \\ 0,4 \\ 0,2 \end{bmatrix}.$$

4. Определение оценок эффективности АУК

Вектор $O_{эфф}$, компоненты которого представляют собой сравнительные оценки эффективности АУК, определяется выражением

$$O_{эфф} = MX,$$

где

$$M = \begin{bmatrix} 0,448 & 0,473 & 0,408 & 0,365 & 0,8 \\ 0,523 & 0,63 & 0,272 & 0,548 & 0,4 \\ 0,411 & 0,473 & 0,68 & 0,183 & 0,4 \\ 0,598 & 0,394 & 0,544 & 0,73 & 0,2 \end{bmatrix}$$

— матрица, столбцы которой представляют собой найденные собственные векторы матриц для их максимальных собственных чисел;

$X = [0,149 \ 0,165 \ 1,344 \ 0,283 \ 0,059]^T$ — вектор приоритетов выбранных параметров.

После перемножения матриц M и X , проведя нормировку $O_{эфф}$, получаем относительные сравнительные оценки эффективности АУК (рис. 5).

Как видно из полученных результатов, наибольшее значение из компонент вектора оценок АУК

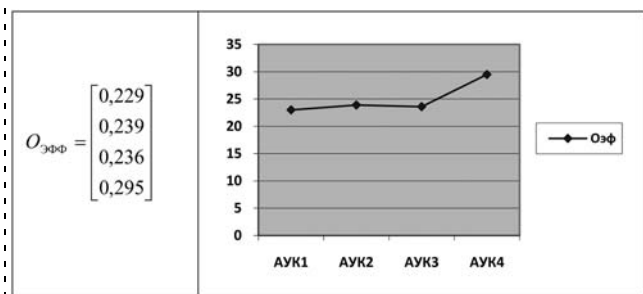


Рис. 5. Оценки эффективности АУК

имеет АУК4. По эффективности АУК2 и АУК3 отличаются незначительно.

* * *

В статье рассмотрен метод анализа иерархий, который является обоснованным путем решения многокритериальных задач, включающих как количественные, так и качественные факторы. Этот метод обеспечивает с помощью достаточно простых правил анализ сложных многокритериальных задач во всем их разнообразии. Он позволяет группе экспертов формировать оценки факторов, уточнять суждения и в результате приводить групповые суждения в соответствие с результатами попарных сравнений характеристик объектов. Суждения могут уточняться с помощью обратной связи, что ведет к дальнейшему уточнению суждений. Разработанная простейшая иерархия содержит три уровня: цель, критерии и альтернативы. Количественные параметры для сравниваемых четырех АУК сформированы на основе анализа данных АУК ИАСО-29 обучения летного и инженерно-технического состава самолета МиГ-29 [5, 6]. Разработан алгоритм решения задачи для простейшей иерархии в целях оценки эффективности АУК при использовании пяти показателей: числа букв в тексте, числа анимаций, фото-, видео- и аудиосюжетов. Проведена многокритериальная ранжировка АУК и определен лучший курс.

Список литературы

1. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 316 с.
2. Василец В. М., Пономаренко А. В., Михайлов В. В. и др. Интеллектуальные интерактивные УТК. М.: ф. Воениздат, 2006. 256 с.
3. Киреев В. С. Метод анализа иерархий в системе инновационных образовательных проектов // Программные продукты и системы. № 4. 2011. С. 188—190.
4. Красильникова В. А. Теория и технология компьютерного обучения и тестирования. М.: Дом педагогики, 2009. 331 с.
5. Пономаренко А. В., Ключников А. А., Кулабухов В. С. и др. Исследования и испытания АСО для подготовки летного и ИТ состава самолетов и вертолетов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 10. С. 74—78.
6. Василец В. М., Пономаренко А. В., Халтобин В. М. Интерактивная автоматизированная система обучения ИАСО-29 для летного и ИТ состава самолетов МиГ-29 // Авиакосмическая техника и технология. 2011. № 2. С. 38—46.

CONTENTS

- Gaiduk A. R., Plaksienko E. A.** Nonlinear Plants Control with Uncertain Disturbance Compensation 5
The new adaptive design method of control for nonlinear object with identification of external uncertain disturbance and its compensation is offered. It is supposed, that the equations of the plant are submitted in Jordan controlled form, and $K(p)$ -image of disturbance is a polynom with constant factors, and degree of this polynom does not exceed known value. The nonlinear control device includes the state observer of any equivalent system, the adaptive disturbance identifier and the former of nonlinear control. The numerical example of design is given.
Keywords: nonlinear plant, uncertain disturbance, adaptation, control, compensation
- Shishkin E. A.** Dynamic Characteristics of Elementary Units of the Second Order with Delay Noise 8
In work dynamic characteristics of linear systems of the second order with delay are considered.
Keywords: delay, accuracy, dynamic characteristics, the maximum deviation
- Kudinov Yu. I., Kelina A. Yu.** The Simplified Method of Definition of Parameters Fuzzy Pid Regulators 12
The simplified method of definition of parameters fuzzy P, PI, PD and PID regulators with use of means MATLAB is offered.
Keyword: tuning, fuzzy PID regulators, MATLAB
- Shabunin A. B., Kuznetsov N. A., Skobelev P. O., Babanin I. O., Kozhevnikov S. S., Simonova E. V., Stepanov M. E., Tsarev A. V.** Development of Multiagent Adaptive Resource Management System for JSC "Russian Railways" 23
The paper proposes multi-agent approach for adaptive real-time resource management for Russian national railway company — JSC "Russian Railways". This approach allows forming the schedule as a dynamic network of demands and opportunities of resources — trains, stations, employees and other elements. The paper contains brief description of the approach, the system architecture, the logic of multiagent planner and agents interaction protocols. As an example the planning and re-planning of timetable for high-speed "Sapsan" trains is used between Moscow and St. Petersburg. It is shown that the proposed approach allows detecting conflicts and adoptively adjusting plans in real time based on the current situation.
Keywords: multiagent system, adaptive planning, agent's interaction protocols, conflict resolution, real time
- Grigoriev S. N., Andreev A. G., Ivanovsky S. P.** Present State and Prospects of Industrial Robotics. 30
This article focuses on the present technical level of industrial robotics showing its current role in the world production and its prospects for the future. The strategic research directions and plans of the leading European developers of industrial robotics are also covered by this article.
Keywords: industrial robotics, welding robot, painting robot, assembly robot, robotic co-worker, adaptable manufacturing cell, off-line programming, strategic research agenda
- Pritykin F. N., Chukavov E. A.** Maneuverability Mechanisms Performance Analysis of Manipulators with Different Kinematic Chains Structure Models 35
Present research paper investigates the quantitative assessment of maneuverability performance of spatial mechanisms manipulators in the presence of motor redundancy. The effect of the kinematic structure of mechanisms and geometrical parameters was analyzed on the performance of manipulators to maneuver the virtual simulation of movements along velocity vector.
Keywords: virtual simulation of robot movements, spatial mechanisms of manipulators, motor redundancy in the synthesis of movements along the velocity vector, manipulator agility performances
- Filaretov V. F., Konoplin A. Yu.** System of Automatic Correction of Program Trajectory of Movement of Multilink Manipulator Mounted on the Underwater Vehicle 40
In this paper the system of automatic correction of program trajectory of movement of multilink manipulator mounted on the underwater vehicle is described. Created system allows precisely neutralize errors of multilink manipulator's movement on preassigned trajectories due to introduction of additional manipulator's motions. Correction of manipulator's gripper movement based on information of manipulator's configuration and underwater vehicle spatial displacements by the action of external influences.
Keywords: multilink manipulator, underwater vehicle, navigation system, spatial trajectory, control system, mode of movement

Rudometkin L. E., Antonov A. A., Rachkov M. Yu. Automation Control of Residual Stresses of Constructions . . 46

The paper presents the automated system of diagnostics of the residual stresses, allowing raising reliability and high-speed performance of measurements on the basis of application of a laser interferometry and program methods of image processing.

Keywords: automation of measurements, residual stresses, speckle interferometer, computer image processing

Dianov V. N., Gevondjan T. A., Belousov I. M., Ljuminarskaya E. S. Increase of Informing of the Systems at Influence of Code-Pulse Signals 54

On the basis of the detected new properties of passive elements of radio-electronic equipment and by analogy to concept "non-refusal operation" the new concept of reliability – "non-failure", establishing communication between failures in equipment and latent defects in it is offered. The instance of detection of latent defects in asynchronous motors is resulted. Set of informative signs for detection of latent defects is given.

Keywords: failure, active diagnostic of failures, informative parametres of failures, non-failure, a latent defect

Bronnikov A. M., Morozov D. V. Troubleshooting of Directly not Observable Refusals of Airborne Systems Based on Mixed Directed Graph 62

The problem of search of a place of failure of onboard systems on functional developments dares. For the problem solution the troubleshooting way directly unobservable refusals on the basis of the mixed directed graph is used. As an example the solution of a problem of definition of a place of failure in an aviation electro hydraulic drive with the control block and the control is considered.

Keywords: mixed graph, logical functional model, fault troubleshooting, electro hydraulic drive

Ponomarenko A. V., Vasilets V. M., Kulabukhov V. S., Khaltobin V. M., Grozov O. B., Kluchnikov A. A. Method of Hierarchy Analysis to Estimate Computer-Based Training Courses of Aviation Training Systems 66

The work studies estimation of computer-based training courses, on the basis of hierarchy analysis method to compare and validate new information training technologies. Interactive computer-based training system IASO-29, designed in Design Bureau after A. I. Mikoyan in cooperation with WIA after professor N. E. Zhukovskiy, was taken as an example of computer-based training systems.

Keywords: hierarchy analysis, Saaty method, computer-based training courses, pairwise comparisons

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Е. В. Комиссарова.*

Сдано в набор 30.10.2012. Подписано в печать 12.12.2012. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН113. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,

телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2, офис 2.