

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 12 (93)

декабрь

2008

Редакционный совет:

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

Главный редактор:

ТЕРЯЕВ Е. Д.

Заместители гл. редактора:

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

Ответственный секретарь:

ПЕТРИН К. В.

Редакционная коллегия:

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

Редакция:

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

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** О неробастности алгоритмов параметрической идентификации в условиях помех 2
Кириллов А. Н. Нелинейная стабилизация динамических систем управления 6

МЕХАТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ И ТРЕНАЖЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

- Дорри М. Х., Рошин А. А.** Инструментальная программно-алгоритмическая система для разработки исследовательских комплексов 12
Прошин И. А., Тимаков В. М., Прошкин В. Н. Совершенствование динамических стендов авиационных тренажеров на базе гидроприводов 18
Иванов В. С., Моисеев В. Л. Вопросы совершенствования методов аттестации испытательного оборудования для воспроизведения механических воздействующих факторов 23

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

- Гузаиров М. Б., Ильясов Б. Г., Тагирова К. Ф., Ганеев А. Р., Мезенцев Е. Ф., Додулад А. В.** Оптимальное управление режимами работы группы нефтяных скважин на основе упрощенной модели участка пласта 27
Арапов Д. В., Курицын В. А. Оптимизация температурного режима вертикального кристаллизатора 31
Атрощенко О. И. Задача стабилизации гидротитосферных процессов методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов 37

ДИСКРЕТНЫЕ АВТОМАТЫ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Сытник А. А., Шульга Т. Э., Папшев С. В.** Управление поведением мехатронных систем на основе свойств функциональной избыточности 41
Иванова А. С., Пирогов В. В., Полотовский С. Н. Опыт разработки и внедрения компьютерных систем управления производством металлообрабатывающих предприятий 45

СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В ЗАДАЧАХ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ

- Бимаков В. А.** Высокоскоростная обработка пиксельных моделей для решения задач управления автономным роботом 50
Платонов А. К., Носков В. П. Навигационная точность зрительного канала робота 50
Богуславский А. А., Кирильченко А. А., Платонов А. К., Соколов С. М., Трифонов О. В., Ярошевский В. С. Построение описания внешней среды в системах информационного обеспечения мобильных робототехнических комплексов 50
Указатель статей, опубликованных в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" и Приложении к журналу в 2008 г. 51
Contents 55

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

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

УДК 519.715:681.5

А. Б. Филимонов, д-р техн. наук, проф.,
Н. Б. Филимонов, канд. техн. наук, доц.,
Московский государственный университет
приборостроения и информатики

О неробастности алгоритмов параметрической идентификации в условиях помех

Рассматриваются задачи параметрической идентификации линейных динамических моделей "вход—выход". Показано, что распространенные алгоритмы идентификации не обладают необходимым для практических применений свойством робастности в условиях зашумленности измерительной информации.

Ключевые слова: динамические модели "вход—выход", параметрическая идентификация, шумы в канале измерения, анализ робастности алгоритмов идентификации.

Задача идентификации динамического объекта заключается в построении его математической модели по полученной измерительной информации. Во многих случаях отсутствуют априорные знания о свойствах объекта и внешней среды, в силу чего руководствуются методологическим принципом "черного ящика": постулируется структура математической модели объекта, а ее свободные параметры выбираются так, чтобы подогнать поведение модели под экспериментальные данные. Ясно, что любая модель может лишь приближенно описывать поведение реального объекта, при этом действие неконтролируемых факторов абстрагируют посредством введения неизвестных помех в динамическую структуру модели.

Во многих задачах параметрической идентификации принимаются модели "вход—выход": динамика объекта представляется разностными уравнениями, коэффициенты которых надлежит найти по данным наблюдения входа и выхода. К данному классу моделей относятся модели авторегрессии AR, ARX и ARMAX, модель "Выход—Ошибка" ("Output—Error", сокращенно OE), а также модель Бокса—Дженкина (BJ) [1, 2]. Цель настоящей статьи — показать, что существует проблема робастности алгоритмов идентификации моделей такого типа в условиях зашумленности измерительных данных.

Модель "Выход—Ошибка". Исследуемый объект представляется дискретной линейной динамической моделью:

$$x(t) + \sum_{k=1}^n a_k x(t-k) = \sum_{k=0}^n b_k u(t-k); \quad (1)$$

$$y(t) = x(t) + \xi(t),$$

где $t \in \mathbb{Z}_+ = \{0, 1, 2, \dots\}$; $u(t)$ и $y(t)$ — соответственно входной и выходной сигналы объекта; $x(t)$ — реакция объекта на входной сигнал; $\xi(t)$ — помеха (шум) в канале измерения; $a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_n$ — неизвестные (постоянные) параметры модели. Заметим, что в [1] данная модель именуется *моделью выходной ошибки*.

ОЕ-модель можно представить в операторной форме

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(t) + \xi(t).$$

Здесь q — оператор сдвига вперед:

$$qf(t) = f(t+1);$$

$A(q^{-1})$ и $B(q^{-1})$ — разностные операторы:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n},$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_n q^{-n}.$$

Идентификации подлежат параметры модели по данным наблюдения входа и выхода объекта: $u(t)$, $y(t)$, $t \in 0:T$.

Полагаем, что помеха ограничена по модулю:

$$|\xi(t)| \leq \gamma, \quad (2)$$

причем мажоранта γ априори неизвестна, но достаточно мала.

Считаем также известными динамический порядок объекта n и его начальное состояние. Последнее, согласно структуре разностного уравнения (1), определяется начальными отрезками входа и выхода: $\{u(-1), u(-2), \dots, u(-n)\}$, $\{x(-1), x(-2), \dots, x(-n)\}$.

Далее θ — вектор истинных значений параметров объекта, а θ^M — вектор их апробируемых значений:

$$\theta = (a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_n),$$

$$\theta^M = \{a_1^M, a_2^M, \dots, a_n^M, b_0^M, b_1^M, \dots, b_n^M\}.$$

Расчетные отклики модели $y^M(t)$ являются решениями разностного уравнения

$$y^M(t) + \sum_{k=1}^n a_k^M y^M(t-k) = \sum_{k=0}^n b_k^M u(t-k).$$

Передаточные функции объекта и модели имеют вид:

$$W(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}, \quad W^M(z^{-1}) = \frac{B^M(z^{-1})}{A^M(z^{-1})}.$$

Отвечающие им переходные характеристики определяются посредством применения операции обратного Z -преобразования:

$$h(t) = \mathcal{Z}^{-1}[W(z^{-1})/(1 - z^{-1})],$$

$$h^M(t) = \mathcal{Z}^{-1}[W^M(z^{-1})/(1 - z^{-1})].$$

Введем рассогласование в откликах объекта и модели:

$$e(t) = y^M(t) - x(t).$$

Ошибка моделирования фактической реакции выхода

$$\varepsilon(t) = y^M(t) - y(t).$$

Мерой соответствия выбранных параметров модели эмпирическим данным служит некоторый критерий идентификации $E(\theta^M)$, минимизация которого дает наилучшую оценку искомым параметрам:

$$\hat{\theta} = \arg \min E(\theta^M).$$

Критерий идентификации строится как функция вектора $\varepsilon(0 : T)$:

$$E(\theta^M) = Q(\varepsilon).$$

В классическом методе наименьших квадратов (МНК) используется квадратичная функция ошибки:

$$Q(\varepsilon) = Q_1(\varepsilon) = \frac{1}{T+1} \sum_{t=0}^T \varepsilon^2(t).$$

В общем случае функция ошибки конструируется из нормы вектора $\varepsilon(0 : T)$. В частности, может быть выбран максимум модуля ошибки:

$$Q(\varepsilon) = Q_2(\varepsilon) = \max_{0 \leq t \leq T} |\varepsilon(t)|. \quad (3)$$

Анализ алгоритмов параметрической идентификации ОЕ-моделей с точки зрения помехоустойчивости выявил их *неробастность*: они не дают приемлемого результата даже при весьма малом уровне помех.

Эффект неробастности продемонстрируем на двух примерах (моделирование динамических процессов осуществлялось в среде MATLAB).

Пример 1. Приведем результаты идентификации ОЕ-модели вида

$$x(t) + \sum_{k=1}^n a_k x(t-k) = bu(t);$$

$$y(t) = x(t) + \xi(t),$$

т. е. здесь $B(q^{-1}) = b_0 = b$.

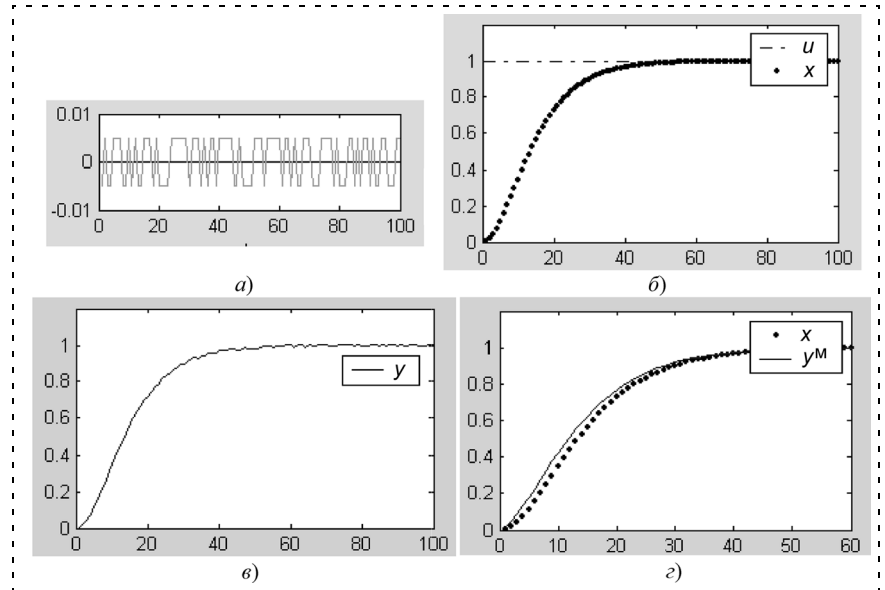


Рис. 1

Передаточная функция объекта:

$$W(z^{-1}) = \frac{b}{A(z^{-1})} = \frac{0,006}{1 - 2,4000z^{-1} + 1,9100z^{-2} - 0,5040z^{-3}}. \quad (4)$$

Приняты нулевые начальные условия; помеха $\xi(t)$ — белый шум с равномерным распределением на отрезке $[-\gamma, \gamma]$, $\gamma = 0,005$; $T = 100$. На рис. 1 представлены реализации шума $\xi(t)$ и сигналов $u(t)$, $x(t)$ и $y(t)$.

Для решения данной задачи идентификации применялась библиотечная функция ОЕ [2] пакета расширения System Identification Toolbox MATLAB.

Результаты идентификации

$$W^M(z^{-1}) = \frac{b^M}{A^M(z^{-1})} = \frac{0,0200}{1 - 1,5029z^{-1} + 0,3385z^{-2} + 0,1844z^{-3}}.$$

Спектры объекта и идентифицирующей модели:

$$\Lambda = \{0,7; 0,8; 0,9\}, \Lambda^M = \{0,8850; 0,8601; -0,2422\}.$$

Оценки расхождения выходных сигналов объекта и модели:

$$Q_1(\varepsilon) = 8,725 \cdot 10^{-4}; Q_2(\varepsilon) = 0,0854; Q_2(e) = 0,0804.$$

Итак, налицо неприемлемый результат процедуры параметрической идентификации: параметры и спектры объекта и модели кардинально различаются. ■

Пример 1 показывает, что близость временных характеристик двух сравниваемых динамических систем по той или иной норме не гарантирует также близости параметров передаточных функций

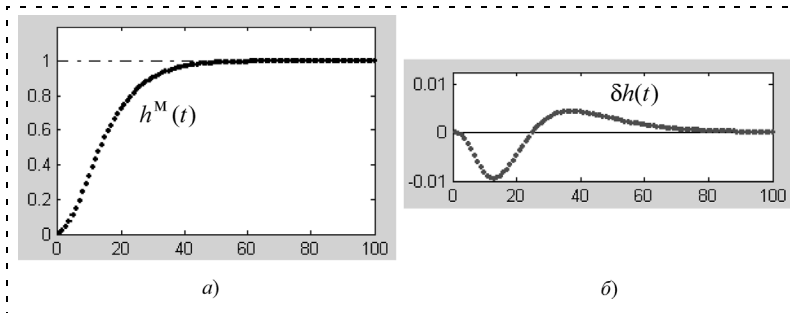


Рис. 2

данных систем. Следующий пример также подтверждает это положение.

Пример 2. Сравним динамические характеристики двух систем. Передаточная функция первой равна (4), а второй

$$W^M(z^{-1}) = \frac{b}{A^M(z^{-1})} = \frac{0,006}{1 - 2,4250z^{-1} + 1,9600z^{-2} - 0,5290z^{-3}}.$$

Заметим, что

$$A^M(z^{-1}) = A(z^{-1}) + \Delta A(z^{-1}), \\ \Delta A(z^{-1}) = -0,025z^{-1}(1 - z^{-1})(1 - 1,001z^{-1}).$$

На рис. 2, а показана переходная характеристика второй системы $h^M(t)$, а на рис. 2, б — разница между переходными характеристиками сравниваемых систем:

$$\delta h(t) = h^M(t) - h(t).$$

О близости переходных характеристик можно судить по критериям $Q_1(\delta h) = 1,3 \cdot 10^{-5}$, $Q_2(\delta h) = 0,0095$.

Сравним спектры обеих систем:

$$\Lambda = \{0,7; 0,8; 0,9\}, \Lambda^M = \{0,9091; 0,7579 \pm 0,0862j\}.$$

Итак, незначительная погрешность в переходной характеристике вызывает существенные изменения в параметрах передаточной функции. Спектр системы оказывается еще более чувствительным к малым вариациям переходной характеристики. ■

Метод минимизации невязки. Обсудим возможности весьма популярного метода идентификации динамических систем, основанного на минимизации функции невязки [3]. Алгоритмическая простота метода обусловлена конструкцией невязки, которая прямо выражается через искомые параметры модели:

$$\varepsilon(t) = y(t) + \sum_{k=1}^n a_k^M y(t-k) - \sum_{k=0}^n b_k^M u(t-k). \quad (5)$$

Ясно, что невязка будет тождественным нулем при правильном выборе параметров модели и отсутствии шумов в канале измерения.

Критерий идентификации формируется как функция невязки:

$$E(\theta^M) = Q(\varepsilon).$$

Обычно используется квадратическая функция невязки, и задача идентификации формализуется по принципу МНК:

$$Q(\varepsilon) \rightarrow \min.$$

Обсудим вопрос чувствительности данного метода к шумам в канале измерения. Далее для простоты изложения будем считать, что объект испытывает свободное движение:

$$u(t) \equiv 0.$$

В этом случае динамика объекта описывается уравнениями

$$x(t+n) + \sum_{k=1}^n a_k x(t+n-k) = 0; \quad (6)$$

$$y(t) = x(t) + \xi(t), \quad (7)$$

и согласно (5)

$$\varepsilon(t) = y(t+n) + \sum_{k=1}^n a_k^M (t+n-k). \quad (8)$$

Векторы параметров объекта и модели принимают вид

$$\theta = (a_1, a_2, \dots, a_n), \theta^M = (a_1^M, a_2^M, \dots, a_n^M).$$

Введем характеристический многочлен разностного уравнения (6)

$$L(\theta, \lambda) = \lambda^n + \sum_{k=1}^n a_k \lambda^{n-k}.$$

Далее $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ — множество корней этого многочлена.

Определим разностные операторы:

$$L(\theta, q) = q^n + \sum_{k=1}^n a_k q^{n-k},$$

$$L(\theta^M, q) = q^n + \sum_{k=1}^n a_k^M q^{n-k}$$

и с их помощью запишем уравнения (6) и (8) в операторной форме:

$$L(\theta, q)x(t) = 0; \quad (9)$$

$$\varepsilon(t) = L(\theta^M, q)y(t). \quad (10)$$

Введем разностный оператор k -го порядка:

$$\Delta^k = (q-1)^k. \quad (11)$$

Отметим структурную особенность исходного разностного уравнения (6): оно связывает значения решения $x(t)$ в последовательные моменты времени $t, t+1, t+2, \dots, t+n$. Иная форма записи разностных уравнений связывает между собой текущие конечные разности решения:

$$\Delta^n x(t) + \sum_{k=0}^{n-1} b_k \Delta^k x(t) = 0.$$

Для перехода к конечным разностям будем использовать формулы

$$L(\theta, q) = L(\theta, \Delta + 1) = \Delta^n + \sum_{k=0}^{n-1} b_k \Delta^k;$$

$$L(\theta^M, q) = L(\theta^M, \Delta + 1) = \Delta^n + \sum_{k=0}^{n-1} b_k^M \Delta^k,$$

здесь

$$b_k = \frac{1}{k!} \left. \frac{\partial^k L(\theta, \Delta + 1)}{\partial \Delta^k} \right|_{\Delta=0};$$

$$b_k^M = \frac{1}{k!} \left. \frac{\partial^k L(\theta^M, \Delta + 1)}{\partial \Delta^k} \right|_{\Delta=0}.$$

Отметим соотношение

$$L(\theta, q) - L(\theta^M, q) = \sum_{k=0}^{n-1} (b_k - b_k^M) \Delta^k. \quad (12)$$

Подставим (7) в (10) и разложим невязку на две составляющие:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t), \quad (13)$$

где

$$\varepsilon_1(t) = L(\theta^M, q)x(t); \quad \varepsilon_2(t) = L(\theta^M, q)\xi(t). \quad (14)$$

Последнее соотношение запишем в виде

$$\varepsilon_2(t) = \xi(t+n) + \sum_{k=0}^{n-1} b_k^M \xi(t+k). \quad (15)$$

Согласно (14) и (9)

$$\varepsilon_1(t) = L(\theta, q)x(t) + (L(\theta^M, q) - L(\theta, q))x(t) = (L(\theta^M, q) - L(\theta, q))x(t).$$

Отсюда с учетом (12) получаем

$$\varepsilon_1(t) = \sum_{k=0}^{n-1} (b_k - b_k^M) \Delta^k x(t). \quad (16)$$

Качество идентификации параметров системы зависит от соотношения детерминированной $\varepsilon(t)$ и шумовой $\varepsilon_2(t)$ составляющих невязки (13). Их величины будем измерять критериями:

$$E_i = \max_{0 \leq t \leq T} |\varepsilon_i(t)| \quad (i = 1, 2). \quad (17)$$

Адекватность решения задачи идентификации не может быть гарантирована в случае доминирования шумовой компоненты невязки:

$$E_1 \ll E_2, \quad (18)$$

поскольку в этом случае оптимальный выбор вектора параметров θ^M фактически будет подчиняться условию

$$E_2(\theta^M) \rightarrow \min.$$

Выведем аналитические оценки величин (17).

Полагаем систему устойчивой. Мерой степени устойчивости будет служить показатель удаленности спектра от единичной окружности:

$$\delta = \min_{\lambda \in \Lambda} (1 - |\lambda|). \quad (19)$$

Каждому корню $\lambda \in \Lambda$ отвечает элементарное решение уравнения (6):

$$x(t) = C\lambda^t, \quad (20)$$

которое согласно (16) и (11) порождает невязку

$$\varepsilon_1(t) = \sum_{k=0}^{n-1} (b_k - b_k^M)(\lambda - 1)^k x(t).$$

Отсюда в силу (20) и (19) получаем верхнюю границу для критерия E_1 :

$$\bar{E}_1 = C \sum_{k=0}^{n-1} |b_k - b_k^M| \delta^k. \quad (21)$$

Максимум критерия E_2 согласно (15) и (2) равен

$$\max E_2 = \left(1 + \sum_{k=0}^{n-1} |b_k^M| \right) \gamma.$$

В наихудшем случае он приближается к величине

$$\bar{E}_2 = 2^n \gamma. \quad (22)$$

Действительно, это равенство будет иметь место, если положить все корни характеристического многочлена уравнения (15) равными -1 .

Из (21), (22) находим

$$\bar{E}_1 / \bar{E}_2 = (C/2^n \gamma) \sum_{k=0}^{n-1} |b_k - b_k^M| \delta^k. \quad (23)$$

Порядок данного отношения поясняет следующий пример.

Пример 3. Исходные данные:

$$x(t) = \text{Re}[C_1 \lambda_1^t + C_2 \lambda_2^t + C_3 \lambda_3^t],$$

где $\lambda_1 = 1 - \delta$; $\lambda_{2,3} = (1 - \delta) \exp(\pm j\omega)$; $\delta = 0,025$; $\omega = 2\pi/T$; $C_1 = 2$; $C_2 = -1,5$; $C_3 = -0,5$; $T = 100$; $\xi(t)$ — белый шум с равномерным распределением на отрезке $[-\gamma, \gamma]$, $\gamma = 0,01$. Функция невязки принимается в виде (3).

Истинные и идентифицированные параметры:

$$1) b_0 = 0,0001; b_1 = 0,0058; b_2 = 0,0788;$$

$$2) b_0^M = 0,0000; b_1^M = 0,0000; b_2^M = 1,592.$$

Соответствующие спектры:

$$1) \Lambda = \{0,975; 0,9731 \pm 0,0612j\};$$

$$2) \Lambda^M = \{-0,1592; 1,0000; 1,0000\}.$$

Значения функции невязки для объекта и идентифицирующей модели:

$$1) Q(\varepsilon) = 0,0583; Q(\varepsilon_1) = 0; Q(\varepsilon_2) = 0,0583;$$

$$2) Q(\varepsilon) = 0,0283; Q(\varepsilon_1) = 0,0072; Q(\varepsilon_2) = 0,0283.$$

Таким образом, идентификационная процедура дает кардинально неверные результаты при малом уровне помех. Вычислим критерии (21)–(23):

$$\bar{E}_1 = 0,0019; \bar{E}_2 = 0,0800; \bar{E}_1/\bar{E}_2 = 0,0233. \blacksquare$$

Пример демонстрирует неверный результат идентификации. Видно, что выполняется условие (18) и поэтому процесс минимизации функции невязки направлен в сторону уменьшения действия шумовой компоненты невязки. При этом также обеспечивается снижение критерия (21), однако не за счет желаемого приближения оценок b_k^M к b_k : здесь срывает эффект резкого уменьшения абсолютных значений конечных разностей при увеличении их порядка.

Изложенные результаты позволяют сделать вывод о неробастности процедур параметрической идентификации. Действительно, малые искажения измерительных сигналов вследствие действия неконтролируемых факторов всегда неизбежны, и в этих условиях можно ожидать значительные, и даже неприемлемые расхождения между полученными оценками и истинными значениями параметров исследуемого объекта. Данный вывод имеет принципиальное значение для теории и практики идентификации динамических систем: он ставит под сомнение работоспособность известных методов параметрической идентификации. Ясно, что отрицательное свойство неробастности распространяется и на рекуррентные методы параметрической идентификации — это относится и к известному рекуррентному методу наименьших квадратов. Отсюда вытекает проблематичность соответствующих системотехнических способов построения адаптивных систем с идентификацией параметров объектов управления [3].

Список литературы

1. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. 432 с.
2. Дьяконов В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Спец. справочник. СПб.: Питер, 2002. 448 с.
3. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984. 541 с.

УДК 519.95

А. Н. Кириллов, канд. физ.-мат. наук, доц.,
Санкт-Петербургский государственный
технологический университет
растительных полимеров

Нелинейная стабилизация динамических систем управления

Вводится понятие s-конуса, используемое при решении задач стабилизации нелинейных динамических систем при ограничениях на состояния и управления. Рассматривается задача стабилизации за конечное время, получено ее решение с помощью предложенного алгоритма, который также применяется для точечной стабилизации автоколебания двумерной системы.

Ключевые слова: стабилизация, динамическая система управления, конус, точечная стабилизация, автоколебание.

Введение

Стабилизация состояния равновесия динамической системы традиционно состоит в построении управления, при котором это состояние устойчиво

в некотором смысле, например асимптотически [1, 2]. Во многих задачах требуется стабилизировать состояние, которое может и не реализовываться в системе. Такое желаемое состояние уже не является положением равновесия. Обычно под стабилизацией состояния M понимается перевод за ограниченное время всех траекторий, выходящих в момент времени t_0 из некоторой δ -окрестности M в любую ε -окрестность так, чтобы в дальнейшем они в ней оставались [3]. При этом наибольшая область, содержащая δ -окрестность, называется областью притяжения или стабилизируемости точки M . Но часто при решении задач стабилизации с ограничениями на состояния и управления не обязательно или невозможно переводить в ε -окрестность точки M все траектории, выходящие из некоторой ее окрестности. В связи с этим возникает необходимость рассматривать области притяжения, не являющиеся окрестностями стабилизируемой точки. При этом под окрестностью понимаем открытое множество, содержащее точку.

В данной статье предлагается алгоритм, позволяющий при некоторых условиях решать задачи

стабилизации при ограничениях на состояния и управления. Вводится понятие стабилизируемости за конечное время и рассматриваются условия решения соответствующей задачи управления.

Конус стабилизации

Рассмотрим систему управления вида

$$\dot{x} = f(x, u), \quad (1)$$

где x, u — векторы состояний и управлений соответственно; $x \in R^n, u \in R^k; f$ — непрерывная функция; u — кусочно-постоянная функция, $u = u(x, t)$. Пусть $x(t, x_0, t_0, u)$ — решение системы (1), соответствующее управлению u , такое, что $x(t_0, x_0, t_0, u) = x_0$; $\|x\|$ — евклидова норма вектора x ; $e \in R^n, \|e\| = 1$; (x, y) — скалярное произведение векторов x, y ; $q(x - x^*) = \frac{x - x^*}{\|x - x^*\|}$, где $x \neq x^*$ — некоторая фиксированная точка, $x^* \in R^n$; $U_\varepsilon(x^*) = \{x: \|x - x^*\| < \varepsilon\}$ — ε -окрестность точки x^* .

Введем множества

$$K(x^*, e, a) = \{x: (q(x - x^*), e) > a; a \in (0, 1)\} \equiv K; \quad (2)$$

$$\hat{K}(x^*, e, a) = \{x: (q(x - x^*), e) = a; a \in (0, 1]\} \equiv \hat{K}; \quad (3)$$

$$\bar{K}(x^*, e, a) = K(x^*, e, a) \cup \hat{K}(x^*, e, a) \equiv \bar{K}, \quad (4)$$

т. е. K — открытый конус; $\bar{K}$ — замыкание конуса K ; $\hat{K}$ — граница $\bar{K}$; x^* — вершина конуса K .

Определение 1. Точка x^* стабилизируема в конусе $\bar{K}(x^*, e, a)$, если для любой точки $x_0 \in \bar{K}(x^*, e, a) \cap U_\delta(x^*)$ при некотором $\delta > 0$ существует управление u , при котором решение $x(t, x_0, t_0, u)$ за ограниченное время, оставаясь в конусе, попадает в любую ε -окрестность его вершины и в дальнейшем в ней остается.

Построим кусочно-постоянное управление u , удовлетворяющее следующим условиям. Пусть $\{u_i\}$ — последовательность постоянных векторов, $u_i \in R^k$; $\{t_i\}$ — монотонно возрастающая последовательность, $t_i \in R, t_i > t_{i-1}, \lim_{i \rightarrow \infty} t_i = \infty$.

Предположим, что

$$u = u_i \text{ при } t \in [t_{i-1}, t_i]; \quad (5)$$

$$x(t, x_{i-1}, t_{i-1}, u_i) \in K \text{ при } t \in (t_{i-1}, t_i); \quad (6)$$

$$x(t_i, x_{i-1}, t_{i-1}, u_i) = x_i, x_{i-1} \in \hat{K}; \quad (7)$$

$$\lim_{i \rightarrow \infty} x_i = x^*. \quad (8)$$

Поясним смысл данных условий: (5) означает, что кусочно-постоянное управление принимает не более чем счетный набор значений u_i ; (6) — на интервалах (t_{i-1}, t_i) траектория лежит внутри конуса K , не имея общих точек с его границей $\hat{K}$; (7) — в моменты времени t_i траектория попадает на границу конуса $\hat{K}$; (8) — последовательность $\{x_i\}$ имеет предельную точку — вершину конуса x^* . Таким образом, суть построенного управления состоит в последовательных его переключениях в моменты попадания траектории на поверхность конуса при условии, что между этими попаданиями траектория находится внутри конуса. Отметим, что построенное управление не обязательно стабилизирует точку x^* в конусе $\bar{K}(x^*, e, a)$.

Определение 2. Управление u , стабилизирующее точку x^* в конусе $\bar{K}(x^*, e, a)$ и удовлетворяющее условиям (5)—(8), называется конусным стабилизирующим управлением. Если к тому же выполняется условие

$$\|x_i - x^*\| < \|x_{i-1} - x^*\|, \quad (9)$$

то u называется конусным монотонно стабилизирующим управлением. При этом конус $\bar{K}(x^*, e, a)$ называется конусом стабилизации точки x^* , или s -конусом, а при дополнительном условии (9) — конусом монотонной стабилизации, или монотонным s -конусом.

Пример. Рассмотрим двумерную систему ($x, y \in R$)

$$\begin{cases} \dot{x} = 2u - 1; \\ \dot{y} = -u, u \in \{0, 1\}. \end{cases} \quad (10)$$

Покажем, что для точки $0 = (0, 0)$ конусом монотонной стабилизации является, например, конус

$$\bar{K} = \bar{K}(0, e, a), \text{ где вектор } e = \left(\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}\right), a = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

При $u = 0$ решение системы имеет вид

$$\begin{cases} x(t) = -(t - t_0) + x_0; \\ y(t) = y_0. \end{cases}$$

Траектории — прямые $y = y_0$, где t_0, x_0, y_0 — начальные данные.

При $u = 1$

$$\begin{cases} x(t) = t - t_0 + x_0; \\ y(t) = -(t - t_0) + y_0, \end{cases}$$

траектории — прямые $x + y = x_0 + y_0$. Граница конуса $\bar{K}$ состоит из двух лучей: $l_1 = \{(x, y) : x = 0, y \geq 0\}$,

$l_2 = \{(x, y) : y = \frac{\sqrt{3}}{3}x, x \geq 0\}$. Опишем способ стабилизации. Пусть начальная точка принадлежит конусу K . Положим $u = 0$. Тогда согласно второму уравнению (10) траектория попадет на луч l_1 , и в момент попадания переключим управление на значение $u = 1$. Далее, из (10) следует, что траектория, двигаясь вправо, пересечет луч l_2 , и в этот момент переключим управление на значение $u = 0$. Далее процедура повторяется. Покажем, что для построенного кусочно-постоянного управления выполняются условия (5)–(9). Рассмотрим последовательность $\{M_n\}$ точек траектории, принадлежащих границам конуса — лучам l_1, l_2 . Пусть точка $M_n(z_{2n+1}, z_{2n}) \in l_2$. Положим $u = 0$. Тогда траектория попадет на луч l_1 в точку $M_{n+1}(0, z_{2n})$. В этот момент переключим управление на значение $u = 1$, после чего траектория за конечное время попадет на луч l_2 в точку $M_{n+2}(z_{2n+3}, z_{2n+2})$ и т. д. При этом $z_{2n} = \frac{1}{\sqrt{3}} z_{2n+1}$.

Из треугольника OM_nM_{n+1} получаем $\frac{z_{2n}}{z_{2n+2}} = \frac{z_{2n+1}}{z_{2n+3}}$.

Далее, $M_{n+1}M_{n+2}$ — биссектриса прямого угла треугольника OM_nM_{n+1} , что приводит к равенству отношений длин соответствующих отрезков $\frac{|OM_{n+1}|}{|M_{n+1}M_n|} =$

$\frac{|OM_{n+2}|}{|M_{n+2}M_n|}$, откуда $\frac{z_{2n+1}}{z_{2n+3}} = 1 + \frac{z_{2n+1}}{z_{2n}}$. В результате получаем $z_{2n+3} = \frac{1}{1 + \sqrt{3}} z_{2n+1}$, $z_{2n+2} = \frac{1}{1 + \sqrt{3}} z_{2n}$.

Отсюда следует, что $\lim_{n \rightarrow \infty} z_{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} z_{2n+1} = 0$, а значит, и $\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = 0$. Таким образом, условие (9) выполняется. Далее, $|OM_n| > |OM_{n+1}|$ (катет меньше гипотенузы), из треугольника $OM_{n+1}M_{n+2}$ имеем $|OM_{n+1}| > |OM_{n+2}|$. Итак, условие (9) выполнено. Покажем, что система стабилизируема в построенном конусе. Для этого достаточно рассмотреть последовательность вложенных треугольников $\{OM_nM_{n+1}\}$, для которых стороны M_nM_{n+1} являются отрезками соответствующих траекторий. Поскольку из предыдущего рассуждения следует, что треугольники при $n \rightarrow \infty$ стягиваются к вершине конуса, то последняя стабилизируема в конусе $\bar{K} = \bar{K}(0, e, a)$, который является конусом монотонной стабилизации, а построенное управление — конусным монотонно стабилизирующим.

В связи с введенным понятием конусной стабилизации представляется естественным дать его обобщение.

Определение 3. Точка x^* называется *стабилизируемой*, если для любой ее окрестности $U_\varepsilon(x^*)$ найдется допустимое управление и множество D такие, что любая траектория системы (1), выходящая из D , за ограниченное время попадает в $U_\varepsilon(x^*)$ и в дальнейшем там остается.

Данное определение отличается от общепринятого тем, что множество D не обязательно является окрестностью стабилизируемой точки x^* , которая может быть граничной для него. Можно назвать введенное понятие D -стабилизируемостью точки x^* . Таким образом, стабилизация с помощью s -конуса дает пример решения задачи D -стабилизируемости, являясь ее частным случаем. Понятно, что s -конус может оказаться эффективным средством решения задач стабилизации с ограничениями на состояния и управления.

В задачах стабилизации технологических процессов, когда нежелательны высокочастотные переключения управляющего воздействия, можно использовать комбинированное управление. Сначала строится конусное управление, позволяющее учесть заданные ограничения на состояния. В некотором смысле s -конус является ловушкой для траекторий. Затем в достаточно малой окрестности стабилизируемой точки можно использовать, например, линейное относительно состояния управление.

Локальная стабилизируемость за конечное время

В работе [4] введено понятие нормальной локальной управляемости системы (1), состоящее в том, что для любого $T > 0$ существует такая окрестность начала координат, что все траектории, выходящие из нее, за время, меньшее, чем T , попадают в начало с помощью допустимого управления. В связи с решением задач стабилизации ряда технических систем и технологических процессов представляется актуальным ввести следующее понятие.

Определение 4. Точка x^* называется T -стабилизируемой, если для любого $T > 0$ существует такая ее окрестность $U(x^*)$ и такое допустимое управление, что все траектории системы (1), выходящие из $U(x^*)$ за время, меньшее, чем T , попадут в любую сколь угодно малую окрестность точки x^* и в дальнейшем в ней останутся.

Оказывается, что введенное выше понятие s -конуса позволяет построить алгоритм T -стабилизации для системы (1) в случае $n = 2$.

Рассмотрим систему управления вида

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y, u); \\ \dot{y} = g(x, y, u), \end{cases} \quad (11)$$

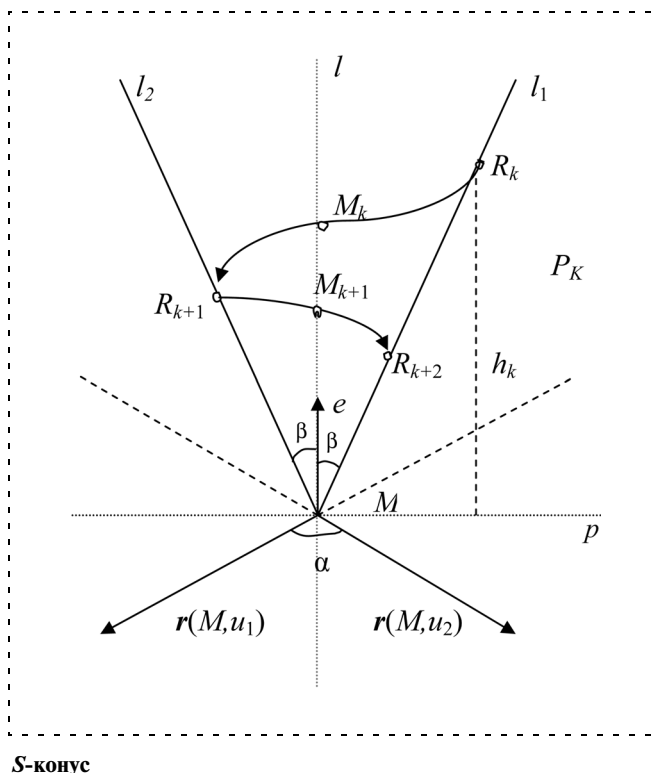
где $x, y \in R$; u — кусочно-постоянное управление, $u \in R$. Предположим, что правые части системы (11) удовлетворяют условиям существования и единственности решения задачи Коши. Пусть $r(\bar{M}, u) = (f(x, y, u), g(x, y, u)) \in R^2$, где $\bar{M} = (x, y)$, $M = (x^*, y^*)$ — некоторая фиксированная точка.

Теорема 1. Пусть векторы $r(M, u_1), r(M, u_2)$ неколлинеарны при $u = u_1$ и $u = u_2$, где u_i — постоянные, $u_i \in R, i = 1, 2$. Тогда точка M T -стабилизируема в s -конусе с помощью кусочно-постоянного управления, принимающего значения u_1, u_2 .

Доказательство. Построим s -конус (см. рисунок) $\bar{K}(M, e, a) \equiv \bar{K}(M)$. Из дальнейшего будет ясно, что процедура построения допускает неединственность. Пусть α — меньший угол между векторами $r(M, u_1), r(M, u_2)$, т. е. $\alpha \in (0, \pi)$. Пусть l — биссектриса угла α ; p — прямая, проходящая через точку M перпендикулярно l . Пусть конус $\bar{K}(M)$ образован лучами l_1, l_2 , проходящими через точку M и образующими равные углы β с прямой l , где $\beta < \frac{\alpha}{2}$.

При этом прямая p отделяет конус $\bar{K}(M)$, лежащий в полуплоскости P_K , и векторы $r(M, u_1), r(M, u_2)$.

В силу непрерывности и условия $\beta < \frac{\alpha}{2}$ траектории в пересечении V некоторой окрестности $U(M)$ точ-



ки M с полуплоскостью $P_K, V = U(M) \cap P_K$, будут при $u = u_1, u = u_2$ пересекать границы l_1, l_2 конуса в противоположных направлениях, а прямые, параллельные p , — в направлении векторов $r(M, u_1), r(M, u_2)$, т. е. фазовая точка будет приближаться к прямой p . Пусть при $u = u_1$ траектория сначала пересекает l_1 , а затем l_2 , а при $u = u_2$, наоборот, сначала происходит пересечение с l_2 , а затем с l_1 . Алгоритм стабилизации состоит в переключении управления со значения u_1 на u_2 при пересечении траекторией луча l_2 и, наоборот, со значения u_2 на u_1 при пересечении луча l_1 . Покажем, что в результате такого переключения точка M будет T -стабилизируема в конусе $\bar{K}(M)$.

Пусть $\{M_k\}$ — последовательность точек пересечения траекторий с прямой $l, M_k \in V$. Тогда $M_k \rightarrow M$ при $k \rightarrow \infty$. Это следует из двух фактов. Первый: последовательность $\{|M_k M|\}$ длин соответствующих отрезков монотонно убывает, так как траектории пересекают прямые, параллельные p , в направлении векторов $r(M, u_i)$. Значит, существует конечный $\lim_{k \rightarrow \infty} |M_k M|$. Второй: $\lim_{k \rightarrow \infty} |M_k M| = 0$, поскольку

в противном случае имела бы точка $\hat{M} \neq M, \hat{M} \in V, \hat{M} = \lim_{k \rightarrow \infty} M_k$, в которой векторы $r(\hat{M}, u_1), r(\hat{M}, u_2)$ были бы противоположно направлены, что противоречит условию их неколлинеарности. Итак, точка M стабилизируется в конусе $\bar{K}(M)$.

Покажем, что точка M T -стабилизируется. Пусть $\bar{V} = \bar{V}(M) \cap P_K$, где $\bar{V}(M)$ — замыкание окрестности $V(M)$; $\{R_k\}$ — последовательность точек пересечения траектории с границами конуса $l_1, l_2, R_k \in \bar{V}$, т. е. в точках R_k происходит переключение управления. Пусть d_k — длина проекции отрезка $R_k R_{k+1}$ траектории на прямую l ; h_1 — расстояние от точки R_1 до прямой p . Поскольку точка M стабилизируема в конусе, то $\sum_{k=1}^{\infty} d_k = h_1$. Пусть $v(R)$ — модуль проекции на прямую l вектора скорости $r(R, u_i), i = 1, 2, R \in \bar{V}$. В силу условия неколлинеарности векторов фазовой скорости при $u = u_1, u = u_2$ и непрерывной зависимости $r(R, u_i)$ от R в замкнутой области $\bar{V}$ существует $\tilde{v} = \min_{R \in \bar{V}} v(R) > 0$. Пусть Δt_k — время перемещения фазовой точки по отрезку траектории $R_k R_{k+1}$. Очевидно, $\Delta t_k \leq \frac{d_k}{\tilde{v}}$.

Тогда $\sum_{k=1}^{\infty} \Delta t_k \leq \sum_{k=1}^{\infty} \frac{d_k}{\tilde{v}} = \frac{1}{\tilde{v}} \sum_{k=1}^{\infty} d_k = \frac{1}{\tilde{v}} h_1$. Таким об-

разом, ряд $\sum_{k=1}^{\infty} \Delta t_k$ сходится, а тогда его остаток

$r_k = \sum_{i=k}^{\infty} \Delta t_i$ стремится к нулю при $k \rightarrow \infty$: $\lim_{k \rightarrow \infty} r_k = 0$,

т. е. для любого $T > 0$ найдется натуральное $k_0 = k_0(T)$ такое, что для всех $k > k_0$ выполняется $r_k < T$. Далее, поскольку $\lim_{n \rightarrow \infty} |M_n M| = 0$, то для любого $\varepsilon > 0$ най-

дется натуральное $n_0 = n_0(\varepsilon)$ такое, что при всех $n > n_0$

имеем $|M_n M| < \varepsilon$. Пусть $\tilde{k} = \max(n_0, k_0)$. Тогда при

всех $k > \tilde{k}$, $n > \tilde{k}$ имеем $|M_n M| < \varepsilon$ и $r_k < T$. Это оз-

начает, что из пересечения проколотой ε -окрестности точки M и конуса — $\dot{U}_\varepsilon(M) \cap \bar{K}$ — траектория попадает в любую окрестность точки M за время, меньшее, чем T , что и означает T -локальную стабилизируемость точки M в конусе стабилизации $\bar{K}(M)$. Итак, теорема доказана.

Точечная стабилизация автоколебаний

Известно, что автоколебательные режимы функционирования многих технических систем и технологических процессов крайне нежелательны, так как вызывают различного рода нестабильности, приводящие к снижению эффективности оборудования или процесса. В качестве примеров можно привести автоколебания, возникающие при стабилизации химических реакторов; периодические срывы баланса, находящегося в корообдирочном барабане, что приводит к дополнительным нагрузкам; пульсации давления, генерируемые гидравлическим оборудованием и вызывающие нестабильность напуска бумажного полотна, и многие другие. В связи с этим предлагается рассмотреть задачу точечной стабилизации предельных циклов. Отметим, что понятие точечной устойчивости инвариантных множеств введено в [5]. Пусть система (11) при некотором постоянном значении $u = u^*$ имеет предельный цикл P .

Определение 5. Будем называть предельный цикл P системы (11) *точечно стабилизируемым*, если любая точка, принадлежащая ему, стабилизируема.

Таким образом, для того чтобы предельный цикл был точечно стабилизируемым, недостаточно построить управление, при котором он является асимптотически устойчивым. Следующая теорема дает достаточное условие точечной стабилизируемости предельного цикла системы (11).

Теорема 2. Пусть при $u = u_1$ и $u = u_2$ система (12) имеет предельный цикл P и выполнены условия

$$H(x, y, u_1)H(x, y, u_2) < 0 \text{ при } (x, y) \in P, \quad (12)$$

где $H(x, y, u) = -yf(x, y, u) + xg(x, y, u)$;

$$\dot{d}(t) < 0, \quad (13)$$

где $d(t) = d(M(t), P, u_i)$ — расстояние от фазовой точки $M(t) = (x(t), y(t)) \in \Omega$ до P в момент времени t при $u = u_i$, Ω — некоторая окрестность P .

Тогда предельный цикл P системы (11) можно точно стабилизировать в монотонном s -конусе с помощью кусочно-постоянного управления, принимающего два значения u_1 и u_2 , а любая точка некоторой окрестности цикла P T -стабилизируема.

Доказательство. Переходя к полярным координатам $x = \rho \cos \alpha$, $y = \rho \sin \alpha$ в системе (11), получим

$$\begin{cases} \dot{\rho} = f(\rho \cos \alpha, \rho \sin \alpha) \cos \alpha + g(\rho \cos \alpha, \rho \sin \alpha) \sin \alpha; \\ \dot{\alpha} = -f(\rho \cos \alpha, \rho \sin \alpha) \sin \alpha + g(\rho \cos \alpha, \rho \sin \alpha) \cos \alpha, \end{cases} \quad (14)$$

где ρ , α — полярные координаты. Далее, $H(x, y, u) = H(\rho \cos \alpha, \rho \sin \alpha, u) = -f \rho \sin \alpha + g \rho \cos \alpha$, откуда получаем

$$\begin{aligned} H(x, y, u_1)H(x, y, u_2) &= \\ &= H(\rho \cos \alpha, \rho \sin \alpha, u_1)H(\rho \cos \alpha, \rho \sin \alpha, u_2) = \\ &= (-f_1 \rho \sin \alpha + g_1 \rho \cos \alpha)(-f_2 \rho \sin \alpha + g_2 \rho \cos \alpha) = \\ &= \rho^2(-f_1 \sin \alpha + g_1 \cos \alpha)(-f_2 \sin \alpha + g_2 \cos \alpha) = \\ &= \rho^2 \dot{\alpha}(u_1) \dot{\alpha}(u_2), \end{aligned}$$

где f_i, g_i — правые части системы (11) при $u = u_i$ после перехода к полярным координатам; $\dot{\alpha}(u_i)$ — производная по времени от компонента $\alpha(t)$ решения системы (14), соответствующего управлению $u = u_i$, $i = 1, 2$. Из последнего соотношения следует, что (12) равносильно условию

$$\dot{\alpha}(u_1) \dot{\alpha}(u_2) < 0, \quad (15)$$

которое означает, что при $u = u_1$ и $u = u_2$ движение фазовой точки по предельному циклу происходит в противоположных направлениях. Перейдем к построению стабилизирующего управления для произвольной точки $A = A(x_1, y_1) \in P$. Пусть $n(A)$ — нормаль к P в точке A , e — единичный вектор нормали. В силу условия (15) в достаточно малой окрестности точки A траектории трансверсально пересекают нормаль $n(A)$ в противоположных направлениях. Рассмотрим двойной конус $\bar{K}_\pm = \pm \bar{K}(A, e, a) \in \Omega$ с вершиной в точке A настолько узкий, что траектории трансверсальны лучам l_1, l_2 , его ограничивающим. Для этого достаточно выбрать a достаточ-

но близким к 1. Предположим, что начальная точка $M_0 \in \Omega$ не принадлежит конусу. Пусть, например, при $u = u_1$ траектория входит в конус, пересекая луч l_1 , и выходит из него, пересекая луч l_2 . В момент выхода траектории из конуса переключаем управление на значение $u = u_2$. Далее траектория достигнет границы l_1 , и в этот момент положим $u = u_1$ и т. д. Таким образом, управление переключается при попадании траектории на границы конуса. При этом траектория неограниченно приближается к точке A , оставаясь в конусе $\bar{K}_{\pm}$. Отсутствие предельной точки траектории, не совпадающей с A , доказывается стандартным рассуждением от обратного с использованием условия (13), из которого следует, что в достаточно малой окрестности A $d(t) = |AM(t)|$, где $M(t) \in n(A)$. Итак, траектория, оставаясь в конусе, неограниченно приближается к точке A . Если начальная точка $M_0 \in \Omega$, то при любом управлении $u = u_i$ фазовая точка перейдет в сколь угодно малую окрестность точки A и при соответствующем переключении управления не будет ее покидать. Таким образом, область стабилизируемости совпадает с Ω .

Далее, для любой точки $M \in \Omega$ в силу непрерывности и условия (15) выполняется условие неколлинеарности векторов $r(M, u_1)$, $r(M, u_2)$. Тогда по теореме 1 получаем T -стабилизируемость любой точки M , принадлежащей достаточно малой окрестности предельного цикла P , в которой можно построить соответствующий конус стабилизации.

Пример. Рассмотрим систему

$$\begin{cases} \dot{x} = -uy + x(1 - x^2 - y^2); \\ \dot{y} = ux + y(1 - x^2 - y^2), \end{cases} \quad (16)$$

имеющую предельный цикл $\rho = 1$. Пусть управление u принимает два значения ± 1 . Покажем, что условие (12) выполняется. Перейдя к полярным координатам в (16), получим $\dot{\rho} = \rho(1 - \rho^2)$, $\dot{\alpha} = u$, откуда следует условие (15), равносильное (12). Поскольку $d(t) = |\rho(t) - 1|$, то $\dot{d} = \dot{\rho} = \rho(1 - \rho^2) < 0$ при $\rho > 1$, $\dot{d} = -\dot{\rho} = \rho(\rho^2 - 1) < 0$ при $\rho < 1$. Итак, условие (13) выполнено, а значит, с помощью кусочно-постоянного управления, принимающего значения ± 1 , можно стабилизировать любую точку A цикла $\rho = 1$ в монотонном двойном s -конусе $\bar{K}_{\pm} = \pm \bar{K}(A, e, a) \in \Omega$, причем для данного примера, очевидно, $\Omega = R^2$.

Замечание. Рассмотрим вместо (16) (в полярных координатах) систему

$$\begin{cases} \dot{\rho} = \rho(1 - \rho^2); \\ \dot{\alpha} = u + g(\rho, \alpha), \end{cases} \quad (17)$$

где $g(\rho, \alpha)$ — непрерывная функция, удовлетворяющая условию $|g(\rho, \alpha)| \leq c$, где c — постоянная, $0 < c < 1$. Тогда по-прежнему можно стабилизировать любую точку A цикла в s -конусе $\bar{K}_{\pm} = \pm \bar{K}(A, e, a)$, так как знак правой части второго уравнения системы (17) совпадает со знаком управления u . В этом проявляется свойство инвариантности стабилизации с помощью s -конуса по отношению к ограниченным аддитивным возмущениям.

Краткие выводы

Усложнение проблем управления техническими объектами, технологическими и экономическими процессами вызывает необходимость поиска новых методов математического моделирования. Рассмотренные в работе подходы позволяют решать некоторые возникающие при этом задачи стабилизации. Обобщено понятие стабилизируемости желаемого состояния системы, охватывающее случаи наличия ограничений на управления и фазовые переменные. Введено новое понятие T -стабилизируемости, т. е. стабилизируемости за конечное время, что важно при решении ряда задач, например, при управлении химическими реакторами или системами биологической очистки сточных вод. Для решения соответствующих задач разработан алгоритм конусной стабилизации.

Список литературы

1. **Зубов В. И.** Лекции по теории управления. М.: Наука, 1975. 496 с.
2. **Леонов Г. А., Шумафов М. М.** Методы стабилизации линейных управляемых систем. СПб.: Изд-во СПб ун-та, 2005. 424 с.
3. **Смирнов Е. Я.** Стабилизация программных движений. СПб.: Изд-во СПб ун-та, 1997. 308 с.
4. **Петров Н. Н.** Локальная управляемость автономных систем // Дифференциальные уравнения. 1968. Т. 4. Вып. 7. С. 1218—1232.
5. **Гелиг А. Х., Леонов Г. А., Якубович В. А.** Устойчивость нелинейных систем с неединственным состоянием равновесия. М.: Наука, 1978. 400 с.
6. **Кириллов А. Н.** Задачи стабилизации экологических систем // Обзорение прикладной и промышленной математики. 1994. Т. 1. Вып. 4. С. 883—892.

УДК 658.512.011.56:004.42

М. Х. Дорри, д-р техн. наук, зав. лаб.,
А. А. Рошин, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,
Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН, Москва

Инструментальная программно-алгоритмическая система для разработки исследовательских комплексов

Рассматривается созданная в ИПУ РАН инструментальная программно-алгоритмическая система для разработки исследовательских комплексов. Описывается ее структура и особенности реализации основных функций. Приводится пример комплекса, разработанного с помощью данной системы.

Ключевые слова: программное обеспечение, моделирование, системы управления, исследовательские комплексы.

Введение

В настоящее время любая крупная разработка системы управления не обходится без исследовательских комплексов для уточнения принятых конструктивных решений и отработки алгоритмов управления.

Современные средства разработки исследовательских комплексов балансируют между двумя крайностями. С одной стороны, средства должны быть достаточно простыми и наглядными, чтобы ими могли пользоваться не только квалифицированные программисты, но и специалисты-предметники, которые могут описать алгоритм и законы работы исследуемой системы, но не знают всех тонкостей того или иного языка программирования. С другой стороны, эти средства должны позволять закладывать в систему достаточно сложные алгоритмы и не сковывать разработчика системы простыми, но жесткими конструкциями, рассчитанными на неподготовленных пользователей.

Исследовательские комплексы, представляющие собой уникальный программный продукт, созданный командой программистов под конкретную задачу, позволяют максимально полно учесть специфику исследуемой системы. Однако такая уникальность сильно затрудняет модернизацию созданного комплекса и изменение его структуры, если это требуется. Фактически, для того чтобы внести серьезные изменения в комплекс, его программу придется переписывать заново. По этой причине современные средства разработки пытаются создавать систему

из стандартизованных, функционально законченных модулей, не лишая при этом пользователя возможности самостоятельно разрабатывать новые модули и добавлять их в систему. Именно по такой схеме построена инструментальная программно-алгоритмическая система РДС ("Расчет Динамических Систем") [1], разработанная в Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН.

Структура программно-алгоритмической системы

Система достаточно универсальна — с ее помощью можно разрабатывать исследовательские комплексы различного назначения. Она обладает простым и понятным интерфейсом, который смогут без проблем использовать разработчики и пользователи с разным уровнем подготовки: от профессиональных программистов до узких специалистов в предметной области.

Общая структура РДС представлена на рис. 1 и состоит из управляющей программы (среды разработки) и набора блоков-модулей, выполняющих разные задачи. Тип и состав используемых модулей определяется назначением разрабатываемого исследовательского комплекса и желанием разработчика. Управляющие программы системы, установленные на разных машинах, имеют возможность обмениваться данными.

На каждой машине, входящей в состав системы, устанавливается среда разработки — управляющая программа, которая обеспечивает взаимодействие модулей системы с пользователем и между собой.

В РДС структурная схема исследовательского комплекса собирается из отдельных блоков, выполняющих различные функции: вычисление, диалог с пользователем, передача данных и т. п. (рис. 2). Блоки соединяются между собой с помощью связей — линий со стрелками, обозначающих передачу данных с выхода одного блока на вход другого. Такой принцип построения схем привычен и зна-

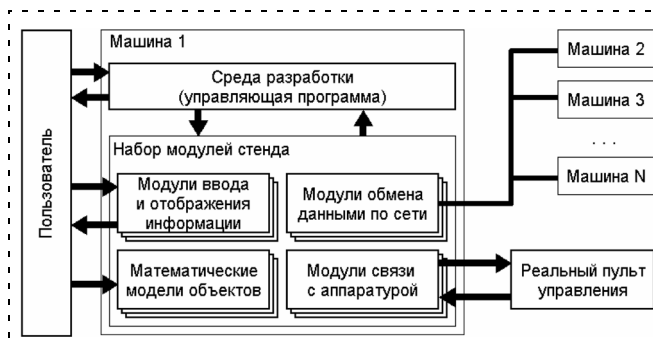


Рис. 1. Структура системы

ком большинству пользователей, он применяется практически во всех современных средствах разработки и моделирования (например, в Simulink [2] и LabView [3]).

По назначению блоки структурной схемы делятся на несколько групп:

1) блоки математических моделей объектов, которые описывают поведение различных объектов разрабатываемого комплекса. В составе системы предусмотрена библиотека стандартных модулей;

2) блоки ввода и отображения информации, предназначенные для взаимодействия комплекса с пользователем. Информация о процессах, протекающих в системе, отображается в наглядной форме: в виде числовых индикаторов, графиков, таблиц и т. п.;

3) блоки обмена данными по сети, обеспечивающие связь между машинами системы;

4) блоки связи с аппаратурой, позволяющие считывать цифровые и аналоговые данные с подключенных к машине внешних устройств и передавать данные на эти устройства.

Несмотря на то что четыре описанных типа блоков выполняют разные задачи, в РДС используется единый универсальный тип блока, который может в зависимости от своей управляющей программы выполнять все перечисленные выше функции.

Строение блоков

С точки зрения пользователя блок в РДС представляет собой объект, который может выполнять различные действия в ответ на команды от других блоков, при щелчках и перемещении курсора мыши на его изображении, при нажатии кнопок на клавиатуре, по таймеру, при обновлении окна программы и т. п. Технически каждый блок схемы может быть связан с какой-либо специальным образом оформленной функцией во внешней динамической библиотеке (DLL). Такая функция называется управляющей функцией блока (рис. 3). Пользователю, использующему стандартные блоки в своей схеме, не обязательно знать, какой управляющей функцией обслуживается тот или иной блок и как устроена эта функция, — он просто добавляет в схему блок из библиотеки стандартных блоков. При необходимости квалифицированный пользователь-программист может самостоятельно написать управляющую функцию для своего блока, скомпилировать библиотеку

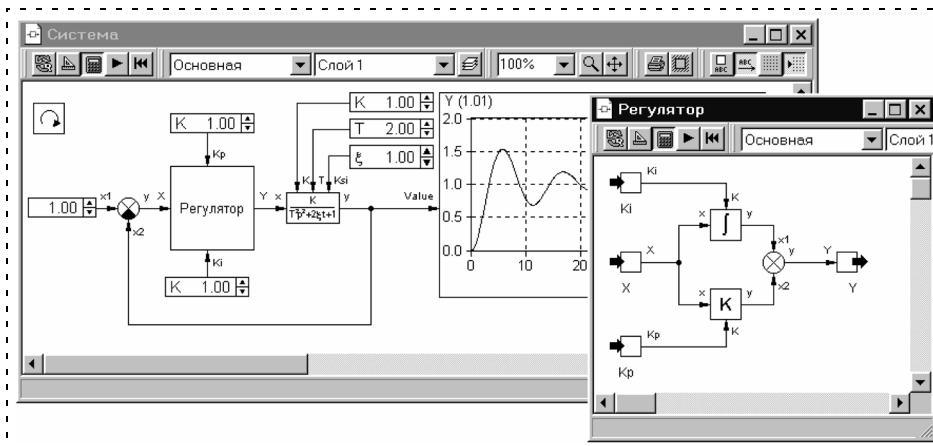


Рис. 2. Типичная схема простого исследовательского комплекса

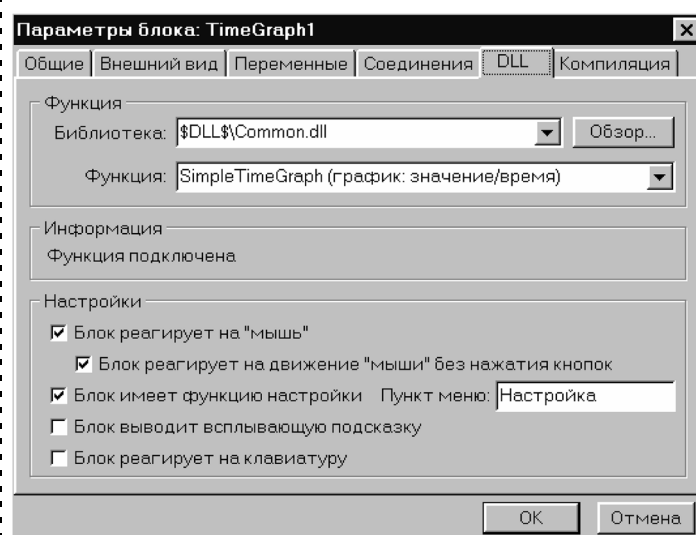


Рис. 3. Подключение управляющей функции

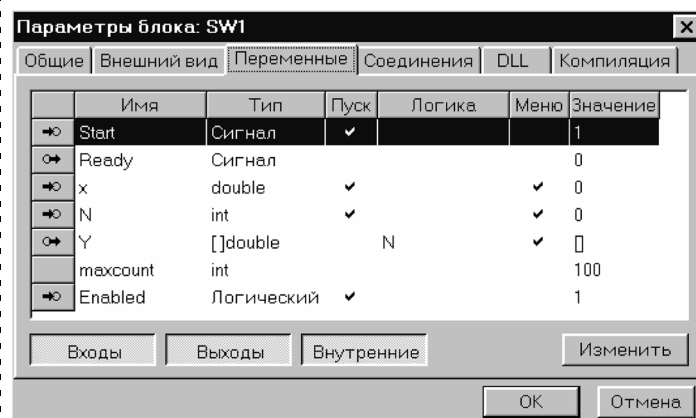


Рис. 4. Переменные блока

и использовать этот блок в своих схемах. При этом он может писать на любом удобном ему языке программирования и пользоваться любым компилятором, который способен создавать динамически подключаемые библиотеки для Windows.

Каждый блок в РДС содержит набор переменных (рис. 4), которые могут иметь различные тип (логические, целые числа, числа с плавающей точкой, строки, массивы и матрицы, а также структуры произвольного, определяемого пользователем, вида) и назначение (входы, выходы и внутренние переменные).

Входы и выходы блоков могут соединяться связями, если их типы совместимы между собой (например, можно соединить целый выход со входом с плавающей точкой, но нельзя соединить выход-матрицу с логическим входом). При этом в процессе работы комплекса изменившееся значение на выходе блока будет передаваться на все соединенные с ним входы, если это явно не запрещено логикой работы этого блока.

Для облегчения моделирования систем с логическим управлением в РДС был введен специальный вариант логического типа переменной — сигнальный тип. Опустив некоторые технические подробности, можно сказать, что для сигнального типа по связям передается не значение переменной, а факт изменения этого значения с 0 на 1. Каждый блок имеет две фиксированные сигнальные переменные: вход "Start" и выход "Ready". Если в параметрах блока не включен принудительный постоянный запуск функции отклика в каждом такте моделирования, функция будет запускаться только при появлении единицы на входе "Start". Перед передачей управления функции блока РДС установит значение переменной "Start" в 0, подготавливая ее к приему следующего сигнала, а значение "Ready" — в 1, чтобы уведомить подключенные блоки о срабатывании данного. После того как функция отклика завершит свою работу, значения выходов блока будут переданы по связям только в том случае, если значение переменной "Ready" останется равным 1. Использование переменных "Start" и "Ready" позволяет простыми средствами гибко управлять логикой и последовательностью срабатывания блоков схемы. При этом использование этого механизма совсем не обязательно в тех случаях, когда такое управление не требуется.

Для расширения возможностей логического управления в РДС также реализованы следующие возможности:

- автоматический запуск функции блока при срабатывании связи, подключенной к конкретному входу;
- автоматическая запись значения 1 в указанную разработчиком сигнальную переменную при срабатывании связи, подключенной к конкретному входу;

- разрешение или запрещение срабатывания связи, подключенной к конкретному выходу блока;
- разрешение срабатывания только одной из связей, подключенных к элементам массива-выхода.

Такая автоматизация позволяет упростить модели блоков и снизить нагрузку на систему за счет исключения "ненужных" срабатываний.

Подсистемы исследовательского комплекса

Для удобства построения схемы функционально обособленная часть блоков может быть выделена в отдельную подсистему. Подсистема представляет собой блок, внутри которого размещаются другие блоки. Переменным подсистемы соответствуют внешние входы и внешние выходы, которые служат для соединения блоков внутри подсистемы с блоками снаружи нее. На рис. 2 изображена собранная в РДС следящая система, регулятор которой оформлен в виде отдельной подсистемы с тремя входами ("X", "Ki" и "Kp") и одним выходом ("Y"). Открытое окно этой подсистемы видно в правой части рисунка.

Внутри окна подсистемы блоки и связи могут размещаться на разных слоях, видимость и взаимное расположение которых может задаваться пользователем. Использование слоев позволяет улучшить читаемость сложных схем. Разработчик может разместить информационные и логические связи схемы на разных слоях. Конфигурация слоев задает для каждого слоя его близость к переднему плану, видимость и разрешение редактирования его содержимого.

Например, в первой конфигурации слой 1 может находиться перед слоем 2, во второй — за слоем 2, а в третьей конфигурации слой 1 может быть невидимым. Особенно часто слои используются в подсистемах, содержащих какие-либо индикаторы, поскольку при наблюдении за исследуемым процессом часто бывает удобно скрыть все вспомогательные блоки, обеспечивающие работу схемы, оставив видимыми только сами индикаторы. На рис. 5 (см. вторую сторону обложки) изображено открытое окно редактора слоев РДС на фоне сложной схемы с набором подвижных блоков и изображением карты города. Если бы в этой схеме не было слоев, она стала бы совершенно нечитаемой из-за большого числа вспомогательных блоков и связей, обеспечивающих ее работу.

Отображение информации

При создании исследовательских комплексов необходимо обеспечивать наглядное отображение результатов моделирования систем. В состав средства разработки должны входить различные стандартные модули отображения: графики, числовые индикаторы, таблицы, виртуальные приборы и т. п. Подобные блоки есть и в стандартной библиотеке РДС.

Однако невозможно заранее предусмотреть средства индикации на все случаи жизни. По этой причине в РДС включен векторный редактор внешнего вида блоков, позволяющий создавать изображения, состоящие из простых графических объектов, положение, цвет и размер которых могут быть связаны с различными переменными блока. Таким образом, разработчик комплекса может сам "нарисовать" нужный ему индикатор или даже создать анимированное изображение какого-либо объекта. На рис. 6 изображено анимированное изображение манипулятора, созданное в векторном редакторе РДС.

Манипулятор состоит из трех звеньев, углы поворота шарниров которых связаны с переменными "a1", "a2" и "a3". Линейное перемещение губок захвата задается переменными "s2" и "s1". В этом примере углы поворота шарниров и расстояние между губками задается с помощью виртуальных рукояток (стандартных блоков РДС), но в реальном комплексе блок, изображающий манипулятор, может быть подключен к системе управления, созданной разработчиком, и может наглядно отображать состояние манипулятора в реальном времени.

Если для какого-либо блока исследовательского комплекса требуется более сложное изображение, его может программно формировать функция отклика этого блока. Так устроены, например, график на рис. 2 и виртуальные рукоятки на рис. 6. Программное рисование сложнее создания изображения в векторном редакторе, но оно дает разработчику полную свободу в создании сложных индикаторов, отображении графиков и т. п. В частности, для одного из исследовательских комплексов был разработан блок, отображающий в окне РДС карту местности в формате MapInfo (см. рис. 5) и способный пересчитывать координаты на местности в экранные координаты для индикации положения и перемещения объектов на этой карте. Объекты были реализованы в виде отдельных блоков с векторными анимированными картинками, получающих координаты от блока-карты.

Динамические переменные

Часто в схемах исследовательских комплексов присутствуют параметры, доступ к которым необходим большому числу блоков в разных частях схемы. Типичный пример такого параметра — текущее

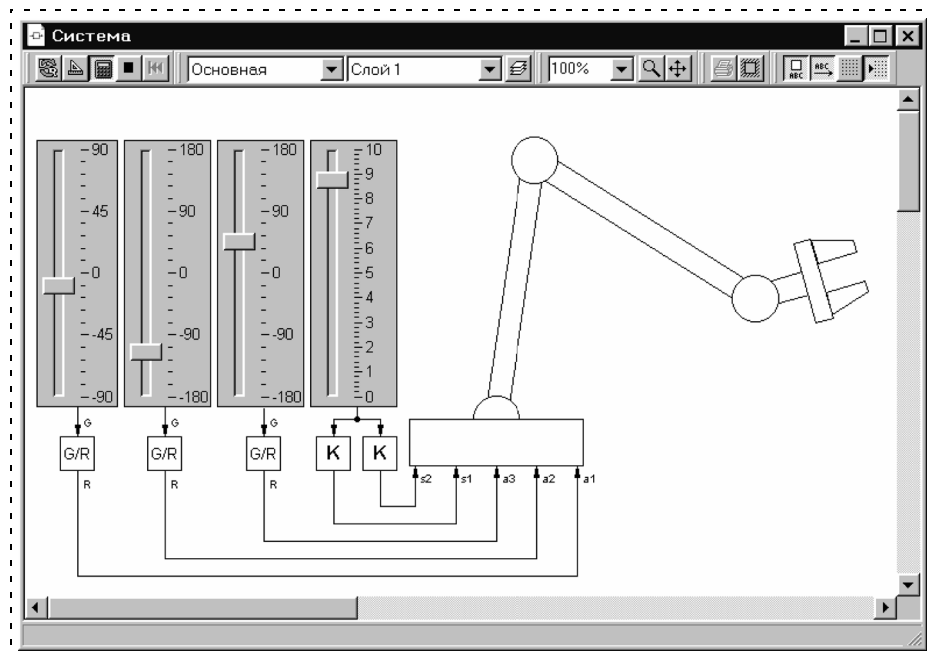


Рис. 6. Анимация манипулятора средствами РДС

время. Оно необходимо математическим моделям динамических звеньев, графикам процессов, индикаторам скорости и т. п. Если бы значение времени пришлось передавать во все эти блоки с помощью линий связи, схема была бы сильно перегружена этими линиями. Для таких случаев в РДС введены специальные динамические переменные, к которым могут одновременно обращаться несколько блоков без использования соединительных связей. Такая переменная создается каким-либо блоком в одной из подсистем схемы (как правило, в той же подсистеме, в которой находится этот блок), после чего к ней могут получить доступ все блоки этой подсистемы и вложенных в нее подсистем. РДС следит за динамическими переменными и информирует блоки, работающие с ними, о создании и удалении этих переменных. Также в РДС встроен механизм поиска переменной с указанным именем в ближайшей подсистеме. Таким образом, блоку предоставляется доступ к ближайшей в иерархии подсистем переменной с указанным именем, что позволяет иметь в схеме комплекса несколько одинаковых переменных в разных подсистемах, каждая из которых доступна только из своего "куста" подсистем.

Передача информации по шинам

Другой способ не перегружать схему большим числом связей — объединить отдельные связи в шины. Шина представляет собой набор независимых каналов передачи данных, каждый из которых имеет собственное имя и тип. Графически шина изображается в виде одной линии, как правило, утолщенной, к которой подходят и от которой отходят отдельные

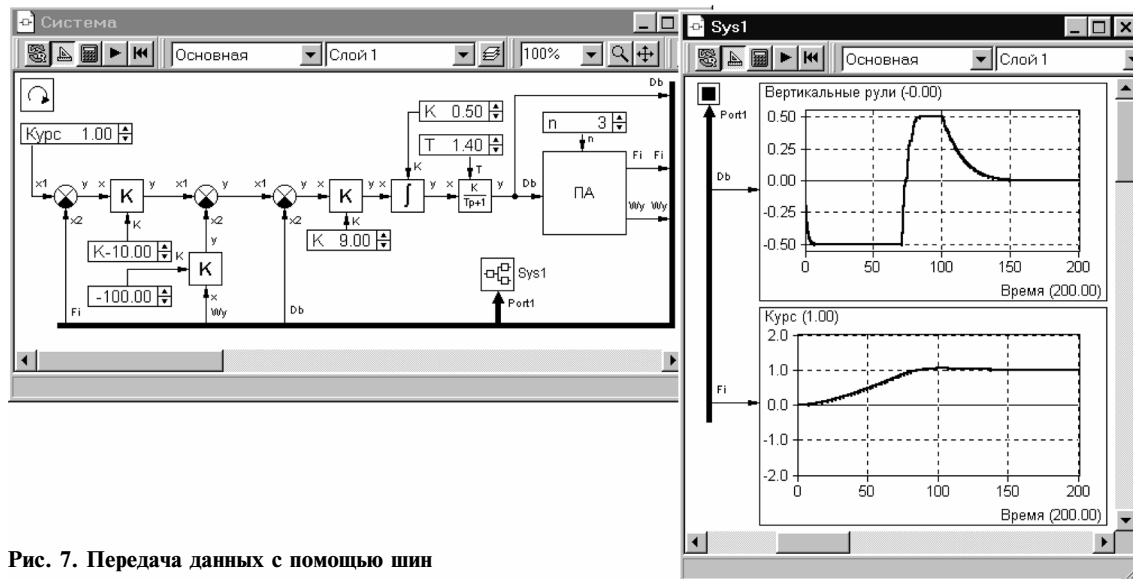


Рис. 7. Передача данных с помощью шин

связи. В точке присоединения связи к шине обычно изображается имя канала, с которым соединяется связь. В схеме может быть произвольное число не связанных друг с другом шин, которые могут при необходимости входить внутрь подсистем. На рис. 7 изображена система управления курсом подводного аппарата, в которой используется шина с тремя каналами: "Db", "Fi" и "Wy". Эта шина входит в подсистему "Sys1", в которой два из трех ее каналов подключены к графикам. Без использования шины в системе увеличилось бы число линий связей, кроме того, в подсистеме "Sys1" потребовалось бы два внешних входа. В данном случае схема выглядела бы нормально и без шины, но когда число передаваемых переменных исчисляется десятками, собирать схемы исследовательских комплексов с использованием шин гораздо удобнее.

Особенности построения многомерных систем

Инструментальная система РДС может работать со схемами, состоящими из большого числа блоков — в некоторых выполненных с его помощью комплексах число блоков превышает тысячу. Многие блоки используются в схеме по многу раз. В этом случае удобно использовать функции группового выбора и групповой установки параметров блоков и связей. Например, можно выделить в схеме все блоки, имя которых начинается со строки "Sum", и установить для них всех новый внешний вид. Или выделить все связи, начинающиеся от переменной целого типа, и установить им всем синий цвет и т. п.

Обмен данными по сети

В состав системы также входят модули, позволяющие двум схемам на разных машинах обмениваться данными по сети. Это часто бывает необхо-

димо при создании различных тренажеров или для того, чтобы вывести результаты исследования на большое число мониторов. В РДС используется клиент-серверная модель соединения: одна из машин в составе комплекса назначается сервером и координирует обмен данными между остальными машинами, в каждую из которых загружена своя часть схемы.

Поддержка модулей автокомпиляции

Для того чтобы облегчить жизнь пользователю, желающему самостоятельно создавать новые блоки для РДС, в комплекс была добавлена поддержка модулей автокомпиляции — программ, которые обеспечивают автоматическое формирование полного исходного текста функции блока.

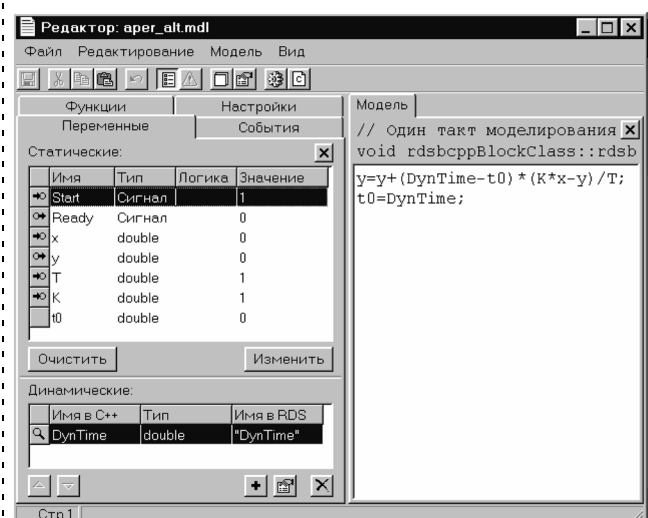


Рис. 8. Автоматическая компиляция управляющей функции

При использовании стандартного модуля автокомпиляции, входящего в состав РДС, пользователь вводит текст модели блока в виде фрагментов программы на языке C++, из которых автоматически собирается и компилируется программа блока со всеми необходимыми описаниями. Освоение способа создания моделей блоков с помощью этого модуля не вызывает затруднений.

На рис. 8 изображено окно редактора модуля автокомпиляции с загруженным текстом простейшей модели апериодического звена.

Для того чтобы создать такую модель, пользователю нужно заполнить список переменных блока в левой части окна, указать, что блок будет использовать динамическую переменную с именем "DynTime" (стандартное имя переменной текущего времени в РДС), и ввести текст модели в правой части окна. Текст модели состоит из двух строчек: в первой по разностному уравнению рассчитывается изменение выхода блока за интервал времени, прошедший с предыдущего запуска ("DynTime-t0"), во второй — запонируется новый момент времени, на который вычислено значение выхода "y". Все остальные описания и вызовы модуль автокомпиляции добавит сам.

С помощью модуля автокомпиляции можно писать и более сложные модели, используя все стандартные библиотеки и функции языка C++.

Модуль автокомпиляции также позволяет упростить ввод и хранение настроечных параметров блока — пользователю достаточно заполнить список параметров и указать названия и типы полей для их редактирования (рис. 9).

Пример исследовательского комплекса

Приведем фрагменты копий экрана исследовательского комплекса, который был разработан с помощью инструментального комплекса РДС для разработки алгоритмов управления движением подводной лодки.

На рис. 10 (см. вторую сторону обложки) изображены основные управляющие агрегаты лодки — рули, цистерны и винт. В исследовательском комплексе возможно задавать управляющие воздействия, имитировать заклинку рулей и другие аварийные ситуации.

Изображения всех агрегатов анимированы средствами РДС: схематически показываются отклонения рулей, уровни воды в цистернах, давление воз-

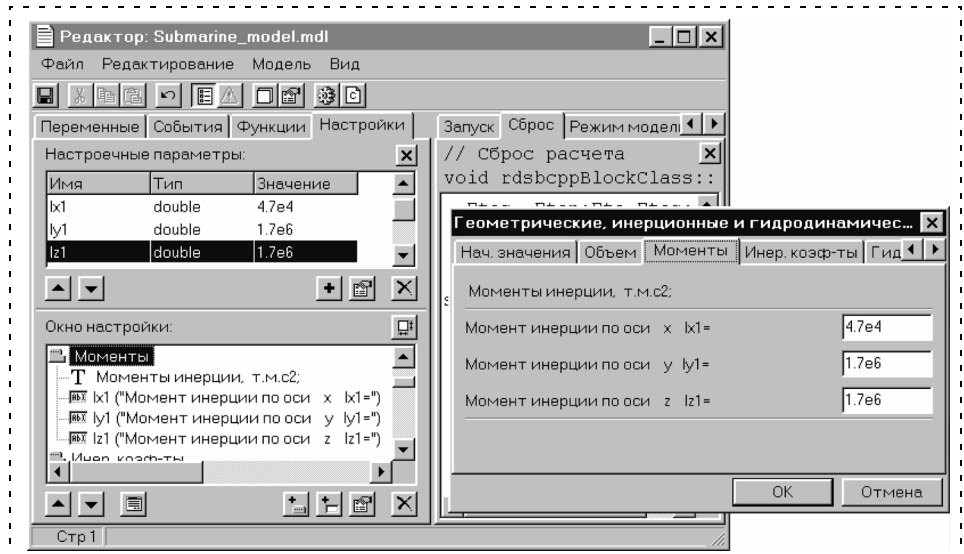


Рис. 9. Создание окна настроек блока

духа в баллонах, открытие и закрытие клапанов и кингстонов. Кроме того, условно показываются векторы сил, действующих на подводную лодку, отображаются различные числовые индикаторы параметров, которые на рисунке обнулены. Следует подчеркнуть, что вся анимация сделана во встроенном векторном редакторе РДС, который достаточно прост в освоении: разработчик просто рисует картинку, изображающую тот или иной узел, а затем связывает ее координаты, угол поворота, цвет или видимость на экране с одной из координат системы.

В подсистеме, показанной в нижней части рис. 10 (см. вторую сторону обложки), видны пульта операторов, управляющих горизонтальным и вертикальным движением лодки и имеющих возможность корректировать ее движение.

Часть индикаторов на этих пультах создана в уже упомянутом векторном редакторе РДС, часть — в виде отдельных модулей, написанных на языке высокого уровня и подключенных к системе. В отдельной подсистеме на рис. 10 присутствует блок, отображающий положение подводной лодки в трехмерном пространстве с использованием стандартной графической библиотеки OpenGL.

В заключение можно выразить надежду, что при создании комплексов для моделирования и разработки алгоритмов управления программная система РДС станет полезным инструментом.

Список литературы

1. А. с. 2004611323. Расчет Динамических Систем (РДС) / М. Х. Дорри, А. А. Рошин // Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 28 мая 2004 г.
2. Потемкин В. Г. Система MATLAB. Справочное пособие. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1997. 350 с.
3. Тревис Дж. LABVIEW для всех. М.: ДМК Пресс; Прибор-Комплект, 2005. 544 с.

УДК 623.4.056.4

И. А. Прошин, д-р техн. наук, зав. кафедрой,
В. М. Тимаков, доц.,
В. Н. Прошкин, канд. техн. наук, доц.,
 Пензенская государственная
 технологическая академия

Совершенствование динамических стенов авиационных тренажеров на базе гидроприводов

Рассматриваются методы моделирования акселерационных воздействий. По результатам анализа законов управления динамическими стендами предложен способ управления вертикальной перегрузкой. Описана система гидропривода с компенсацией веса платформы, разработана ее математическая модель, приведены результаты моделирования и экспериментального исследования разработанной системы.

Ключевые слова: акселерационные воздействия, гидропривод, динамический стенд, имитатор перегрузок, закон управления, авиационный тренажер.

Введение

Одно из приоритетных направлений развития науки и техники — тренажеростроение — обусловливается настоятельной необходимостью повышения качества подготовки летного состава, обеспечения безопасности и надежности полетов при сокращении затрат на подготовку, обучение и тренировку летных экипажей. Авиационные тренажеры — имитаторы полета и работы самолетного оборудования с помощью вычислительных и моделирующих систем — позволяют отрабатывать навыки в пилотировании самолета, аэронавигации и обслуживании всего комплекса его оборудования, а для военных самолетов обеспечивают возможность совершенствовать действия экипажа в полете на боевое применение.

Комплексный тренажер представляет собой совокупность взаимосвязанных элементов:

- кабины самолета со всем штатным оборудованием, установленной на динамическом стенде;
- вычислительного устройства;
- навигационных приборов;
- задатчиков условий полета и устройства ввода отказов имитируемых приборов и систем;
- агрегатов системы имитации визуальной обстановки;
- динамического стенда (ДС), обеспечивающих систематическую тренировку летного состава независимо от метеорологических условий, наличия и состояния самолетов данного типа, а также вне связи с воздушной обстановкой и ограничениями воздушного движения. Особенно важно, что тренажеры позволяют в совершенно безопасных

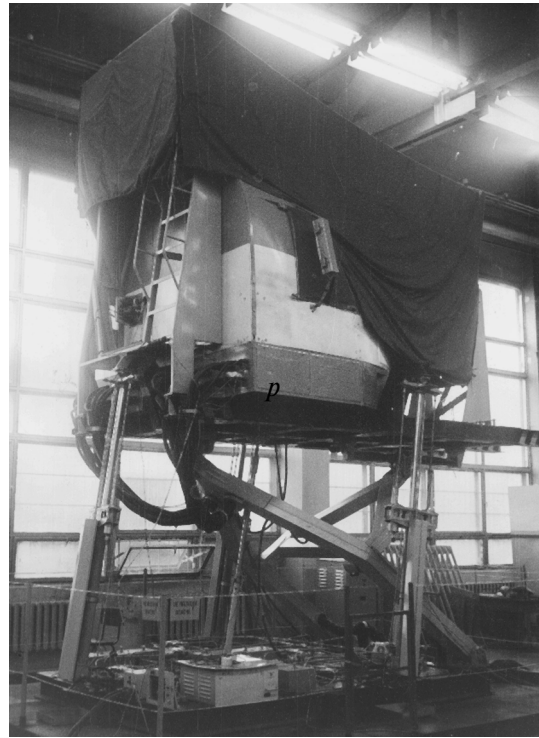


Рис. 1. Динамический стенд тренажера

наземных условиях обучать экипажи действиям в различных аварийных ситуациях, при которых возникают высокие перегрузки и сложные пространственные перемещения самолета.

Динамический стенд (рис. 1) является основным элементом тренажера, формирующим акселерационные воздействия, подобные тем, которые человек испытывает в реальных условиях, находясь на движущемся объекте (самолете, танке и т. д.), и одновременно сам представляет собой систему взаимосвязанных элементов, объединяющих:

- подвижную платформу с удерживающими кинематическими звеньями;
- кабину тренажера;
- проекционный экран;
- проектор телевизионной аппаратуры;
- имитатор визуальной обстановки;
- исполнительный электрогидравлический привод.

В данной статье основное внимание уделено рассмотрению динамических стенов и, прежде всего, совершенствованию законов управления вертикальной перегрузкой, а также исследованию одного из основных элементов ДС — гидропривода.

Законы управления вертикальной перегрузкой

Силовое (акселерационное) воздействие (АВ) на пилота становится определяющим при выработке навыков пилотирования и достигается перемещением кабины тренажера, установленной на динамическом стенде (рис. 1), в результате чего создаются "полетные" перегрузки, удары, тряска при посадке и взлете,

вибрации от силовой установки и на критических режимах полета, а также эффекты, возникающие при стрельбе из ствольного и реактивного оружия.

Динамические стенды при массе кабины тренажера и всех подвижных частей до 9 т должны обеспечивать:

- скорости перемещения до 1,2 м/с;
- возможность создания перегрузок в полосе частот от 0,05 до 15 Гц;
- запаздывания в имитации начала движения не более 0,15 с;
- высокую плавность перемещения.

При этом имитация перегрузок должна осуществляться в ограниченных конструкцией стенда пределах для угловых и линейных перемещений. Очевидно, что с увеличением диапазона перемещений кабины тренажера появляется возможность более качественно воспроизводить ощущения движения, близкие к полетным. Однако увеличение диапазонов перемещения кабины тренажера приводит к росту стоимости динамического стенда пропорционально кубу отношения перемещений, поэтому увеличение диапазона перемещений приводит к резкому увеличению стоимости всего тренажера.

Исследования отечественных и зарубежных ученых [1—6] показывают, что нет особой необходимости создавать условия, в которых ускорения действуют длительно, поскольку акселерационная информация воспринимается человеком не столько от действия установившихся значений ускорений, сколько от их изменения.

Подобие акселерационной информации, воспроизводимой на тренажере, зависит как от качественных характеристик и размеров динамического стенда, так и от выбора закона управления движением платформы и определяется возможностями и характеристиками привода.

Текущее значение высоты на промежутке времени от t_1 до t_2 при переменном ускорении определяется выражением

$$h(t) = h_0 + v_0 t + \frac{a_0 t^2}{2} + \int_{t_1}^{t_2} \int \int \dot{a} dt^3, \quad (1)$$

где h_0 , v_0 , a_0 — начальные значения высоты, скорости и ускорения в момент изменения перегрузки; t — время.

Из анализа уравнения (1) с учетом психофизиологических особенностей человека следует, что наиболее информативным элементом, несущим полезную акселерационную информацию, является последнее слагаемое правой части, требующее наименьшего диапазона перемещений стенда для его реализации по сравнению с другими компонентами уравнения.

Для реализации составляющей

$$\Delta h(t) = \int_{t_1}^{t_2} \int \int \dot{a} dt^3$$

на динамическом стенде при моделировании процессов для реального объекта решаются обратные задачи, вычисляется сигнал, пропорциональный третьей производной от вертикального перемещения, трехкратное интегрирование которого в реальном масштабе времени позволяет определить сигнал, пропорциональный текущему значению высоты $h(t)$ в заданном интервале времени:

$$\Delta h(t) = \int_{t_1}^{t_2} \int \int \dot{a} dt^3 = C_1 + C_2 + C_3 + \Delta h_2(t), \quad (2)$$

где C_1 , C_2 , C_3 — постоянные интегрирования, причем

$$C_1 = \frac{a_0 t^2}{2}; \quad C_2 = v_0 t; \quad C_3 = h_0.$$

Не вводя постоянные интегрирования в решение уравнения (2), получаем искомый закон изменения координаты $h_{\text{ст}}(t)$ динамического стенда

$$h_{\text{ст}}(t) = \Delta h_2(t) = \int_{t_1}^{t_2} \int \int \dot{a} dt^3,$$

для реализации которого требуются наименьшие перемещения его подвижной платформы.

При предлагаемом способе воспроизведения акселерационной информации [7] на вход следящего привода при воспроизведении, например, ускорения подается сформированный сигнал, пропорциональный перемещению от действия ускорения по времени. При идеальной работе привода его исполнительное звено (шток гидроцилиндра) будет двигаться по квадратичной зависимости от времени в соответствии с изменением управляющего сигнала, воспроизводя тем самым реальные ускорения исполнительного звена. При этом следящий привод должен удовлетворять высокой точности отработки входного сигнала, быстродействию и плавности движения.

Структура гидропривода с компенсацией веса нагрузки

Существенным недостатком известных динамических стендов является влияние веса подвижной платформы и установленного на ней оборудования на работу следящего привода.

В связи с тем, что при движении вниз вес подвижных частей складывается с формируемой гидроприводом силой, а при движении вверх — противодействует ей, создается асимметрия механической характеристики привода, приводящая, в конечном счете, к искажению процесса отслеживания входных электрических сигналов. Особенно этот недостаток проявляется при отработке высокочастотного входного сигнала.

Для устранения этого недостатка в следящий гидропривод трехстепенного динамического стенда с вертикальным расположением гидроцилиндров введен гидродинамический компенсатор статической

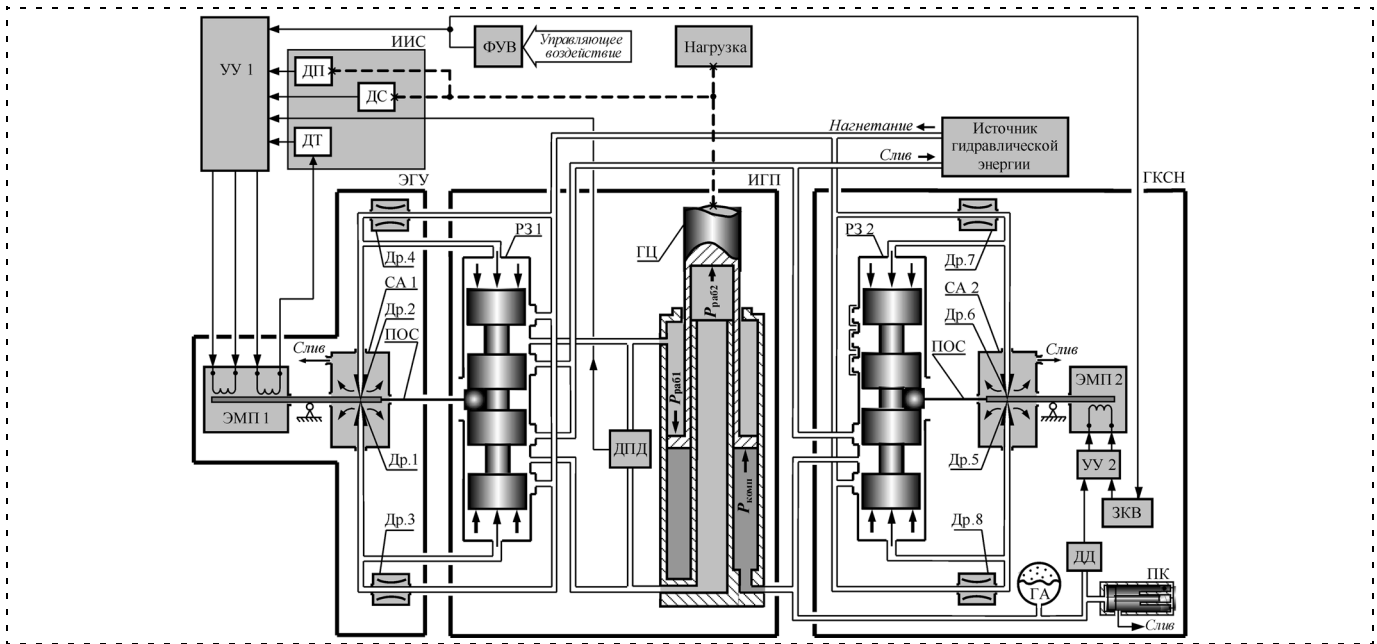


Рис. 2. Структурно-функциональная схема следящего гидропривода с компенсацией статической нагрузки:

ГА — гидроаккумулятор; ГКСН — гидрокомпенсатор статической нагрузки; ГЦ — гидроцилиндр; Др.1, Др.2, Др.5, Др.6 — сопловые дроссели; Др.3, Др.4, Др.7, Др.8 — калиброванные гидравлические дроссели; ДД — датчик давления; ДП — датчик перемещений; ДПД — датчик перепада давления; ДС — датчик скорости; ДТ — датчик тока; ЗКВ — задатчик компенсационных воздействий; ИГП — исполнительный гидравлический привод; ИИС — информационно-измерительная система; ПК — предохранительный клапан; ПОС — позиционная (пружинная) обратная связь; РЗ 1, РЗ 2 — распределительный золотник; СА 1, СА 2 — сопловый аппарат; УУ1, УУ2 — управляющее устройство; ФУВ — формирователь управляющего воздействия; ЭГУ — электрогидравлический усилитель; ЭМП — электромеханический преобразователь

нагрузки (ГДКСН) [8]. Принцип действия гидропривода и системы компенсации поясняется структурной схемой, изображенной на рис. 2. Исполнительным звеном следящего привода является трехполостной гидроцилиндр ГЦ, две полости которого рабочие и одна компенсационная. В компенсационной полости ГЦ поддерживается постоянное давление, уравновешивающее статический вес груза, воздействующий на продольную ось штока ГЦ. Такая конструкция гидроцилиндра обеспечивает расширение функциональных возможностей и симметрию характеристик гидропривода. Гидроцилиндр управляется через распределительный золотник РЗ и электрогидравлический усилитель ЭГУ от управляющего устройства УУ. Исполнительный гидропривод ИГП включает в себя также датчик перепада давлений ДПД.

Движение штока гидроцилиндра создается за счет разности давления в рабочих полостях $P_{\text{раб.1}}$ и $P_{\text{раб.2}}$ при управлении потоком рабочей жидкости с помощью ЭГУ, на вход которого через регулятор давления управляющего устройства УУ1 подается сигнал, пропорциональный разности задающего сигнала формирователя управляющих воздействий ФУВ и сигнала с датчика положения ДП отрицательной обратной связи. Как видно на рис. 2, датчик положения ДП, регулятор давления, электрогидравлический усилитель и гидроцилиндр ГЦ образуют следящую систему с отрицательной обратной связью по положению, которая позволяет воспроизводить градиенты ускорений методом задающих воздействий.

Математическое моделирование и экспериментальные исследования гидропривода

Гидропривод с позиций системного подхода — это система взаимосвязанных элементов, обладающая свойствами, не сводящимися к сумме свойств отдельных частей, и включающая в себя целый ряд функциональных компонентов (рис. 2). Поэтому полная математическая модель всей гидросистемы может быть представлена как взаимосвязанная совокупность звеньев — математических моделей отдельных элементов и, прежде всего, моделей исполнительного гидропривода и гидроусилителя, составляющих неизменяемую часть системы и объединяющих следующие линеаризованные уравнения:

- движения массы нагрузки m , приведенной к оси гидроцилиндра

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = c_k(x_{\text{п}} - x) - c_{\text{ш}}x - b \frac{dx}{dt} - F; \quad (3)$$

- движения поршня гидроцилиндра с массой $m_{\text{п}}$

$$m_{\text{п}} \frac{d^2 x_{\text{п}}}{dt^2} = A_{\text{п}} \Delta P - c_k(x_{\text{п}} - x); \quad (4)$$

- расхода жидкости в гидроприводе

$$K_E \frac{d\Delta P}{dt} = -A_{\text{п}} \frac{dx_{\text{п}}}{dt} + K_{QL}L - K_{QP}\Delta P; \quad (5)$$

- скорости перемещения золотника

$$\frac{dL}{dt} = \frac{K_{Qh}}{A_3} h; \quad (6)$$

- движения якоря электрогидравлического усилителя

$$m_{\text{я}} \frac{d^2 h}{dt^2} = K_{FI} I - K_{Fh} h - b_{\text{я}} \frac{dh}{dt} - c_{\text{ос}}(h + L) - K_R h; \quad (7)$$

- обмотки управления электромеханического преобразователя гидроусилителя

$$L_3 \frac{dI}{dt} = U - RI - K_3 \frac{dh}{dt}. \quad (8)$$

Здесь x — координата перемещения платформы; $x_{\text{п}}$ — координата перемещения поршня гидроцилиндра; $c_{\text{ш}}$ — коэффициент позиционной (шарнирной) нагрузки; $A_{\text{п}}$ — рабочая площадь поршня; $\Delta P = P_1 - P_2$ — перепад давлений в гидроцилиндре; F — сила тяжести подвижной части динамического стенда; L — координата перемещения золотника; K_{QL} — коэффициент передачи золотника по расходу; K_{QP} — коэффициент скольжения по расходу; $K_E = V_0/2E$ — коэффициент, учитывающий сжимаемость жидкости с приведенным значением модуля объемной упругости E ; $V_0 = 1,2A_{\text{п}}x_{\text{max}}$ — объем рабочей камеры гидроцилиндра; $K_{FI} = (\partial F/\partial I)_0$ — коэффициент передачи электромеханического преобразователя по току; $K_{Qh} = (\partial Q_{\text{д}}/\partial h)_0$ — коэффициент передачи гидравлического мостика сопло—заслонка по расходу; $Q_{\text{д}}$ — расход в гидроцилиндре; $K_{Fh} = (\partial F/\partial h)_0$ — коэффициент передачи электро-механического преобразователя по перемещению заслонки в рабочей точке; K_R — коэффициент, учитывающий гидродинамическое воздействие струй жидкости на заслонку; K_3 — коэффициент противоЭДС; R — эквивалентное активное сопротивление обмоток управления; L_3 — индуктивность обмоток управления ЭМП; $c_{\text{к}}$ — коэффициент жесткости силовой проводки; b — коэффициент вязкого трения; $c_{\text{ос}}$ — коэффициент жесткости пружины обратной связи гидроусилителя; b — коэффициент вязкого трения; $b_{\text{я}}$ — коэффициент вязкого демпфирования якоря ЭМП; $m_{\text{я}}$ — приведенное к оси сопла значение массы якоря электромеханического преобразователя и заслонки; A_3 — площадь поперечного сечения золотника; h — координата перемещения заслонки; U — напряжение на обмотке преобразователя; I — ток управления ЭМП.

Полная математическая модель гидропривода с учетом нелинейности отдельных элементов кроме (1)—(8) включает в себя ряд функциональных зависимостей, учитывающих взаимосвязь между отдельными переменными, насыщение по расходу и давлению, трение, запаздывание.

С учетом того, что в следящем гидроприводе с компенсацией статической нагрузки диапазон изменения управляющих воздействий значительно снижается, при исследовании законов управления гидроприводом с достаточной для практики точностью может быть принята линеаризованная математическая модель.

Как объект управления гидропривод представим преобразователем, за выходную (управляемую) координату которого примем перемещение массы нагрузки x . Управляющее воздействие u_1 — напряжение на обмотке преобразователя U , основные возмущающие воздействия z_0, z_1 — сила тяжести подвижной части динамического стенда F и силы, обусловленные движением и изменениями нагрузки.

Модель (3)—(8) с учетом предлагаемой структуры гидропривода представим в пространстве состояний. За переменные состояния примем: v_1, v_6 — токи управления ЭМП гидроусилителей; v_2, v_7 — скорости перемещения заслонок $\frac{dh}{dt}$ гидроусилителей;

v_3, v_8 — координаты перемещения заслонок h ; v_4, v_9 — координаты перемещения золотников L ; v_5, v_{10} — перепад давлений $\Delta P = P_1 - P_2$ и компенсирующее давление в компенсационной полости трехполостного гидроцилиндра; v_{11} — скорость перемещения массы нагрузки $\frac{dx}{dt}$; v_{12} — координата перемещения массы нагрузки x .

При $c_{\text{к}} = \infty$ координаты перемещений массы нагрузки x и поршня $x_{\text{п}}$ гидроцилиндра совпадают ($x = x_{\text{п}}$), а динамическое состояние гидропривода с компенсацией статической нагрузки может быть задано в пространстве состояний вектора $V = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4 \ v_5 \ v_6 \ v_7 \ v_8 \ v_9 \ v_{10} \ v_{11} \ v_{12}]^T$ моделью блочно-матричной формы

$$\begin{bmatrix} v_1^{(1)} \\ v_2^{(1)} \\ v_3^{(1)} \\ v_4^{(1)} \\ v_5^{(1)} \\ v_6^{(1)} \\ v_7^{(1)} \\ v_8^{(1)} \\ v_9^{(1)} \\ v_{10}^{(1)} \\ v_{11}^{(1)} \\ v_{12}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A_1]_{5 \times 5} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & [A_2]_{5 \times 5} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{\text{Y1}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{\text{Y2}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Матрицы $[A_1]$ и $[A_2]$ представляют собой модели электрогидравлических усилителей и расходов жидкостей исполнительного гидропривода и гидроди-

намического компенсатора статической нагрузки, имеют одинаковую структуру и размерность 5×5 :

$$[A_j] = \begin{bmatrix} -\frac{R^j}{L_y} & -\frac{K_z^j}{L_y} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{FI}^j}{m_y^j} & -\frac{b_y^j}{m_y^j} & -\frac{K_{Fh}^j + K_R^j + c_{o.c}^j}{m_y^j} & -\frac{c_{o.c}^j}{m_y^j} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_{Qh}^j}{A_z^j} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_{QL}^j}{K_E^j} & -\frac{K_{QP}^j}{K_E^j} \end{bmatrix}.$$

На основе разработанной математической модели (9) в программной среде Mathcad проведены исследования отработки гидроприводом управляющих воздействий по перемещению, задаваемому выражением

$$Y(t) = \frac{a_0 t^2}{2} \quad (10)$$

при равноускоренном движении с различными ускорениями и выражением

$$Y(t) = \int_{t_1}^{t_2} \int \int \dot{a} dt^3 \quad (11)$$

при постоянной перегрузке в соответствии с предлагаемым способом [7].

На рис. 3, а (см. третью сторону обложки) приведены временные характеристики перемещений, скоростей и ускорений при отработке постоянных ускорений $a_0 = 0,5g$ по закону (10) гидроприводом

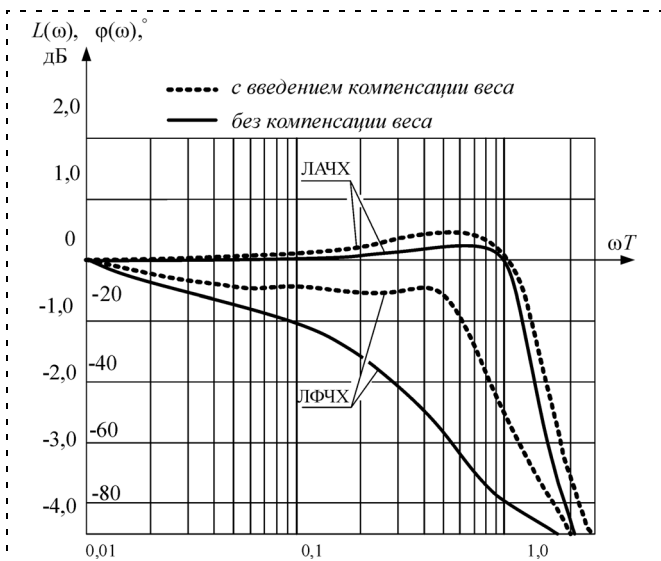


Рис. 5. Экспериментальные логарифмические частотные характеристики гидропривода с компенсацией и без компенсации веса платформы динамического стенда

без компенсации и с компенсацией веса платформы, а на рис. 3, б (см. третью сторону обложки) — временные характеристики абсолютных погрешностей (ϵ) при отработке заданного закона управления перемещением.

Рис. 4 (см. третью сторону обложки) отражает те же характеристики при движении платформы с постоянной скоростью изменения ускорения, численно равной $0,5g$, по закону (11).

Здесь обозначено g , v_a , x_ω , x — ускорение свободного падения; ускорение; скорость и перемещение соответственно. Цифрой 0 помечены переменные системы с компенсацией веса платформы.

Сравнительный анализ приведенных характеристик показывает, что при отработке законов управления (10) и (11) в системах гидропривода автоматически задаются законы управления скоростями и ускорениями платформы.

В системах без компенсации веса платформы на начальных участках переходных характеристик наблюдаются большие переходные процессы и задержки в отработке управляющих воздействий. Точность отработки управляющих воздействий в системах гидропривода с компенсацией веса платформы выше. Об этом же свидетельствует экспериментальная частотная характеристика, показанная на рис. 5.

Заключение

Практическое использование разработанных способов, систем и моделей при создании динамических стендов авиационных тренажеров для подготовки летного состава самолетов Ил-76, Ту-144, Ту-154, Ту-160, Су-25, Як-18, Миг-25, Ми-24, Ми-8, противолодочного вертолета В-14 показало их высокую эффективность, выразившуюся в более точном воспроизведении акселерационных воздействий, повышении управляемости и надежности тренажеров.

Список литературы

1. Хилдстон Х. Ф. Требования к движению кабины для имитации полета // Отчет NASA № 363. 1963.
2. Стенли Ф., Конрад Ш., Конрад Б. Сигналы управления движением для пилотажного имитатора полета // Отчет ассоциации аналитической механики исследовательского центра им. Эймса, 1968 / Перевод КНИГА, 1974 г.
3. Ворона А. А., Гандер Д. В., Пономаренко В. А. Теория и практика психологического обеспечения летного труда. М.: Воениздат, 2003. 278 с.
4. Сотников Д. А., Кваша М. М., Тимаков В. М. Создание технических средств и технологий динамической имитации полета // Тренажерные технологии и обучение: Новые подходы и задачи. Сб. докл. второй науч.-техн. конф., г. Жуковский: НАГИ, 2003. С. 44—50.
5. Гератевольт Э. Психология человека в полете. М.: МИИЛ, 1956. 355 с.
6. Ворона А. А., Гандер Д. В., Пономаренко В. А. Психолого-педагогические основы профессиональной подготовки летного состава. М.: МАЧАК, 2000. 340 с.
7. А. с. № 233272 / Мануйлович В. П., Ключев Б. В., Тимаков В. М., Швецов П. Е.
8. А. с. № 77429 / Мануйлович В. П., Тимаков В. М., Швецов П. Е.

УДК 629.7.054:621.396:536.58

В. С. Иванов, канд. техн. наук, главный метролог,
В. Л. Моисеев, инженер,
 ГНЦ ФГУП "ГосНИИ авиационных систем", Москва

Вопросы совершенствования методов аттестации испытательного оборудования для воспроизведения механических воздействующих факторов

Рассмотрены вопросы оптимизации номенклатуры нормируемых точностных характеристик испытательного оборудования, контролируемых при периодической аттестации, а также методов и режимов их определения. Приведены особенности метрологического обеспечения средств измерений, используемых при аттестации испытательного оборудования.

Ключевые слова: испытательное оборудование, аттестация, точностные характеристики.

Одним из основных условий обеспечения конкурентоспособности выпускаемой предприятиями продукции является его возможность оперативно реагировать на потребности рынка, что может быть обеспечено, в том числе, за счет сокращения цикла проектирования и отработки новых изделий и повышения точности результатов исследовательских, контрольных и других видов испытаний. При этом возможно значительное сокращение сроков отработки, экономия материальных и финансовых ресурсов за счет перехода от натурных испытаний продукции к лабораторно-стендовым испытаниям.

Типовая блок-схема лабораторно-стендовых испытаний на воздействие внешних воздействующих факторов приведена на рис. 1.

Инструментальная составляющая погрешности результатов испытаний (погрешность, обусловленная несовершенством оборудования) в общем случае будет равна [2]

$$\Delta_{об} = \Delta_{и} * \Delta_{R_1} F'_{1n}(R_1) * \dots * \Delta_{R_i} F'_{in}(R_i) * \dots * \Delta_{R_m} F'_{mn}(R_m), (1)$$

где $\Delta_{и}$ — погрешность измерений параметра оборудования, определяемого при испытании; Δ_{R_i} — погрешность воспроизведения или измерения i -й характеристики условий испытаний оборудования; $F'_{in}(R_i)$ — производная функции, описывающей зависимость параметра оборудования, определяемого при испытании, от параметра R_i в точке $R_i = R_{in}$; R_{in} — номинальное значение параметра R_i ; * — символ объединения (суммирования) случайных величин; m — число учитываемых условий испытаний.

Из формулы (1) видно, что инструментальная составляющая погрешности испытаний зависит как от погрешности средств измерений (СИ), так и от

точностных характеристик испытательного оборудования (ИО) (рис. 2), под которыми будем понимать часть технических характеристик ИО, определяющих функциональные возможности оборудования.

Для подтверждения соответствия точностных характеристик ИО установленным требованиям и возможности обеспечения ими воспроизведения требуемых режимов испытаний предусмотрена процедура их первичной, периодической и повторной аттестации.

В настоящее время разработан целый ряд методик аттестации различных видов ИО, однако им присущи, как правило, следующие недостатки.

1. При определении номенклатуры контролируемых при аттестации точностных характеристик не учитывается наличие корреляционной зависимости между ними, что не позволяет оптимизировать их число, а также приводит к ошибкам при определении инструментальной погрешности по формуле (2), не учитывающей наличие корреляционной связи между параметрами [2]

$$\sigma_{исп}^2 = \sigma_{и}^2 + \sum_{i=1}^m \sigma_{iM}^* (\Delta_x / \Delta_{R_i})^2_{R_i = R_{in}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{и}$ — предел допускаемого среднего квадратического отклонения погрешности измерения параметра, определяемого при испытании; σ_{iM} — наибольшее возможное среднее квадратическое отклонение погрешности воспроизведения i -го условия испытаний.

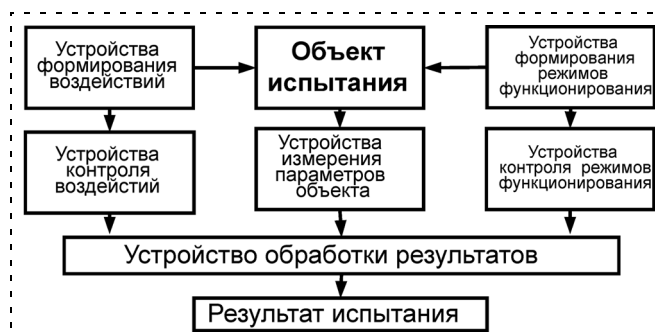


Рис. 1. Блок-схема испытаний на воздействие внешних факторов

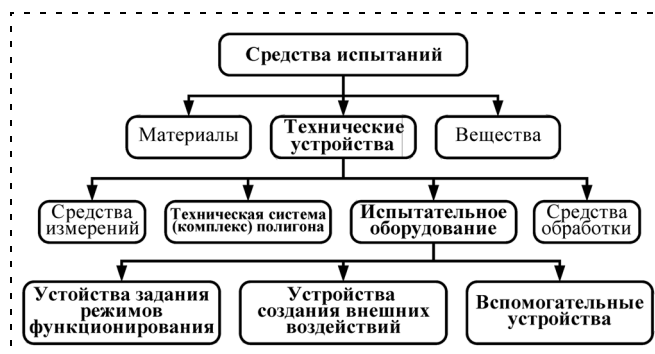


Рис. 2. Классификация средств испытаний

2. Методы и режимы определения точностных характеристик не оптимальны с точки зрения временных и материальных затрат на их определение.

3. Нормируемые режимы испытаний часто не обеспечивают воспроизводимость воздействий на объект испытаний.

4. При установлении требований к межповерочным интервалам СИ, как встроенных в ИО, так и используемых при его аттестации [3], не учитывается требование ГОСТ Р ИСО 901—2001 [4] о том, что в случае обнаружения несоответствия оборудования установленным требованиям необходимо оценить и зарегистрировать правомочность предыдущих результатов измерения и предпринять соответствующее действие в отношении такого оборудования и любой измеренной продукции. Учитывая, что по результатам испытаний делается заключение о годности проверяемой продукции и часто невозможно проведение повторных испытаний в случае обнаружения несоответствия ИО установленным требованиям, необходимо обеспечить метрологическую исправность СИ в течение всего межповерочного интервала, что требует использования других подходов к установлению межповерочных интервалов.

5. Не всегда обеспечивается требуемый запас по точности при определении точностных характеристик.

Из рассмотрения влияния различных факторов на частоту отказов электронного оборудования (см. таблицу) [1] видно, что основная доля отказов обусловлена воздействием механических и климатических факторов.

Поэтому в дальнейшем остановимся на рассмотрении вопросов оптимизации методов аттестации ИО для создания механических воздействий.

Известно, что при наличии корреляционной зависимости между параметрами возможно прогнозирование значений одного из них по значениям другого. При этом возможно при периодической аттестации осуществлять контроль только одного из них. Достоверность такого прогнозирования зависит от коэффициента корреляции между этими параметрами. Можно показать [5], что для прогнозирования значения параметра X по значению параметра Y минимальное значение коэффициента корреляции между

ними r_H , позволяющее прогнозировать значение параметра с погрешностью $\Delta X_{\max}$, определяется как

$$r_H = \sqrt{1 - \frac{\Delta X_{\max}^2 (n-2)}{t_g^2 \sigma_X^2 \left\{ 1 + n^2 (Y_{\max} - \bar{Y})^2 / \left[n \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2 \right] \right\}}}, \quad (3)$$

где σ_X — среднее квадратическое отклонение параметра X ; t_g — значение коэффициента Стьюдента при доверительной вероятности g и числе степеней свободы $(n-2)$; n — число измерений.

Коэффициент корреляции r_i при $X = X_{\min}$ может быть определен из формулы, аналогичной (3), при замене $Y_{\max}$ на $Y_{\min}$.

Естественно, что прогнозировать параметр X можно и по результатам измерения нескольких коррелированных с X параметров $Y_1, \dots, Y_k$ [5].

Значение коэффициента корреляции между отдельными параметрами ИО можно определять теоретически, путем анализа конструкции и принципов действия этого оборудования или экспериментальным путем.

Так, рассмотрение динамической модели подвижной части электродинамического вибровозбудителя показало [5], что значения коэффициента поперечных колебаний и коэффициента неравномерности распределения ускорения по столу вибратора зависят от одних и тех же факторов, и коэффициент корреляции между ними приближается к единице. Это позволяет при периодической аттестации контролировать только один из них, например, коэффициент поперечных колебаний. Соответственно, при расчете погрешности воспроизведения ускорения погрешности, обусловленные неравномерностью распределения ускорения по столу вибровозбудителя и наличием поперечных колебаний, необходимо суммировать арифметически. Также определена частота ω_0 , на которой эти коэффициенты имеют максимальное значение, что позволяет контролировать значение коэффициента поперечных колебаний не во всем диапазоне, а только на одной частоте ω_0 .

Указанные зависимости подтверждены экспериментальными данными, полученными при аттестации нескольких десятков электродинамических стенов.

При экспериментальном исследовании распределения температуры по объему камер тепла и холода [6] установлена корреляционная зависимость между значениями температуры в различных точках полезного объема камер, что позволяет при периодической аттестации осуществлять контроль в двух точках полезного объема камеры вместо принятых в настоящее время девяти.

Рассмотрение передаточной функции электрогидравлического вибровозбудителя [7] и построение диаграммы предельных значений параметров стенов (зависимости максимального воспроизводимого ус-

Группа испытаний	Относительная доля отказов
По оценке стойкости к воздействию температуры	0,15
По оценке стойкости к воздействию влаги	0,07
По оценке стойкости к воздействию вибрации, ударов и т. п.	0,25
По оценке стойкости к атмосферным осадкам (дождь, иней, роса)	0,07
По оценке воздействия электромагнитных полей	0,05
По оценке воздействия пыли и песка	0,03
По оценке функционирования в нормальных условиях	0,38

корения N , выраженного в единицах силы земного ускорения g от частоты ω показали (рис. 3), что наиболее информативными частотами для контроля точностных характеристик при аттестации являются частоты ω_1 , где вибратор одновременно должен обеспечить воспроизведение максимального перемещения и максимальной скорости вибрации, и ω_2, ω_3 , где одновременно вибратор должен обеспечить воспроизведение максимальной скорости и ускорения. Таким образом, можно сократить число контролируемых режимов испытаний при аттестации с 10...12, предусмотренных действующими методиками, до трех.

Анализ методов нормирования ударных воздействий во временной области (регламентируются форма импульса, его длительность и амплитуда) [8] показал, что при принятых допусках на форму ударного импульса энергия удара, пропорциональная квадрату изменения скорости при ударе, будет изменяться более чем в три раза. Поэтому при установлении требований к режимам испытаний необходимо дополнительно нормировать пределы, в которых должно находиться значение изменения скорости при ударе. Например, если отклонение скорости находится в пределах $\pm (15...20) \%$ значения, соответствующего номинальной форме импульса, то изменение энергии не будет превышать 25...40 %.

Для определения наиболее информативных режимов при аттестации ударных установок торможения можно исходить из того, что основными характеристиками, ограничивающими параметры воспроизводимых импульсов, являются максимальная начальная скорость соударения $V_{пр}$ и максимальный путь торможения $S_{пр}$, которые связаны с основными параметрами импульса следующими соотношениями:

$$V_{пр} \geq A a_{\max} t_{\max}; S_{пр} \geq B a_{\max} t_{\max}^2, \quad (4)$$

где A и B — коэффициенты, зависящие от формы переднего фронта ударного импульса (для полусинусоидального импульса $A = 0,64$; $B = 0,33$, а для пилообразного $A = 0,50$; $B = 0,167$); $a_{\max}$ — максимальное воспроизводимое пиковое ускорение; $t_{\max}$ — максимальная воспроизводимая длительность переднего фронта импульса.

Поэтому для проверки возможности воспроизведения установкой этих параметров при периодической аттестации достаточно воспроизвести режим с параметрами

$$a_{S,V} = \frac{B}{A^2} \frac{V_{пр}^2}{S_{пр}} \text{ и } t_{S,V} = \frac{A}{B} \frac{S_{пр}}{V_{пр}}.$$

При этом установка обеспечивает максимальную начальную скорость соударения, а устройство торможения — необходимый (максимальный) путь торможения (рис. 4).

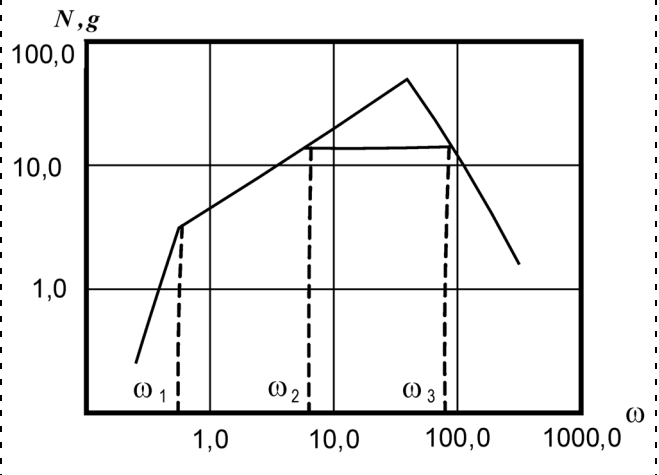


Рис. 3. Пределы параметров электрогидравлического вибратора

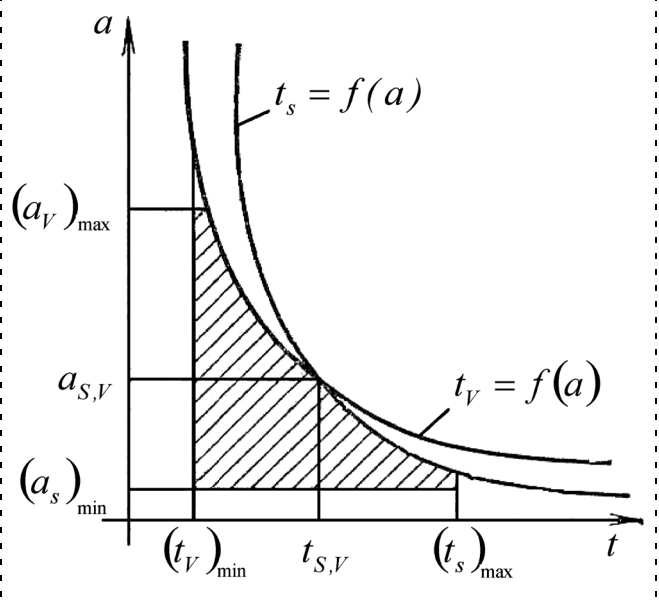


Рис. 4. Пределы эксплуатационные характеристики ударного стенда с торможением

Если заданный режим $t_{S,V}$ и $a_{S,V}$ воспроизводится с необходимой точностью, то все остальные режимы также будут воспроизводиться установкой, так как для этого требуются значения V и S , меньшие или, в крайнем случае, равные одному из значений $V_{пр}$ или $S_{пр}$.

Рассматривая применяемые в настоящее время методики установления и корректировки межповторных интервалов [3], основанные на использовании статистических методов и требующие создания представительных выборок, следует отметить, что прямое их использование для средств измерений, входящих в состав ИО или используемых при его аттестации, не применимо, так как трудно соз-

дать представительную выборку из-за ограниченного числа ИО определенного типа, используемого на предприятии. Кроме того, как указывалось выше, необходимо обеспечить метрологическую исправность СИ в течение всего межповерочного интервала с высокой степенью вероятности.

Поэтому предлагается [9] для СИ, входящих в состав ИО и/или используемых при его аттестации, использовать метод, основанный на определении запаса по точности конкретного экземпляра СИ, определяемого при очередной поверке, и максимальной скорости изменения погрешности данного СИ за предыдущий период, т. е. ввести метод установления межповерочных интервалов "по состоянию". При этом межповерочный интервал может определяться по следующей формуле:

$$T_{\text{МПИ}} = 0,9(\gamma_{\text{кл}} - \gamma_{\text{пов}})/v_{\text{max}},$$

где $\gamma_{\text{кл}}$ — класс точности СИ; $\gamma_{\text{пов}}$ — погрешность СИ при поверке; v_{max} — максимальная скорость изменения погрешности СИ за предыдущий период.

Определенные затруднения возникают при выборе средств измерений для определения методом прямого измерения абсолютных значений таких точностных характеристик ИО, как неравномерность распределения воздействующего фактора по объему камеры или поверхности стола вибратора, коэффициент поперечных составляющих при воспроизведении вибрации и других параметров, из-за отсутствия СИ необходимой точности. Для решения этой задачи возможно использование метода относительных измерений, при котором для уменьшения погрешности результата определения относительных величин вместо требования к минимизации погрешностей измерений по каждому каналу требуется обеспечить совпадение:

- статических и динамических функций преобразования (минимальной разности аддитивной, мультипликативной погрешности и нелинейностей каналов);
- воздействий внешних влияющих величин на каналы преобразования;
- неинформативных параметров входных и выходных сигналов.

Указанные требования часто легко выполнимы при аттестации ИО, если относительное значение параметра лежит в пределах, близких к единице (0,7...1,3), используются однотипные измерительные каналы и проводится взаимное сличение показаний каналов (калибровка) при входных сигналах, близких по значению ($\pm 10\%$) к измеряемым сигналам. В этом случае путем калибровки устраняется разность аддитивной и мультипликативной составляющих каналов в данной точке, и разность показаний каналов в этой точке будет определяться решающей способностью измерительных каналов.

Выводы

- ♦ При определении номенклатуры точностных характеристик, контролируемых при периодической аттестации ИО, необходимо проведение исследования на наличие корреляционных связей между ними, что позволит:
- оптимизировать номенклатуру контролируемых характеристик за счет использования корреляционных связей между ними;
- повысить достоверность оценки погрешности воспроизведения условий испытаний за счет арифметического суммирования коррелированных погрешностей.
- ♦ При анализе методов испытаний продукции необходимо нормировать требования к условиям испытаний и, как следствие, к точностным характеристикам ИО с учетом обеспечения необходимой воспроизводимости результатов испытаний.
- ♦ При выборе режимов испытаний целесообразно выбирать наиболее информативные (с точки зрения подтверждения стабильности работы ИО) режимы.
- ♦ При установлении межповерочных интервалов СИ, встроенных в ИО и/или используемых при его аттестации, целесообразно в целях обеспечения метрологической пригодности СИ в течение всего межповерочного интервала использовать метод установления межповерочного интервала "по состоянию".
- ♦ Для определения точностных характеристик ИО, выражаемых в относительных единицах, для снижения требований к точности СИ целесообразно использовать метод относительных измерений.

Список литературы

1. Животкевич И. Н., Смирнов А. П. Надежность технических изделий. М.: Олита, 2003. 472 с.
2. МИ 1317—2004 ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.
3. РМГ 74—2004 ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений.
4. ГОСТ Р ИСО 9001—2001 Системы менеджмента качества. Требования.
5. Моисеев В. Л. Некоторые вопросы аттестации испытательных виброустановок // Вестник качества. 2007. № 3 (75). С. 38—41.
6. Моисеев В. Л., Макридина Л. В. Вопросы аттестации камер тепла, холода и влаги // Вестник качества. 2007. № 1 (73). С. 42—47.
7. Тарасов Л. С., Обросов В. А. Возможности и проблемы разработки электрогидравлических вибраторов // Тр. конференции по надежности. МДНТП, 1972.
8. Моисеев В. Л., Иванов В. С. Вопросы аттестации ударных испытательных установок // Сб. матер. восьмой сессии Междунар. научн. школы "Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов", ВРВ-07. Санкт-Петербург, 22—27 октября 2007 г.
9. Моисеев В. Л., Рогинский С. А. Подтверждение метрологической пригодности измерительного оборудования // Вестник Военного Регистра. 2004. № 11 (47). С. 19—27.

УДК 622.276.5.05-52

Гузаиров М. Б., д-р техн. наук, проф.,
Ильясов Б. Г., д-р техн. наук, проф.,
Тагирова К. Ф., канд. техн. наук, доц.,
Ганеев А. Р., канд. техн. наук, доц.,
Мезенцев Е. Ф., аспирант,
Додулад А. В., магистр,
УГАТУ, г. Уфа

Оптимальное управление режимами работы группы нефтяных скважин на основе упрощенной модели участка пласта

Обсуждается задача оптимизации режима работы системы пласт — нефтедобывающие скважины с учетом их гидродинамического взаимодействия через пласт в условиях отсутствия полной информации о характеристиках и параметрах взаимодействия скважин. Предложена математическая модель системы и способы ее использования для регулирования режимов работы скважин в целях увеличения суммарного дебита. Приведены результаты экспериментов, подтверждающих эффективность описанного подхода к моделированию участка пласта.

Ключевые слова: нефтяной пласт, добыча нефти, оптимизация, моделирование, скважина, месторождение, математическая модель, система управления, взаимовлияние, критерий, адекватность, ограничения, градиентный метод.

Особенности технологического процесса добычи нефти, такие как отсутствие данных о ряде параметров пласта, неоднозначность и нелинейность зависимостей между параметрами, неоднородность пласта из-за наличия участков с различными фильтрационными свойствами, недостаток информации о динамических характеристиках объектов, существенно усложняют математическую постановку задачи оптимизации, а также решение такой задачи в общем виде для всех режимов. Поэтому для определения области оптимальных режимов используется имитационное моделирование. Кроме того, точная математическая модель, описывающая процессы, происходящие внутри пласта, требует больших машинных затрат для расчетов.

Если рассматривать задачу организации автоматического управления добычей нефти на ограниченном участке пласта, то большая часть полученных в результате моделирования данных окажется избыточной. Действительно, для организации эффективной работы группы близкорасположенных скважин гораздо важнее иметь информацию о взаимовлиянии скважин, так как это влияние приводит

к тому, что при вводе в эксплуатацию новых скважин суммарная добыча на месторождении растет медленнее, чем увеличивается число скважин [1].

В статье [2] рассмотрена упрощенная математическая модель для одномерного однофазного участка пласта, которая описывает взаимовлияние скважин. Рассмотрим конкретный пример моделирования в пакете MatLab. Участок пласта (рис. 1) разбит на 12 ячеек с шагом Δx , в ячейках 3 и 11 расположены нагнетательные скважины, а в ячейках 5 и 9 — добывающие.

При $q_3 = 10 \text{ м}^3/\text{сут}$, $q_5 = -6 \text{ м}^3/\text{сут}$, $q_9 = -9 \text{ м}^3/\text{сут}$ и $q_{11} = 5 \text{ м}^3/\text{сут}$ в результате расчетов получим распределение давлений в зависимости от времени (рис. 2) и конечные, в момент времени $t = 1000$, давления в ячейках (рис. 3).

На основе упрощенной математической модели разработана система управления группой скважин (рис. 4).

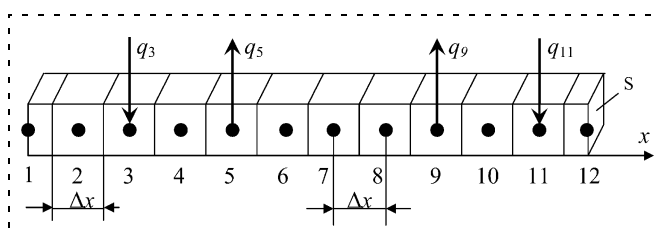


Рис. 1. Однородный одномерный участок пласта

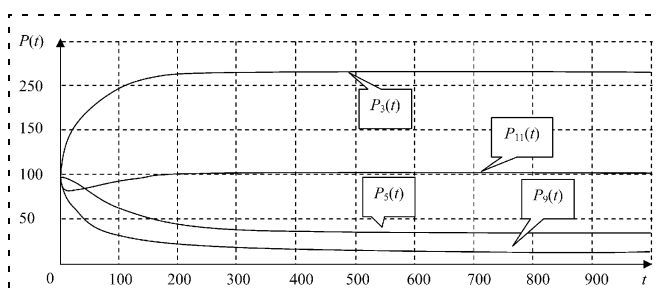


Рис. 2. Распределение забойных давлений скважин

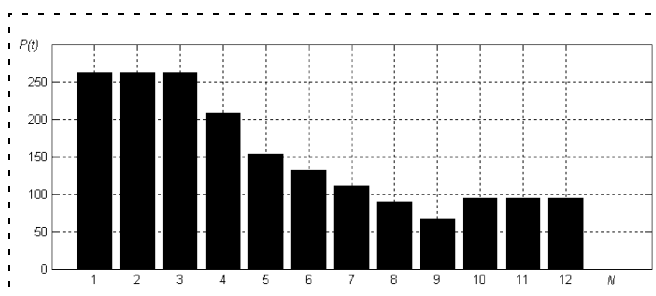


Рис. 3. Конечное распределение давлений в ячейках при $t = 1000$

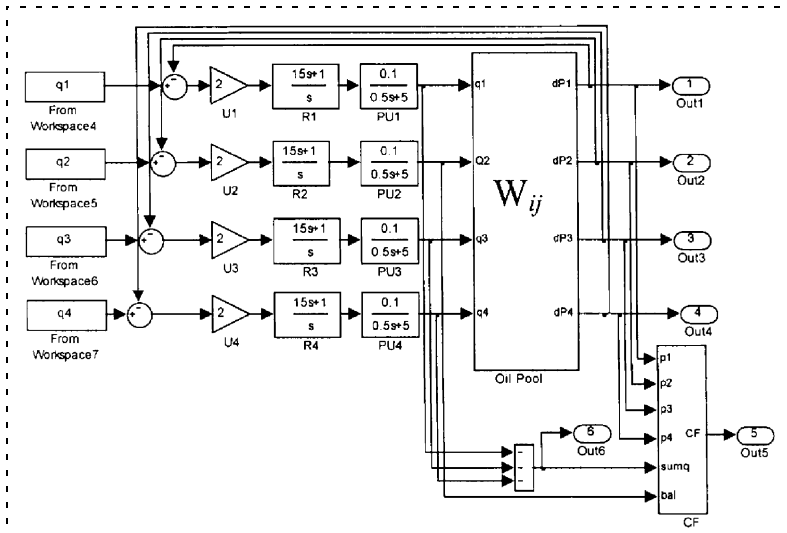


Рис. 4. Структурная схема системы управления группой скважин

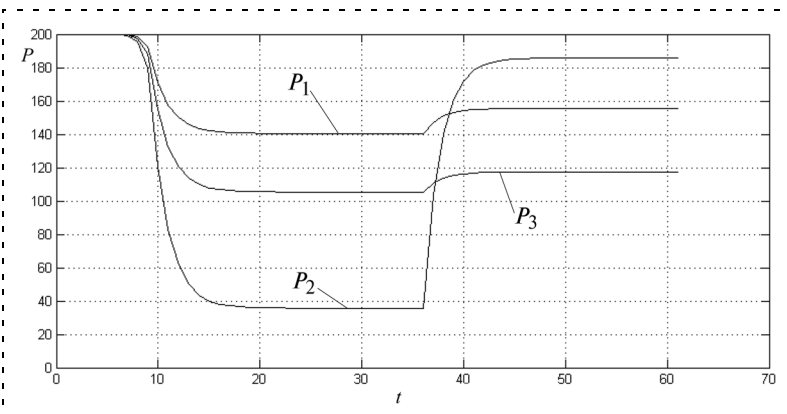


Рис. 5. График изменения забойных давлений скважин при останове одной скважины (скважина 2)

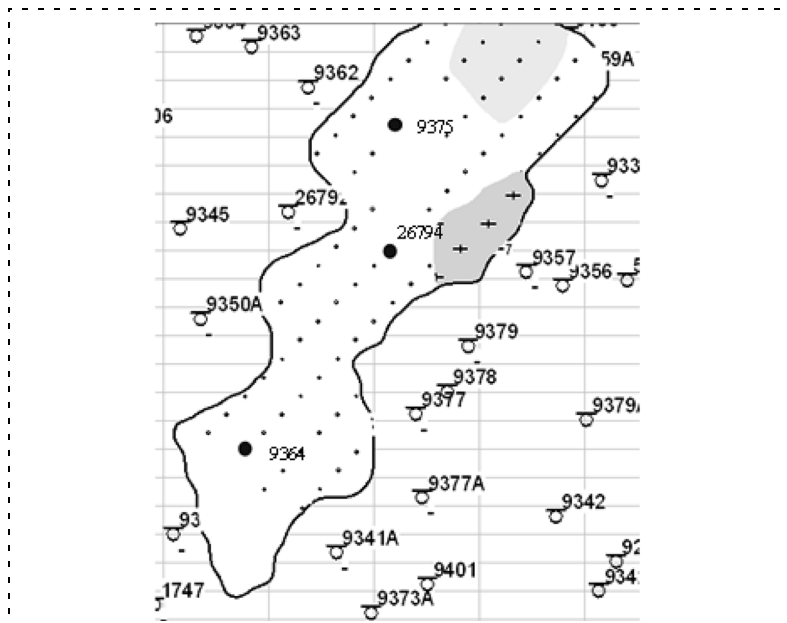


Рис. 6. Карта участка месторождения

Входными величинами являются забойные давления скважин. Блоки U_i , R_i , P_{U_i} ($i = \overline{1, 4}$) описывают насосное оборудование, Oil Pool — взаимовлияние скважин. Связь между i -й и j -й скважинами представляет собой инерционное звено с чистым запаздыванием с передаточной функцией вида

$$W_{ij} = e^{-\tau s} \frac{D_{ij}}{T_{ij}s + 1}. \quad (1)$$

Параметры D и T определяются исходя из данных замеров дебитов жидкости и забойных давлений скважин. Запаздывание $e^{-\tau s}$ отражает процесс изменения давления, связанный с перетоком жидкости в пласте, и вводится эмпирически. Блок CF служит для расчета целевой функции как критерия оптимальности управления режимами работы скважин.

На рис. 5 представлен пример моделирования изменения давлений для трех скважин одномерного участка пласта.

В момент времени $t = 37$ работа одной скважины останавливается, этой скважине соответствует давление P_2 . Изменение давлений P_1 , P_2 отражает их гидродинамическую связь.

Проверка адекватности математической модели взаимовлияния скважин

При описании связи между скважинами в виде передаточной функции возникает вопрос о количественных значениях параметров матричной передаточной функции (1), описывающей объект управления, а именно о значениях параметров T , D и τ . Для оценки этих значений использованы реальные данные замеров по группе из трех добывающих скважин (рис. 6). Система поддержания пластового давления на этом участке отсутствует, т. е. используется естественный режим добычи нефти.

Для проверки адекватности модели воспользуемся данными замеров по рассматриваемому участку месторождения за один месяц (рис. 7), представленными в виде графиков (трендов).

Данные по дебитам и давлениям на первом интервале T_1 (рис. 7) используем для идентификации модели, на втором интервале T_2 — для сравнения результатов моделирования с фактическими данными. Тогда постоянная времени T в (1)

примерно равна $T = 4$ сут, $\tau = 1$ сут и $\tau/T = 0,25$. Из установившихся значений давлений и дебита в интервале T_1 определяется коэффициент усиления как отношение изменения давления к изменению дебита:

$$D_{9375} = \frac{\Delta P_{T_1}^{9375}}{\Delta Q_{T_1}} = 3 -$$

для учета влияния скважины № 9375

$$\text{самой на себя и } D_{9375-26794} = \frac{\Delta P_{T_1}^{26794}}{\Delta Q_{T_1}} =$$

$= 0,75$ — для учета влияния скважины № 9375 на скважину № 26794. Примем, что взаимовлияние скважин является симметричным, т. е. $D_{9375-26794} = D_{26794-9375} = 0,75$. Отметим, что влияние скважины № 26794 на скважину № 9375 учитываться не будет, так как дебит данной скважины за рассмотренный период времени $t = 31$ сут практически не изменяется.

Как видно из графика на рис. 7, в момент времени $t = 21$ сут производительность скважины № 9375 увеличилась на $\Delta Q_{T_2} = 7$ м³/сут. Это привело к изменению забойного давления скважин № 9375 и № 26794 соответственно на $\Delta P_{T_2}^{26794} = 6$ атм. и $\Delta P_{T_2}^{9375} = 9$ атм.

В результате моделирования получены кривые изменения давлений (рис. 8).

Из графиков (рис. 8) видно, что изменения давлений по модели равны

$$\Delta P_{Model}^{9375} = 8 \text{ атм.}, \Delta P_{Model}^{26794} = 4,8 \text{ атм.}, \text{ по реальным}$$

замерам — 8,4 атм. и 5,3 атм. соответственно. С помощью метода наименьших квадратов получены значения максимальных ошибок моделирования $\varepsilon_{26794}^2 = 0,2691$ и $\varepsilon_{9375}^2 = 0,1855$ соответственно;

$$\varepsilon_{9375} = \Delta P_{T_2}^{9375} - \Delta P_{Model}^{9375} = 8,4 - 8 = 0,4 \text{ атм.}$$

$$\text{и } \varepsilon_{26794} = \Delta P_{T_2}^{26794} - \Delta P_{Model}^{26794} = 5,3 - 4,8 = 0,5 \text{ атм.}$$

Таким образом, модель с достаточной точностью повторяет фактические изменения забойных давлений при изменении производительности одной из скважин в группе и поэтому может использоваться для управления режимами работы группы скважин в целях оптимизации таких параметров, как объем добываемой жидкости, обводненность продукции, энергозатраты.

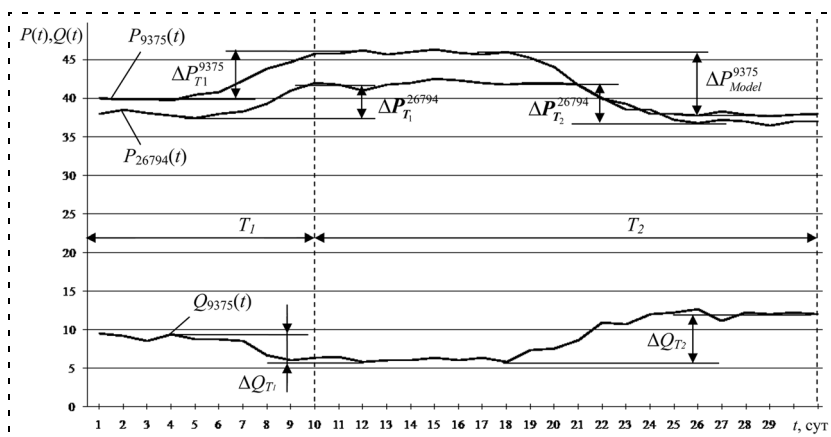


Рис. 7. График изменения давлений за один месяц по данным замеров для скважин № 9375 и № 26794 ($P_{26794}(t)$, $P_{9375}(t)$ — забойные давления скважин, $Q_{9375}(t)$, $Q_{26794}(t)$ — дебиты скважин, T_1 , T_2 — интервалы времени для идентификации и проверки адекватности модели соответственно)

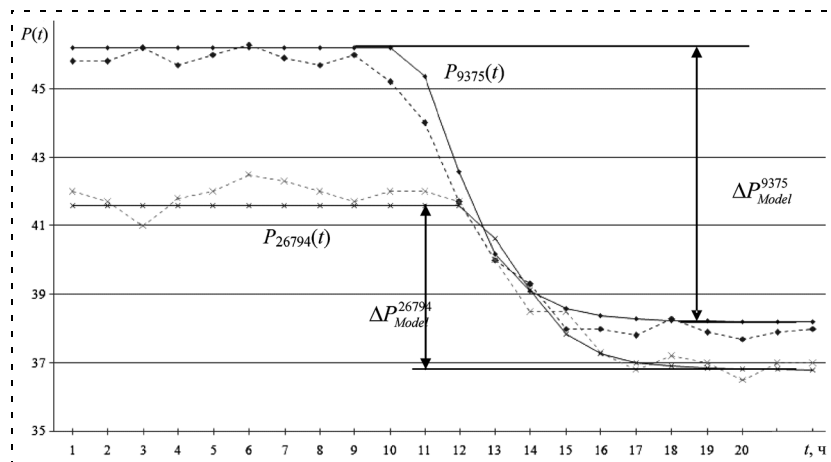


Рис. 8. Распределение давлений после моделирования изменения производительности скважины № 9375

Оптимизация режимов работы группы нефтяных скважин

Цель оптимизации нефтедобычи заключается в достижении на каждом этапе максимальной добычи нефти по группе скважин, пласту и в целом по месторождению. Суммарное количество нефти по группе скважин Q_H , характеризующее эффективность их работы, вычисляется как сумма

$$Q_H = (1 - c_i) \Sigma q_i, \quad i = 1, \dots, n,$$

где c_i — коэффициент обводненности продукции i -й скважины; q_i — дебит жидкости i -й скважины.

Математическая постановка задачи оптимизации может быть представлена в следующем виде:

$$Q_H = (1 - c_i) \Sigma q_i \rightarrow \max, \quad i = 1, \dots, n.$$

При этом необходимо учитывать несколько типов ограничений:

- на параметры работы скважины: ограничения по дебиту (конусообразование), ограничения по за-

бойному давлению (опасность выделения парафина, больших объемов газа в призабойной зоне, снижения динамического уровня ниже приема насоса), ограничения, связанные с износом оборудования;

- на группу скважин (пропускная способность внутрипромыслового оборудования, ограничение на суммарное потребление электроэнергии).

Для реализации этой задачи используется целевая функция, которая учитывает ограничения как на отдельные скважины, так и на группы скважин, а весовые коэффициенты позволяют задать важность того или иного ограничения в процессе добычи. Процесс оптимизации осуществляется посредством изменения забойных давлений на скважинах за счет изменения производительности насосного оборудования и контроля текущего дебита скважин [3].

С учетом ограничений целевая функция примет следующий вид:

$$Z = F(\bar{p}) K_L K_G Q_H,$$

где $F(\bar{p})$ — зависимость суммарного дебита нефти от p -вектора забойных давлений; K_L — коэффициент, отражающий соответствие локальным ограничениям; K_G — коэффициент, отражающий соответ-

ствие групповым ограничениям; Q_H — суммарный дебит нефти, причем

$$K_L = \prod_{i=1}^n K_{Li},$$

где n — число локальных ограничений, накладываемых на работу скважин; K_{Li} — коэффициент, отражающий соответствие i -му локальному ограничению

$$K_G = \prod_{j=1}^m K_{Gj},$$

где m — число групповых ограничений, накладываемых на работу скважин; K_{Gj} — коэффициент, отражающий соответствие j -му групповому ограничению.

Например, к локальным ограничениям относится нахождение дебита i -й скважины q_i в диапазоне допустимых дебитов ($q_{\min} < q_i < q_{\max}$). Для определения коэффициента K_L по дебиту используется пороговая функция, как показано на рис. 9.

На графике $c = (q_{\max} - q_{\min})/2$ — центр интервала допустимых значений дебита, $s = q_{\max} - q_{\min}$ — ширина интервала.

Таким образом, при допустимых значениях дебитов коэффициент K_L будет равен 1. Оптимальный режим работы группы скважин достигается при достижении максимума целевой функции Z , т. е. при $Z = F(\bar{p}) K_L K_G Q_H \rightarrow \max$.

Максимизация целевой функции проводится с помощью градиентного метода с дроблением шага [4].

Результат оптимизации показан на рис. 10.

Суммарный дебит нефти трех скважин увеличился с 20 до 24,7 м³/сут за один месяц.

Заключение

Представленная имитационная модель отражает как временную, так и пространственную динамику объекта управления — группы добывающих и нагнетательных скважин. Использование приведенного подхода к моделированию участка нефтяного пласта позволяет значительно сократить машинные затраты на расчет взаимного влияния группы скважин и оптимального режима работы, позволяя осуществлять управление в реальном масштабе времени.

Список литературы

1. Басниев К. С., Дмитриев Н. М., Каневская Р. Д., Максимов В. М. Подземная гидромеханика. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. 488 с.
2. Бадамшин Р. А., Ганеев А. Р., Тагирова К. Ф. Уточненная математическая модель для оперативного управления технологическим процессом добычи нефти // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 9. С. 41–44.
3. Тагирова К. Ф., Дунаев И. В. Повышение достоверности оценки дебита нефтяной скважины по динамограмме // Технологии ТЭК. Индустрия. 2007. № 2. С. 41–44.
4. Банди Б. Методы оптимизации. М.: Радио и связь, 1998.

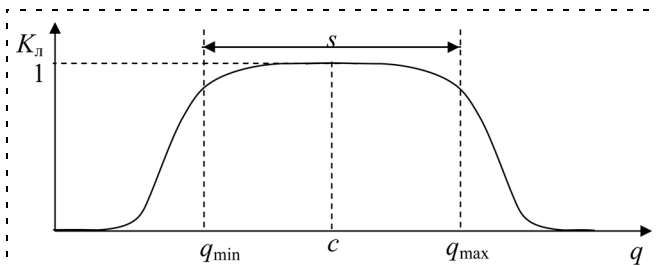


Рис. 9. Вид пороговой функции

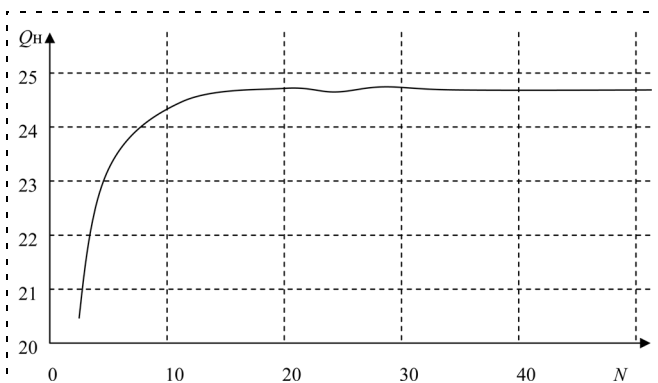


Рис. 10. Изменение дебита группы скважин в результате оптимизации режимов скважин с учетом их взаимовлияния (Q_H — суммарный дебит нефти группы скважин, N — число шагов оптимизации)

УДК 664.1.054.001.57

Д. В. Арапов, канд. техн. наук, ст. препод.,**В. А. Курицын**, канд. техн. наук,

техн. директор по АСУ

Воронежская государственная

технологическая академия

ЗАО "НПП Центравтоматика"

Оптимизация температурного режима вертикального кристаллизатора

Представлена математическая модель процесса массовой кристаллизации сахара при охлаждении утфеля последнего продукта. Поставлены и решены задачи нахождения и реализации оптимального температурного режима охлаждения утфеля в вертикальном кристаллизаторе. Разработан пакет программ, позволяющий рассчитать оптимальный режим охлаждения утфеля в вертикальных кристаллизаторах в свеклосахарном производстве.

Ключевые слова: свеклосахарное производство, вертикальный кристаллизатор, утфель, математическая модель, оптимизация температурного режима.

Введение

В настоящее время в отечественной сахарной промышленности сложилась устойчивая тенденция переоснащения кристаллизационных станций вертикальными кристаллизаторами большой единичной мощности, позволяющими снизить потери сахара с мелассой на 20...30 %. Однако из-за неотработанности технологического режима при внедрении вертикальных кристаллизаторов заводы сталкиваются с определенными трудностями [1]. В связи с этим задача разработки математического описания процесса массовой кристаллизации сахара в вертикальном кристаллизаторе и оптимизации температурного режима охлаждения утфеля последнего продукта является актуальной.

Вертикальный кристаллизатор как объект управления

Вертикальный кристаллизатор непрерывного действия типа Ш1-ПКВ представляет собой трехсекционный теплообменный аппарат колонного типа, на верх которого подается насосом и самотеком стекает вниз утфель, сваренный в вакуум-аппаратах. Внутри кристаллизатора установлены горизонтальные трубные решетки (рис. 1) со скребковыми мешалками, смонтированными на трубовале. Навстречу утфелю в трубное пространство каждой зоны перекрестным током с индексом противоточности по Белоконову 0,7 [2] поступает охлаждающая (подогревающая) вода. Уровень утфеля в кристаллизаторе поддерживается постоянным, его движение

близко к режиму идеального вытеснения, время пребывания в аппарате — не менее 36 ч.

В кристаллизаторе осуществляется истощение межкристального раствора за счет выкристаллизовывания сахарозы путем охлаждения утфеля с переменной скоростью, задаваемой регламентом. После охлаждения раствора до 32...35 °С следует его подогрев на 5...7 °С. Температурный напор между утфелем и водой не должен превышать 12...15 °С, что исключает образование новых центров кристаллизации и предотвращает потери сахара в виде "муки", не улавливаемой центрифугами.

Коэффициент пересыщения раствора, исключая образование "муки", находится в пределах 1,25...1,3 [3...5]. На выходе кристаллизатора межкристальный раствор должен быть насыщенным с коэффициентом пересыщения, равным 1,0, его параметры должны соответствовать характеристикам нормальной (оптимальной) мелассы [6]. Для исключения механической поломки аппаратуры вязкость межкристального раствора и утфеля в целом, а также концентрация кристаллов сахарозы не должны превышать предельных значений.

Регулирование процесса политермической кристаллизации сахарозы в аппарате Ш1-ПКВ осуществляется путем изменения температуры и расхода воды, подаваемой в зоны кристаллизатора.

Состав утфеля на входе в кристаллизатор зависит от качества перерабатываемой свеклы и режима работы предшествующих участков производства и подвержен значительным колебаниям. Поэтому производственный режим охлаждения утфеля в вертикальных кристаллизаторах далек от оптимального.

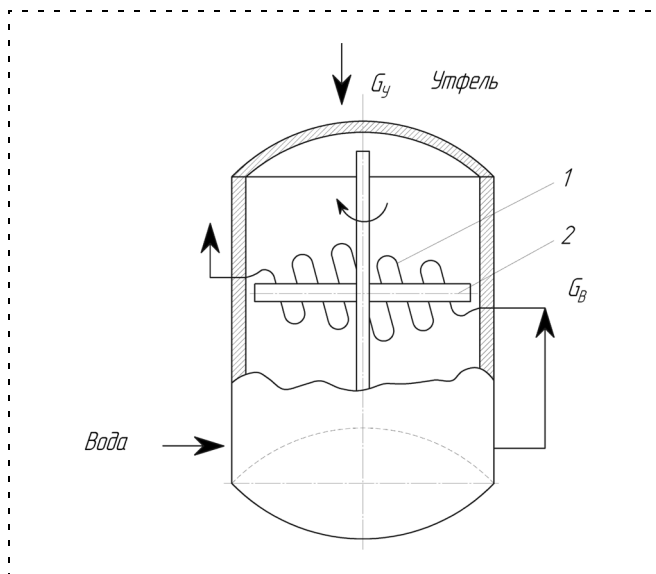


Рис. 1. Схематическое изображение элемента вертикального кристаллизатора:

1 — трубная решетка; 2 — скребковая мешалка

Математическая модель

Математическая модель процесса политермической кристаллизации сахара в вертикальном кристаллизаторе имеет следующий вид [7...12]:

$$\frac{dM(\tau)}{d\tau} = k_1 M(\tau)^{\frac{2}{3}} K(\tau); \quad (1)$$

$$k_1 = k_0 10^{-\frac{20}{3}} (K_p^0 M_y)^{\frac{1}{3}} / l^0; \quad (2)$$

$$\frac{dK_p(\tau)}{d\tau} = k_2 M(\tau)^{\frac{2}{3}} K(\tau); \quad (3)$$

$$k_2 = k_0 10^{-\frac{14}{3}} (K_p^0 M_y)^{\frac{1}{3}} / (l^0 M_y); \quad (4)$$

$$\Delta T_i(\tau) = \Delta T_{ki} \exp \left[0,7 \int_0^{\tau_i^*} \pm W(\tau) \frac{k_T(\tau) G_y}{\rho_y(\tau) \beta} d\tau \right] \times \\ \times \exp \left[-0,7 \int_0^{\tau} \pm W(\tau) \frac{k_T(\tau) G_y}{\rho_y(\tau) \beta} d\tau \right], \quad (5)$$

$$\text{где } W(\tau) = \frac{1}{G_y C_y(\tau)} - \frac{1}{G_{bi} C_b};$$

$$K(\tau) = f_1 [T(\tau), CB(\tau), \varphi(\tau)]; \quad (6)$$

$$CB(\tau) = \frac{CB_y - K_p(\tau)}{100 - K_p(\tau)} 100 \%; \quad (7)$$

$$\varphi(\tau) = \frac{CB_y \varphi_y - K_p(\tau)}{CB_y - K_p(\tau)} 100 \%; \quad (8)$$

$$C_y(\tau) = 10 \{ C_{cx}(\tau) K_p(\tau) + C(\tau) [100 - K_p(\tau)] \}; \quad (9)$$

$$C_{cx}(\tau) = 4190 [0,0453 + 0,00085 T_y(\tau)]; \quad (10)$$

$$C(\tau) = 10^3 \{ 4,19 - 0,01 CB(\tau) [4,57 - 0,00754 T_y(\tau) + 0,00461 (100 - \varphi(\tau))] \}; \quad (11)$$

$$k_T(\tau) = k_T^0 \exp \{ -\tau / [0,0076 \exp [0,1 CB(0)]] \}; \quad (12)$$

$$k_T^0 = 52000 \exp [-0,0783 CB(0)]; \quad (13)$$

$$\rho_y(\tau) = 1011,8 + 3,4 CB_y + 0,02 CB_y^2 - (0,4 + 0,0025 CB_y) [T_y(\tau) - 293,5]; \quad (14)$$

$$H_0(\tau) = \frac{CX_H(\tau)}{100 - CX_H(\tau)};$$

$$\rho(\tau) = f_2 [CB(\tau), T(\tau)];$$

$$\varphi(\tau) = f_3 (K_p(\tau), \rho(\tau));$$

$$\mu_y(\tau) = f_4 (\mu(\tau), \varphi(\tau), CB(\tau));$$

$$\alpha_H(\tau) = \frac{\varphi(\tau) CB(\tau) 0,01}{[100 - CB(\tau)] H_0(\tau) \alpha_H(\tau)};$$

$$\lg \mu(\tau) = \left[\sum_{i=1}^3 a_i v_i(a_{nc}) \right] \left(a_4 + \frac{a_5 T}{(a_6 + T)^2} \right) + a_7.$$

Тепловой баланс i охлаждающей и j подогревающей зон кристаллизатора записывается следующим образом:

$$Q_{Y_i} = \int_0^{\tau_i^*} G_y C_y(\tau) [T_{yi}^H - T_y(\tau)] d\tau = \\ = \int_0^{\tau_i^*} G_{bi} C_b [T_b(\tau) - T_{bi}^H] d\tau = Q_{bi}; \quad (15)$$

$$Q_{Y_j} = \int_0^{\tau_j^*} G_y C_y(\tau) [T_y(\tau) - T_{yj}^H] d\tau = \\ = \int_0^{\tau_j^*} G_{bj} C_b [T_{bj}^H - T_b(\tau)] d\tau = Q_{bj}. \quad (16)$$

Начальные условия:

при $\tau = 0$ $K_p(0) = K_p^0$; $M(0) = M^0$; $T(0) = T_H$; $K(0) = K(T_H, CB^0, \varphi^0)$; $CB(0) = CB^0$; $\varphi(0) = \varphi^0$; $l(0) = l^0$,

где M_y , M — масса соответственно сваренного утфеля и выкристаллизованной сахарозы; l^0 — начальный размер кристалла сахарозы; K — удельная скорость кристаллизации; K_p — концентрация кристаллов; μ , μ_y — вязкость межкристального раствора и утфеля; ρ , ρ_y — плотность межкристального раствора и утфеля; β — отношение объема кристаллизатора к поверхности теплообмена; CB , CB_y — концентрация сухих веществ в растворе и утфеле; φ — порозность утфеля, доли ед.; α_H , α_n — коэффициент насыщения и пересыщения межкристального раствора; φ , φ_y — чистота межкристального раствора и утфеля; T_y , T — температура утфеля и раствора, $T_y = T$; T_{bj} — температура воды начальная в j -й секции; k_0 , k_1 , ..., k_5 ; a_1 , ..., a_7 ; a_{nc} — коэффициенты модели; CX_H , H_0 — соответственно растворимость и коэффициент растворимости сахарозы в чистых растворах; k_T — коэффициент теплопередачи; $C_y(\tau)$, $C_{cx}(\tau)$, $C(\tau)$ — теплоемкость утфеля, кристаллического сахара и межкристального раствора; $\Delta T_i(\tau)$ — температурный напор между утфелем и водой; ΔT_{ki} — температурный напор в конце охлаждения (нагрева); G_y , G_b — расходы утфеля и воды; τ_i^* — время пребывания утфеля в i -й зоне охлаждения кристаллизатора; c_b — удельная теплоемкость воды.

Уравнения (1)...(4) получены из известной [3, 12] зависимости $\frac{dm}{d\tau F} = k' K$ для удельной скорости K кристаллизации путем выражения площади F по-

верхности кристаллов через их массу M , где k' — размерный коэффициент.

При выводе формулы (5) для температурного напора при стационарном режиме работы кристаллизатора были использованы уравнения теплопередачи и тепловых балансов для поверхности dF_T и всей поверхности теплообмена с учетом того, что в кристаллизаторах непрерывного действия коэффициент теплопередачи k_T и водяной эквивалент утфеля изменяются по поверхности охлаждения. Переход от координаты "площадь поверхности" к координате "время" выполнили согласно выражению $dF_T = \frac{G_y d\tau}{\rho_y(\tau)\beta}$.

Для охлаждающей секции величина $W(\tau)$ положительна, для подогревающей — отрицательна.

Экспериментальной базой для разработки зависимости (6) удельной скорости кристаллизации от температуры, содержания сухих веществ и чистоты раствора послужили 392 опыта, выполненные известными учеными разных стран по различным методикам [10]. В качестве движущей силы процесса кристаллизации принята разность активных молярных концентраций сахарозы в пересыщенном и насыщенном растворах

$$K = a'_1 \frac{T(C_{\Pi}^a - C_H^a)}{\mu^{a'_2}} + a'_3 \exp(a'_4/RT)(RT)^{a'_5} (C_{\Pi}^a - C_H^a);$$

$$C_{\Pi}^a = 2,9214 \frac{CX_{\Pi}}{B_{\Pi}} 10^{\varphi_{\Pi}\left(\frac{CX_H}{B_H}, \frac{HCX}{B}\right)};$$

$$C_H^a = 2,9214 \frac{CX_H}{B_H} \alpha_H 10^{\varphi_H\left(\frac{CX_H}{B_H}, \alpha_H, \frac{HCX}{B}\right)},$$

где $\frac{CX}{B}$, $\frac{HCX}{B}$ — соответственно отношение сахара и несахара к воде; $10^{\varphi_{\Pi}(\dots)}$, $10^{\varphi_H(\dots)}$ — функциональные коэффициенты активности сахарозы соответственно в пересыщенном и насыщенном растворах; R — газовая постоянная; $a'_1 \dots a'_5$ — регрессионные коэффициенты.

Математическая модель функционирует с учетом следующих ограничений и допущений.

1. *Физико-химические*: движущая сила процесса кристаллизации сахара охлаждением утфеля — разность активных молярных концентраций сахарозы в пересыщенном и насыщенном растворах — является положительной величиной.

2. *Гидродинамические*: утфель перемещается в кристаллизаторе в режиме идеального вытеснения с постоянной скоростью.

3. *Теплотехнические*: потери теплоты в окружающую среду равны теплоте кристаллизации.

4. *Технологические*: число кристаллов в процессе охлаждения остается постоянным.

5. *Конструктивные*: объемы и поверхности теплообмена кристаллизаторов одинаковы, что позволяет заменить векторную величину времени пребывания утфеля в каждой ступени $\bar{\tau}(\tau)$ на скалярную τ .

Постановка и решение задачи оптимизации

Задача оптимизации политермической кристаллизации заключается в максимальном истощении межкристалльного раствора за время его пребывания в кристаллизаторе до характеристик нормальной мелассы путем регулирования температурного режима утфеля при условии выполнения всех ограничений, накладываемых технологическим регламентом и прочностными характеристиками аппаратуры.

Для ее решения необходимо привлечение математического аппарата нелинейного программирования и многократное совместное решение уравнений модели, а также равенств и неравенств, описывающих ограничения. В вычислительном аспекте это трудно реализуемая задача, поэтому предлагается ее поэтапное решение. На первом этапе рассчитывается оптимальный температурный профиль изменения температуры утфеля, а на втором определяется оптимальный расход воды и ее начальная температура для каждой зоны кристаллизатора, посредством которых реализуется найденный профиль.

Этап 1. Расчет оптимального температурного профиля охлаждения и подогрева утфеля

Исходной информацией для задачи оптимизации охлаждения сваренного в вакуум-аппарате утфеля служат его характеристики — масса вари, ее кристаллосодержание и чистота, содержание сухих веществ, средний линейный размер кристалла, температура на входе кристаллизатора и заданное время охлаждения.

В качестве критерия оптимизации процесса массовой кристаллизации сахара охлаждением утфеля принята масса сахарозы, выкристаллизованной за заданное время охлаждения τ^* :

$$M = \int_0^{\tau^*} dM(\tau) = k_1 \int_0^{\tau^*} M(\tau)^{\frac{2}{3}} K(\tau) d\tau. \quad (17)$$

На критерий накладываются технологические ограничения, обусловленные вязкостью межкристалльного раствора и утфеля, значением коэффициента пересыщения межкристалльного раствора, кристаллосодержанием, скоростью изменения температуры при охлаждении утфеля, а также ограни-

чения, обусловленные оптимальными параметрами нормальной мелассы [8]:

$$\begin{aligned} \mu(\tau) &\leq \mu_{\max}; \mu_y(\tau) \leq \mu_y^{\max}; \alpha_{\Pi}^{\min} \leq \alpha_{\Pi}(\tau) \leq \alpha_{\Pi}^{\max}; \\ \left| \frac{dT(\tau)}{d\tau} \right| &\leq \Delta T^{\max}; K_p(\tau) \leq K_p^{\max}; \\ \mathcal{Q}(\tau) &\leq \mathcal{Q}^*; CB(\tau) \geq CB^*, \alpha_{\Pi}^K = 1. \end{aligned} \quad (18)$$

Искомый температурный профиль охлаждения и подогрева утфеля будем искать в классе функций третьего порядка

$$T_y(\tau) = T_y^H + b_1\tau + b_2\tau^2 + b_3\tau^3. \quad (19)$$

Задача оптимизации $T_y(\tau)$ формулируется следующим образом: за заданное время охлаждения τ^* определить оптимальные параметры b_1^*, b_2^*, b_3^* профиля изменения температуры утфеля во времени, которые обеспечивают максимум функционала (17) в условиях ограничений (18):

$$M = k_1 \int_0^{\tau^*} M(\tau) K(\tau) d\tau \rightarrow \max_{b_1, b_2, b_3}. \quad (20)$$

Используя метод штрафных функций [13], перепишем ограничения (18) в виде:

$$\begin{aligned} \mathcal{I} = 10^{20} \{ &(|\mu(\tau) - \mu_{\max}| + \mu(\tau) - \mu_{\max})^2 + \\ &+ (|\mu_y(\tau) - \mu_y^{\max}| + \mu_y(\tau) - \mu_y^{\max})^2 + \\ &+ (|\alpha_{\Pi}(\tau) - \alpha_{\Pi}^{\max}| + \alpha_{\Pi}(\tau) - \alpha_{\Pi}^{\max})^2 + \\ &+ (|1,0 - \alpha_{\Pi}(\tau)| + 1,0 - \alpha_{\Pi}(\tau))^2 + \\ &+ (|\alpha_{\Pi}^K - 1,0|)^2 + \left(\left| \frac{dT(\tau)}{d\tau} \right| - \Delta T^{\max} \right)^2 + \\ &+ (|K_p(\tau) - K_p^{\max}| + K_p(\tau) - K_p^{\max})^2 + \\ &+ (|CB^* - CB(\tau)| + CB^* - CB(\tau))^2 + \\ &+ (|\mathcal{Q}^* - \mathcal{Q}(\tau)| + \mathcal{Q}^* - \mathcal{Q}(\tau))^2 \}, \end{aligned} \quad (21)$$

где 10^{20} — "штрафной коэффициент"; CB^* , $\mathcal{Q}^*$ — оптимальные значения содержания СВ и чистоты нормальной мелассы.

Так как при оптимизации обычно ищется минимум функции, то, объединяя (20) со знаком "-" и (21), получим значение целевой функции, которую необходимо минимизировать:

$$FF = -M + \mathcal{I} \rightarrow \min_{b_1, b_2, b_3}. \quad (22)$$

В результате решения (22) методом конфигураций Хука-Дживса [13] определяется оптимальный температурный профиль изменения температуры утфеля при прохождении его в зонах вертикального кристаллизатора $T_y^*(\tau)$.

Блок-схема алгоритма приведена на рис. 2. Программа рассчитывает начальные значения чистоты и содержания сухих веществ в межкристальном растворе утфеля, определяет его начальное пересыщение. Выходными параметрами являются оптимальные значения коэффициентов температурного профиля b_1^*, b_2^*, b_3^* , конечная температура охлаждения утфеля, чистота и концентрация сухих веществ межкри-

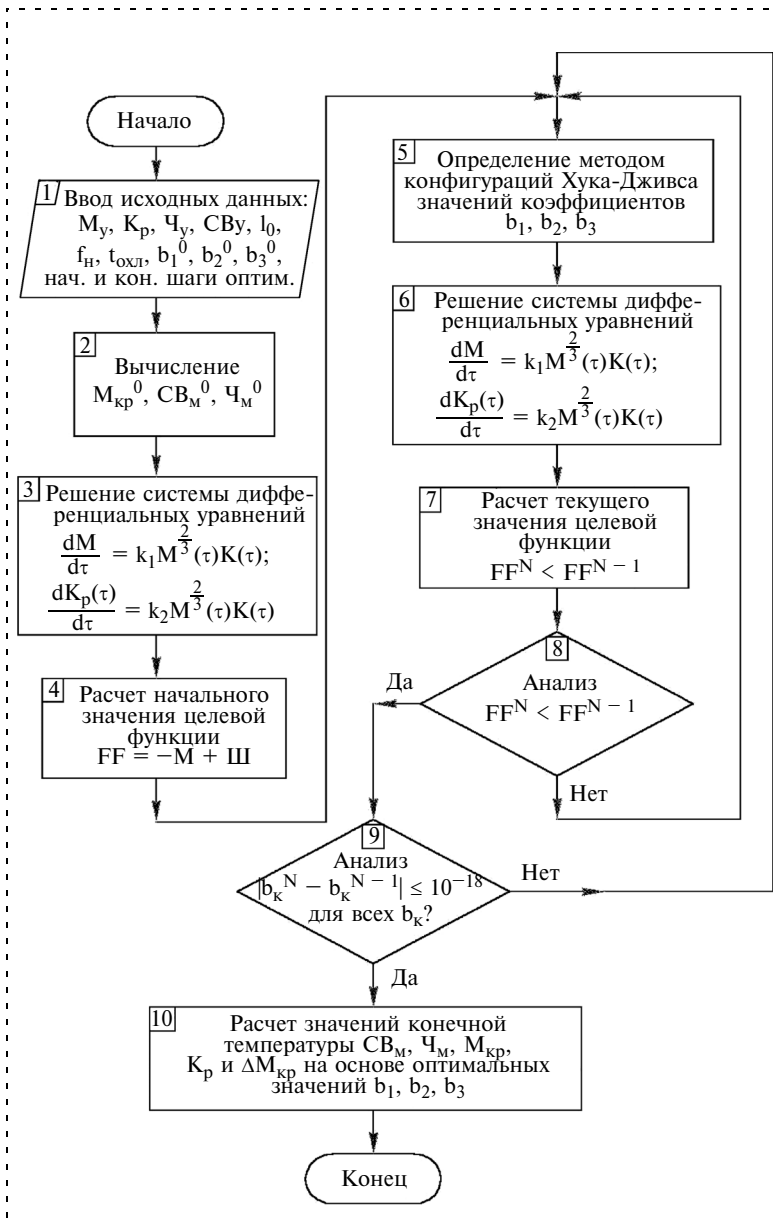


Рис. 2. Блок-схема алгоритма поиска оптимального температурного профиля охлаждения утфеля последнего продукта

стального раствора в конце охлаждения, общая масса выкристаллизованной сахарозы и ее прирост за время политермической кристаллизации, конечное пересыщение межкристалльного раствора, его вязкость и кристалло-содержание. На экран монитора выводится динамика изменения основных параметров процесса (рис. 3).

Этап 2. Реализация оптимального профиля изменения температуры утфеля

Зная время пребывания утфеля в каждой зоне кристаллизатора τ_i^* , можно вычислить оптимальные значения расхода воды в каждую секцию и ее начальную температуру. Для этой цели используются формулы (5), (7), (8), (9)...(16) математической модели. Входная и выходная температуры утфеля в каждой зоне рассчитываются подстановкой в выражение (19) величин $\tau_{i,j}^*$, b_1^* , b_2^* , b_3^* .

Критерием для расчета оптимальных значений расхода воды и ее температуры примем квадрат невязки теплового баланса секции

$$\Delta Q^2 = (Q_y - Q_b)^2, \quad (23)$$

где Q_y , Q_b — соответственно тепло, отданное утфелем (водой) и полученное водой (утфелем) в $i(j)$ -й секции. На критерий (23) накладывается ограничение, обусловленное предельным значением температурного напора

$$\Delta T(\tau) \leq \Delta T^*. \quad (24)$$

Температурный профиль нагрева (охлаждения) воды в зоне кристаллизатора запишем в классе функций третьего порядка:

$$T_b(\tau) = T_b^H + d_1\tau + d_2\tau^2 + d_3\tau^3, \quad (25)$$

где d_1 , d_2 , d_3 — коэффициенты функции.

Задача заключается в поиске таких значений расхода воды, ее начальной температуры и коэффициентов профиля (25) d_1^* , d_2^* , d_3^* , которые обеспечивают минимум квадрата невязки теплового баланса секции, определяемого формулами (15) или (16) при условии выполнения ограничения (24) на

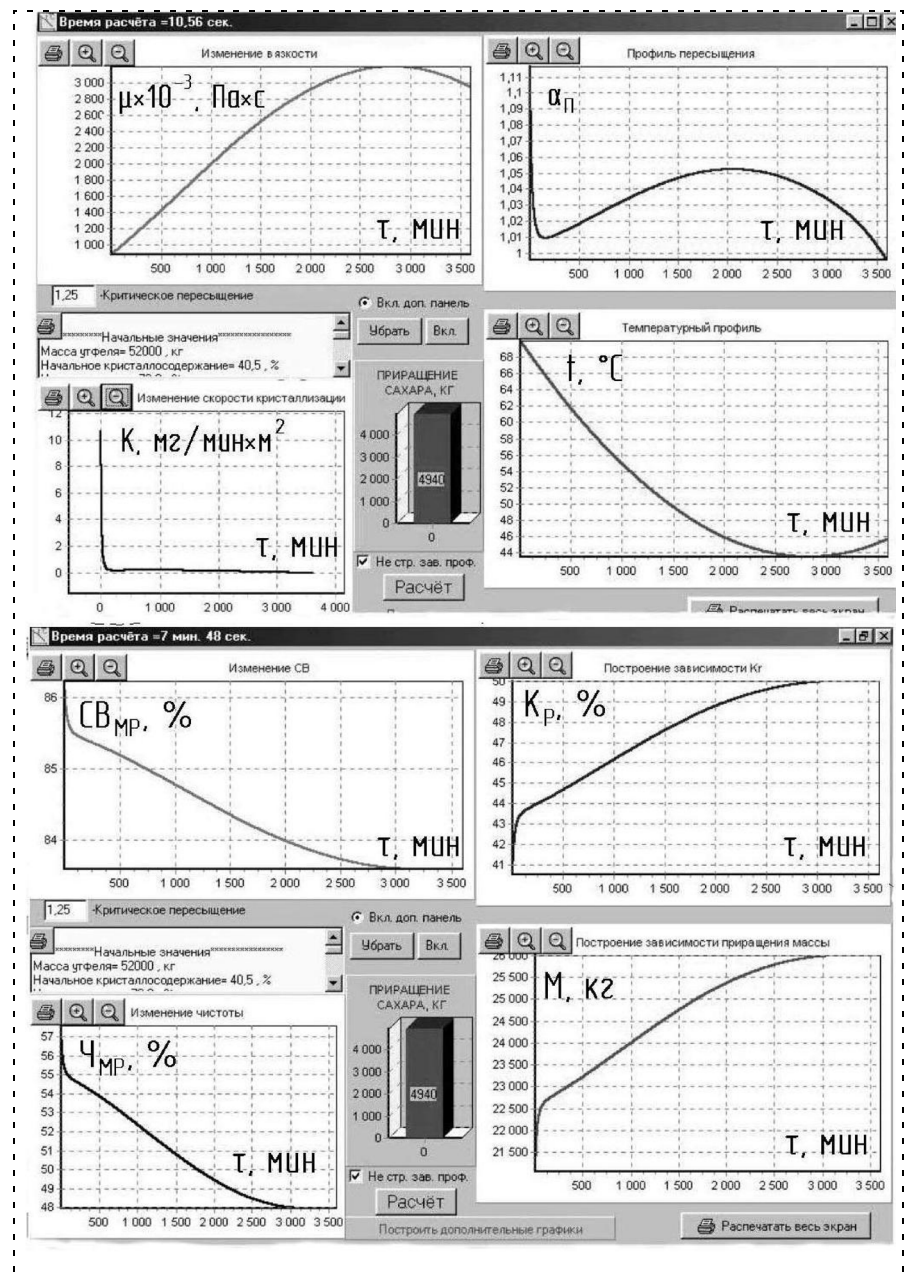


Рис. 3. Пример решения задачи оптимизации (22)

температурный напор (5). Для i -й охлаждающей секции

$$\left[\int_0^{\tau_i^*} G_y C_y(\tau) [T_{yi}^H - T_y^*(\tau)] d\tau - \int_0^{\tau_i^*} G_{bi} C_b (d_1\tau + d_2\tau^2 + d_3\tau^3) d\tau \right]^2 + [|\Delta T_i^* - \Delta T_i(\tau)| + \Delta T_i(\tau) - \Delta T_i^*]^2 \rightarrow \min_{G_{bi}, T_{bi}^H, d_1, d_2, d_3}, \quad (26)$$

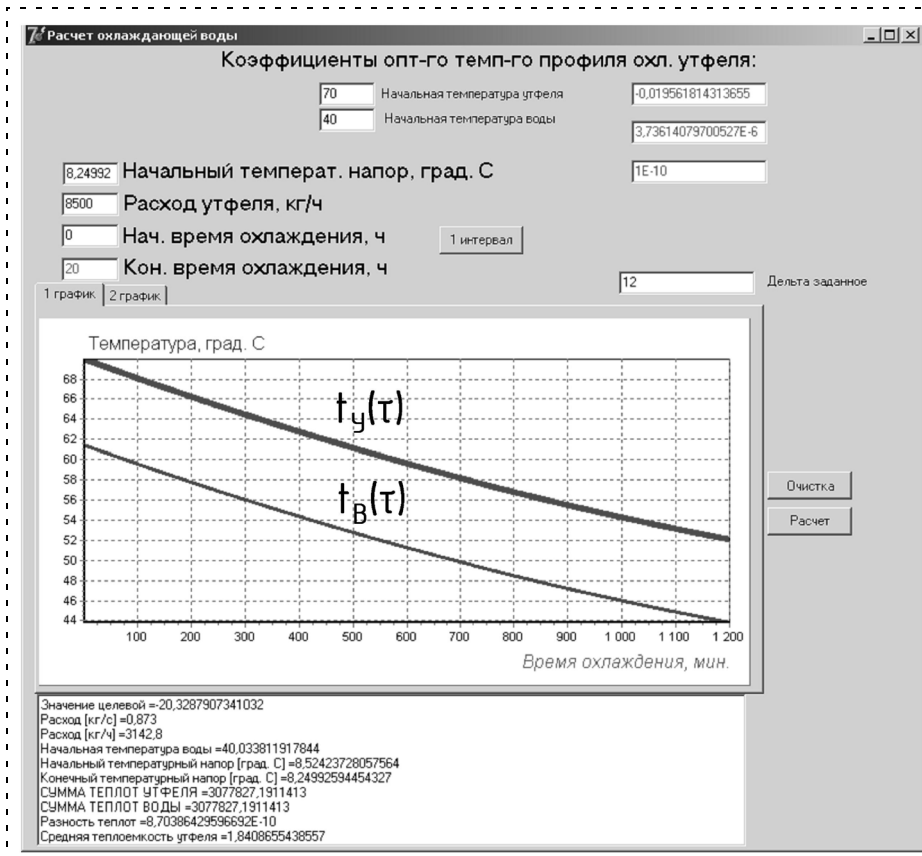


Рис. 4. Пример решения задачи оптимизации (26) для 1-й зоны кристаллизатора

где $\Delta T_i(\tau)$ определяется по формуле (5), в которой

$$\Delta T_{ki} = T_{yi}^K - T_{vi}^H.$$

Решение (26) также выполнено методом конфигураций Хука-Дживса. Пример решения задачи для первой зоны кристаллизатора приведен на рис. 4. Реальный квазиоптимальный температурный профиль охлаждения утфеля определяется согласно выражению

$$T_{yi}^p(\tau) = T_{vi}^{H*} + d_{1i}^* \tau + d_{2i}^* \tau^2 + d_{3i}^* \tau^3 + \Delta T_i(\tau).$$

Критерием окончания оптимизации процесса политермической кристаллизации служит функционал

$$I(\tau) = \int_0^{\tau_i^*} \left[1 - \frac{T_{yi}^p(\tau)}{T_{yi}^*} \right] d\tau,$$

который не должен превышать заданной погрешности ξ . Этапы 1 и 2 повторяются до тех пор, пока

не выполнится условие $I(\tau) \leq \xi$ или число повторений не достигнет заданной величины.

Заключение

Рассмотрена математическая модель процесса политермической кристаллизации сахарозы в вертикальном кристаллизаторе. Поставлена и решена задача оптимизации данного процесса. Разработанный пакет программ может быть использован при проектировании и эксплуатации вертикальных кристаллизаторов на сахарных заводах.

Список литературы

1. Кухар В. Н., Сущенко А. К., Юшков Ю. П., Федорова Е. М., Посохов В. М., Димакова Т. В., Леонов В. И., Шаталова Л. А. Опыт внедрения вертикальных кристаллизаторов на сахарных заводах компании "РусАгро" // Сахар. 2002. № 3.
2. Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки: Справочник / Под ред. Е. Н. Судакова. 3-е изд. М.: Химия, 1979. 568 с.
3. Сапронов А. Р. Технология сахарного производства. М.: Колос, 1998. 495 с.
4. Силин П. М. Технология сахара. М.: Пищевая промышленность, 1967. 625 с.
5. Силин П. М. Вопросы технологии сахаристых веществ. М.: Пищепромиздат, 1950. 300 с.
6. Петров С. М., Подгорнова Н. М., Арапов Д. В., Курицын В. А. Алгоритм определения оптимальных параметров нормальной мелассы // Сахар. 2005. № 2. С. 45–49.
7. Гулый И. С. Непрерывная варка и кристаллизация сахара: теоретические и экспериментальные разработки. М.: Пищевая промышленность, 1976. 270 с.
8. Петров С. М., Курицын В. А., Арапов Д. В. Кинетическая модель скорости кристаллизации сахарозы из чистых растворов // Сахар. 2004. № 1. С. 47–49.
9. Петров С. М., Курицын В. А., Арапов Д. В. Модель вязкости водных сахарных растворов // Сахар. 2004. № 2. С. 31–33.
10. Петров С. М., Курицын В. А., Арапов Д. В. Кинетическая модель скорости роста кристаллов сахарозы из чистых и нечистых растворов // Сахар. 2004. № 6. С. 26–29.
11. Петров С. М., Арапов Д. В., Курицын В. А. Исследование уравнений для расчета коэффициента насыщения нечистых сахарных растворов // Сахар. 2005. № 1. С. 22–27.
12. Попов В. Д. Основы теории тепло- и массообмена при кристаллизации сахарозы. М.: Пищевая промышленность. 1973. 320 с.
13. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ: Практическое руководство / Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 238 с.

УДК 681.51

О. И. Атрощенко, аспирант,
Пятигорский государственный
технологический университет

Задача стабилизации гидролитосферных процессов методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов

Рассматривается применение метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов для нелинейного объекта управления понижениями уровня водоносного горизонта в скважинах центрального участка Кисловодского месторождения; анализ переходного процесса; управляющих воздействий.

Ключевые слова: коэффициент фильтрации, водоотбор, снижение динамических уровней, эксплуатационная скважина, контрольная скважина, закон управления, регулятор, система автоматического управления, понижение уровня, система дифференциальных уравнений, фазовое пространство, процесс фильтрации, декомпозиция системы, переходной процесс, управляющее воздействие.

Водоносный горизонт как объект управления

Водоносный горизонт — это объект с распределенными параметрами. Поведение такого объекта существенно зависит не только от времени, но и от пространственных переменных. Математическое описание работы объекта определяется сложным дифференциальным уравнением в частных производных, при этом параметры, входящие в модель, зависят от пространственных координат (коэффициентов фильтрации и скорости движения водоносного горизонта).

Основным негативным воздействием условий разработки месторождений является истощение эксплуатационных запасов ввиду чрезмерных водоотборов, существенно превышающих объемы природного фильтрационного питания горизонтов. Дисбаланс выражается в том, что в процессе эксплуатации происходит систематическое снижение динамических уровней и усложняются как условия разработки месторождения, так и общая экологическая ситуация в районе. Управление гидролитосферными процессами — одна из актуальных проблем региона Кавказских минеральных вод, так как его экономика базируется на использовании гидроминеральных ресурсов.

Модель объекта управления

Одним из основных параметров, характеризующих гидролитосферные процессы, является понижение уровня водоносного горизонта S . Это связано с тем, что при достижении критического уровня понижения происходит обрушение кровли (разрушение пласта) [3].

Математическая модель объекта представлена в виде дифференциального уравнения в частных производных с определяемыми по эмпирическим данным параметрами [3]:

$$\dot{S}(x, y, z, t) = \frac{1}{\eta} \left(k_{x, y, z} \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + k_{x, y, z} \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + k_{x, y, z} \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right) - F \frac{dS}{dx} - \hat{S}(t) \delta(x, y, z), \quad (1)$$

где S — понижение уровня водоносного горизонта (фазовая переменная) в м; $\hat{S}(t)$ — дебит (водозабор из эксплуатационных скважин), физический смысл — входное (управляющее) воздействие на объект управления, в эксплуатационных скважинах $\delta(x, y, z) = 1$, в контрольных скважинах $\delta(x, y, z) = 0$; η — коэффициент упругоэластичности коллектора, характеризующий сжимаемость воды в 1/м, принимается постоянным [3]; $k_{x, y, z}$ — коэффициент фильтрации по пространственным координатам, под фильтрацией понимается гравитационное движение жидкости в пористой среде, состоящей из поровых каналов, измеряется в м/сут. Коэффициент фильтрации характеризует водопроницаемость горных пород и зависит от физических свойств породы и фильтрующейся жидкости [4]. F — скорость движения водоносного горизонта в м/сут [4].

Коэффициенты фильтрации $k_{x, y, z}$ зависят от пространственных координат, а скорость движения водоносного горизонта F является нелинейной величиной [5].

Пространственная область разбивается равномерной сеткой на элементарные сопряженные блоки с шагом по пространственным координатам Δx , Δy , Δz , и все физические характеристики объекта в пределах выделенного блока относят к его центру тяжести (узловой точке). Точки дискретизации по оси x : $i = \overline{1, 7}$; по оси y : $j = \overline{1, 4}$; по оси z : $k = \overline{1, 4}$.

Введем прямоугольную сетку и проведем конечномерную аппроксимацию дифференциального уравнения в частных производных (1) методом конечных разностей:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{i, j, k} = & \frac{1}{\eta} k_{i, j, k} \left(\frac{S_{i-1, j, k} - 2S_{i, j, k} + S_{i+1, j, k}}{\Delta x^2} \right) + \\ & + \frac{1}{\eta} k_{i, j, k} \left(\frac{S_{i, j-1, k} - 2S_{i, j, k} + S_{i, j+1, k}}{\Delta y^2} \right) + \\ & + \frac{1}{\eta} k_{i, j, k} \left(\frac{S_{i, j, k-1} - 2S_{i, j, k} + S_{i, j, k+1}}{\Delta z^2} \right) - \\ & - F_{i, j, k} \frac{S_{i+1, j, k} - S_{i, j, k}}{\Delta x} - \hat{S}_{i, j, k} \delta(x_i, y_j, z_k). \end{aligned}$$

Таким образом, выполнен переход от одного дифференциального уравнения в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Коши. Введем переменные состоя-

ния $x_1, \dots, x_{20}$ и следующие обозначения: $d_1 = \frac{1}{\eta \Delta x^2}$,
 $d_2 = \frac{1}{\eta \Delta y^2}$, $d_3 = \frac{1}{\eta \Delta z^2}$; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ — шаги дискретизации; $\hat{S}_{i,j,k}$ — управляющее воздействие.

Объект управления описывается нелинейной многомерной моделью:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -k_1 x_1 (d_1 + d_2 + d_3) + k_2 d_1 x_2 + k_6 d_2 x_6 + \\ &\quad + k_{11} d_3 x_{11} - (F_0 - \sin x_1) \frac{x_2 - x_1}{\Delta x}; \\ \dot{x}_2 &= k_1 d_1 x_1 - k_2 x_2 (2d_1 + d_2 + d_3) + k_3 d_1 x_3 + \\ &\quad + k_7 d_2 x_7 + k_{12} d_3 x_{12} - (F_0 - \sin x_2) \frac{x_3 - x_2}{\Delta x}; \\ \dot{x}_3 &= k_2 d_1 x_2 - k_3 x_3 (2d_1 + d_2 + d_3) + k_4 d_1 x_4 + \\ &\quad + k_8 d_2 x_8 + k_{13} d_3 x_{13} - (F_0 - \sin x_3) \frac{x_4 - x_3}{\Delta x}; \\ \dot{x}_4 &= k_3 d_1 x_3 - k_4 x_4 (2d_1 + d_2 + d_3) + k_5 d_1 x_5 + \\ &\quad + k_9 d_2 x_9 + k_{14} d_3 x_{14} - (F_0 - \sin x_4) \frac{x_5 - x_4}{\Delta x}; \\ \dot{x}_5 &= k_4 d_1 x_4 - k_5 x_5 (d_1 + d_2 + d_3) + k_{10} d_2 x_{10} + k_{15} d_3 x_{15}; \\ \dot{x}_6 &= k_1 d_2 x_1 - k_6 x_6 (d_1 + 2d_2 + d_3) + k_7 d_1 x_7 + \\ &\quad + k_{16} d_3 x_{16} - (F_0 - \sin x_6) \frac{x_7 - x_6}{\Delta x}; \\ \dot{x}_7 &= k_2 d_2 x_2 + k_6 d_1 x_6 - k_7 x_7 (2d_1 + 2d_2 + d_3) + \\ &\quad + k_8 d_1 x_8 + k_{17} d_3 x_{17} - (F_0 - \sin x_7) \frac{x_8 - x_7}{\Delta x}; \\ \dot{x}_8 &= k_3 d_2 x_3 + k_7 d_1 x_7 - k_8 x_8 (2d_1 + 2d_2 + d_3) + \\ &\quad + k_9 d_1 x_9 + k_{18} d_3 x_{18} - (F_0 - \sin x_8) \frac{x_9 - x_8}{\Delta x}; \\ \dot{x}_9 &= k_4 d_2 x_4 + k_8 d_1 x_8 - k_9 x_9 (2d_1 + 2d_2 + d_3) + \\ &\quad + k_{10} d_1 x_{10} + k_{19} d_3 x_{19} - (F_0 - \sin x_9) \frac{x_{10} - x_9}{\Delta x}; \\ \dot{x}_{10} &= k_5 d_2 x_5 + k_9 d_1 x_9 - k_{10} x_{10} (d_1 + 2d_2 + d_3) + k_{20} d_3 x_{20}; \\ \dot{x}_{11} &= k_1 d_3 x_1 - k_{11} x_{11} (d_1 + d_2 + d_3) + \\ &\quad + k_{12} d_1 x_{12} + k_{16} d_2 x_{16} - (F_0 - \sin x_{11}) \frac{x_{12} - x_{11}}{\Delta x}; \\ \dot{x}_{12} &= k_2 d_3 x_2 + k_{11} d_1 x_{11} - k_{12} x_{12} (2d_1 + d_2 + d_3) + \\ &\quad + k_{13} d_1 x_{13} + k_{17} d_2 x_{17} - (F_0 - \sin x_{12}) \frac{x_{13} - x_{12}}{\Delta x}; \\ \dot{x}_{13} &= k_3 d_3 x_3 + k_{12} d_1 x_{12} - k_{13} x_{13} (2d_1 + d_2 + d_3) + \\ &\quad + k_{14} d_1 x_{14} + k_{18} d_2 x_{18} - (F_0 - \sin x_{13}) \frac{x_{14} - x_{13}}{\Delta x}; \\ \dot{x}_{14} &= k_4 d_3 x_4 + k_{13} d_1 x_{13} - k_{14} x_{14} (2d_1 + d_2 + d_3) + \\ &\quad + k_{15} d_1 x_{15} + k_{19} d_2 x_{19} - (F_0 - \sin x_{14}) \frac{x_{15} - x_{14}}{\Delta x}; \\ \dot{x}_{15} &= k_5 d_3 x_5 + k_{14} d_1 x_{14} - k_{15} x_{15} (d_1 + d_2 + d_3) + k_{20} d_2 x_{20};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_{16} &= k_6 d_3 x_6 + k_{11} d_2 x_{11} - k_{16} x_{16} (d_1 + 2d_2 + d_3) + \\ &\quad + k_{17} d_1 x_{17} - (F_0 - \sin x_{16}) \frac{x_{17} - x_{16}}{\Delta x} - u_1; \\ \dot{x}_{17} &= k_7 d_3 x_7 + k_{12} d_2 x_{12} - k_{16} d_1 x_{16} - k_{17} x_{17} (2d_1 + \\ &\quad + 2d_2 + d_3) + k_{18} d_2 x_{18} - (F_0 - \sin x_{17}) \frac{x_{18} - x_{17}}{\Delta x} - u_2; \\ \dot{x}_{18} &= k_8 d_3 x_8 + k_{13} d_2 x_{13} + k_{17} d_1 x_{17} - k_{18} x_{18} (2d_1 + \\ &\quad + 2d_2 + d_3) + k_{19} d_1 x_{19} - (F_0 - \sin x_{18}) \frac{x_{19} - x_{18}}{\Delta x} - u_3; \\ \dot{x}_{19} &= k_9 d_3 x_9 + k_{14} d_2 x_{14} + k_{18} d_1 x_{18} - k_{19} x_{19} (2d_1 + \\ &\quad + 2d_2 + d_3) + k_{20} d_1 x_{20} - (F_0 - \sin x_{19}) \frac{x_{20} - x_{19}}{\Delta x} - u_4; \\ \dot{x}_{20} &= k_{10} d_3 x_{10} + k_{15} d_2 x_{15} + k_{19} d_1 x_{19} - \\ &\quad - k_{20} x_{20} (d_1 + 2d_2 + d_3) - u_5.\end{aligned}$$

Физический смысл управлений $u_1, \dots, u_5$ — это понижение уровня водоносного горизонта в эксплуатационных скважинах. Согласно методу АКАР ("аналитическое конструирование агрегированных регуляторов по заданным инвариантным многообразиям") необходимо синтезировать законы управлений u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 как функцию координат состояния объекта, обеспечивающие минимальное понижение уровня в контрольных скважинах на один метр [5]:

$$\begin{aligned}x_1 = x_1^0 = -1, x_2 = x_2^0 = -1, x_3 = x_3^0 = -1, \\ x_4 = x_4^0 = -1, x_5 = x_5^0 = -1.\end{aligned}\quad (3)$$

Постановка задачи

Основной задачей является определение режимов эксплуатации водоносного горизонта, обеспечивающих минимальное истощение эксплуатационных запасов подземных вод. Имеется пять эксплуатационных и пять контрольных скважин, требуется синтезировать алгоритм управления методом АКАР, обеспечивающий минимальное понижение уровня водоносного горизонта в контрольных скважинах.

Основные положения метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов

Метод АКАР получил развитие в работах проф. А. А. Колесникова. Основные положения метода АКАР следующие.

В синергетических системах в процессе самоорганизации и образования диссипативных структур происходит уменьшение числа степеней свободы путем выделения лишь нескольких координат, к которым подстраиваются остальные. Именно эти выделенные макропеременные $\psi_s(x_1, \dots, x_n)$ и определяют основные особенности динамики системы, поэтому они получили название параметров порядка. Образование обобщенных параметров порядка $\psi_s(x_1, \dots, x_n)$ сопровождается процессом сжатия объемов в фазовом пространстве систем [1, 6].

Следствием процесса самоорганизации является образование инвариантных многообразий $\psi_s = 0$, к которым притягиваются траектории системы. Такое поведение системы позволяет поставить вопрос о направлении процессов, об их целях. Инвариантные многообразия $\psi_s(x_1, \dots, x_n)$ имеют размерность, всегда меньшую размерности исходной системы, что означает "забывание" начальных условий [2].

В общем виде объект управления описывается системой дифференциальных уравнений в форме Коши [6]

$$\dot{x}(t) = f(x, u), \quad (4)$$

где x — вектор координат состояния размерности n ; u — вектор управления. Ставится задача: найти закон управления

$$u(\psi) = u(x), \quad (5)$$

который обеспечивает перевод изображающей точки (ИТ) системы из произвольного начального состояния $x_0(x_{10}, \dots, x_{n0})$ сначала в окрестность инвариантного многообразия

$$\psi(x_1, \dots, x_n) = 0 \quad (6)$$

в фазовом пространстве координат, а затем дальнейшее асимптотически устойчивое движение изображающей точки вдоль этого многообразия в желаемое состояние системы. Закон управления (2) удерживает ИТ в указанной окрестности при ее дальнейшем движении вдоль многообразия (6). Притягивающие многообразия $\psi(x_1, \dots, x_n) = 0$ могут быть интерпретированы как задаваемые целевые множества, к которым неизбежно должна притягиваться ИТ из произвольного начального состояния, а затем двигаться вдоль них. Например, для объектов второго порядка многообразие представляет собой уравнение желаемой фазовой траектории $\psi(x_1, x_2) = 0$, с которой ИТ должна сначала сблизиться, а затем двигаться вдоль нее к началу координат фазовой плоскости [6].

Уравнение

$$T_i \dot{\psi}_i(t) + \psi_i = 0 \quad (7)$$

определяет алгоритм управления, который обеспечивает минимум функционалу на траекториях замкнутых систем. Именно уравнение (7) является тем условием, которому необходимо и достаточно удовлетворить для того, чтобы соотношение (6) было инвариантным многообразием синтезируемой системы [2]. Геометрической интерпретацией этого многообразия является гиперповерхность в фазовом пространстве координат $x_1, \dots, x_n$. Структуру функции $\psi(x_1, \dots, x_n)$ целесообразно конструировать идентичной структуре правых частей объекта (4). Задача синтеза с использованием агрегированных макропеременных (6) называется задачей аналитического конструирования нелинейных агрегированных регуляторов [1].

Задача синтеза сводится к построению дифференциальных уравнений замкнутой системы (4), (5) по заданным инвариантным многообразиям (6), опи-

сывающим заданную программу движения. В определении законов управления (5), обеспечивающих желаемое движение системы, и состоит основная нелинейная проблема АКАР [4]. Многообразие (6) названо агрегированной макропеременной. Под агрегированием обычно понимается получение из исходной модели так называемой агрегированной модели, которая содержит в себе меньшее число переменных, чем исходная [1, 2].

Синтез алгоритма управления методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов

В соответствии с числом независимых каналов управления может быть назначено пять инвариантов в соответствии с (3).

На первом этапе декомпозиции исходя из поставленной задачи (3) выбираем параллельную совокупность внешних инвариантных многообразий следующего вида [6]:

$$\psi_i = x_j + \varphi_i, \quad i = \overline{1, 5}, j = \overline{16, 20}. \quad (8)$$

Инвариантные многообразия (8) должны удовлетворять решению системы функциональных уравнений АКАР [1]:

$$T_i \dot{\psi}_i(t) + \psi_i = 0, \quad i = \overline{1, 5}. \quad (9)$$

При попадании изображающей точки системы на пересечение многообразий $\psi_1 = 0, \psi_2 = 0, \psi_3 = 0, \psi_4 = 0, \psi_5 = 0$ согласно принципу "расширения — сжатия фазового пространства" происходит декомпозиция исходной системы (2), и динамика системы описывается декомпозированной системой дифференциальных уравнений 15-го порядка:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{i\psi} &= f_i(x), \quad i = \overline{1, 5}; \\ \dot{x}_{j\psi} &= f_j(x) + k_{1j} d_3 \varphi_m, \quad j = \overline{6, 10}, m = \overline{1, 5}; \\ \dot{x}_{k\psi} &= f_k(x) + k_{1k} d_2 \varphi_m, \quad k = \overline{1, 5}, m = \overline{1, 5}, \end{aligned} \quad (10)$$

неизвестные функции φ_m — "внутренние" управления; $f_i(x), f_j(x), f_k(x)$ — правые части дифференциальных уравнений.

На втором этапе декомпозиции вводится первая совокупность "внутренних" инвариантных многообразий по числу каналов внутренних управлений [1]:

$$\psi_i = x_j + \varphi_i, \quad i, j = \overline{6, 10}, \quad (11)$$

$\varphi_6, \dots, \varphi_{10}$ — неизвестные "внутренние" управления, которые необходимо доопределить в процессе синтеза.

Инвариантные многообразия (11) должны удовлетворять решению системы функциональных уравнений АКАР:

$$T_i \dot{\psi}_i(t) + \psi_i = 0, \quad i = \overline{6, 10}. \quad (12)$$

В уравнениях (11) выразим "внутренние" управления для проведения процедуры синтеза "внутренних"

управлений: $\psi_6 = 0, x_6 = -\varphi_6, \psi_7 = 0, x_7 = -\varphi_7, \psi_8 = 0, x_8 = -\varphi_8, \psi_9 = 0, x_9 = -\varphi_9, \psi_{10} = 0, x_{10} = -\varphi_{10}$.

На пересечении совокупности "внутренних" инвариантных многообразий $\psi_6 = 0, \psi_7 = 0, \psi_8 = 0, \psi_9 = 0, \psi_{10} = 0$ динамика системы определяется декомпозированной системой пониженного порядка

$$\dot{x}_{i\psi} = f_i(x) + k_j d_2 \varphi_j, i = \overline{1, 5}, j = \overline{6, 10}. \quad (13)$$

На *третьем этапе декомпозиции* для поиска "внутренних" $\varphi_6, \dots, \varphi_{10}$ управлений вводится вторая группа "внутренних" инвариантных многообразий по числу каналов с внутренними управлениями (согласно поставленной цели (3)):

$$\psi_i = x_j - x_j^0, i = \overline{11, 15}, j = \overline{1, 5}. \quad (14)$$

Инвариантные многообразия должны удовлетворять решению системы функциональных уравнений АКАР:

$$T_i \dot{\psi}_i(t) + \psi_i = 0, i = \overline{11, 15}. \quad (15)$$

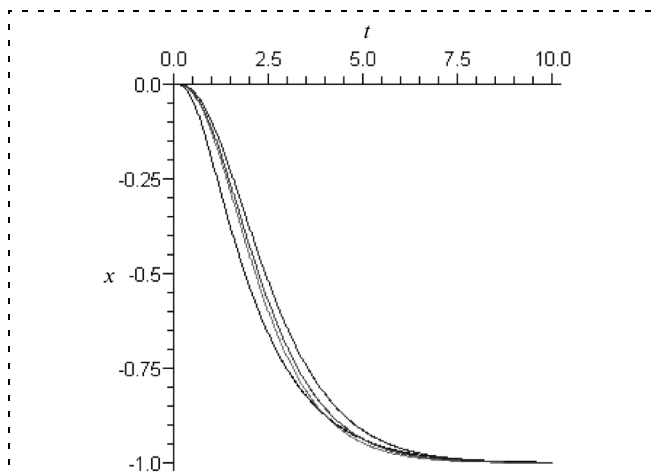


Рис. 1. Интегральные кривые

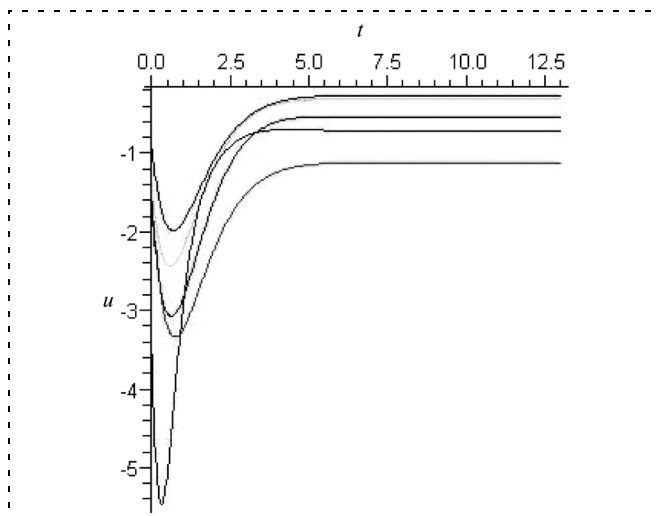


Рис. 2. Управляющие воздействия

Для определения внешних управлений необходимо осуществлять указанную процедуру синтеза в обратном порядке. На первом этапе синтеза подставим правые части системы дифференциальных уравнений (13) и (14) в систему (15), определим совокупность "внутренних" управлений $\varphi_6, \varphi_7, \varphi_8, \varphi_9, \varphi_{10}$. На втором этапе найденные внутренние управления $\varphi_6, \dots, \varphi_{10}$ подставим в систему (11), затем системы (10), (11) подставим в систему (12). Систему (12) решаем относительно управлений $\varphi_1, \dots, \varphi_5$. На третьем этапе найденные управления $\varphi_1, \dots, \varphi_5$ подставим в систему (8), а системы (2), (8) подставим в систему функциональных уравнений АКАР (9), откуда выражаем внешние управления u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 .

Результаты моделирования

Численное моделирование проводилось в программе Maple 10 при следующих параметрах настройки регулятора: $T_1 = 0,8; T_2 = 0,9; T_3 = 0,7; T_4 = 0,8; T_5 = 0,9; T_6 = 0,8; T_7 = 0,7; T_8 = 0,6; T_9 = 0,9; T_{10} = 0,8; T_{11} = 0,9; T_{12} = 0,8; T_{13} = 0,9; T_{14} = 0,8; T_{15} = 0,8$.

Значения коэффициентов фильтрации приняты следующими (в м/сут): $k_1 = 0,13; k_2 = 0,11; k_3 = 0,09; k_4 = 0,14; k_5 = 0,18; k_6 = 0,03; k_7 = 0,06; k_8 = 0,16; k_9 = 0,01; k_{10} = 0,17; k_{11} = 0,08; k_{12} = 0,1; k_{13} = 0,09; k_{14} = 0,01; k_{15} = 0,02; k_{16} = 0,2; k_{17} = 0,21; k_{18} = 0,2; k_{19} = 0,22; k_{20} = 0,1$.

На рис. 1 представлены результаты моделирования — интегральные кривые переменных состояний x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 по каждой контрольной скважине, стабилизирующихся к установившемуся значению (3). На рис. 2 изображены изменения во времени управляющих воздействий u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 по каждой эксплуатационной скважине [4].

Выводы: синтезированные законы управления u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 обеспечивают асимптотическую устойчивость движения замкнутой системы относительно заданного состояния, определяемого требованиями процесса управления (8). Из рис. 1 видно, что стабилизация переходного процесса (понижения уровня в контрольных скважинах) произойдет примерно через 9 сут после начала действия возмущающего воздействия.

Список литературы

1. Колесников А. А. Последовательная оптимизация нелинейных агрегированных систем управления. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Колесников А. А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994.
3. Малков А. В., Першин И. М. Синтез распределенных регуляторов для систем управления гидролитосферными процессами. М.: Научный мир, 2007.
4. Михайлов Л. Е. Гидрогеология. Ленинград: Гидрометеоздат, 1985.
5. Першин И. М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск: Рекламно-информационное агентство на КМВ, 2007.
6. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / Под ред. А. А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. Ч. II.

УДК 519.71

А. А. Сытник, д-р техн. наук, проф.,
Т. Э. Шульга, канд. физ.-мат. наук, доц.,
С. В. Папшев, канд. физ.-мат. наук, доц.,
Саратовский государственный
социально-экономический университет

Управление поведением мехатронных систем на основе свойств функциональной избыточности

Рассматривается подход к управлению поведением сложных систем дискретного типа, к числу которых относятся мехатронные системы. Исследуется возможность управления поведением таких систем в условиях, когда отсутствует или неисправно аппаратное дублирование и невозможно или нецелесообразно непосредственная модификация их поведения в процессе функционирования, т. е. возможность управления поведением этих систем на основе их функциональной избыточности. В качестве математической модели системы используется конечный детерминированный автомат.

Ключевые слова: управление поведением, функциональная избыточность, конечный детерминированный автомат, восстанавливающая последовательность.

Введение

Для современного состояния общей теории управляющих систем характерно использование для модификации поведения двух основных типов избыточностей: аппаратной (структурной) и функциональной (временной) [1].

В первом случае в состав (структуру) систем вводятся дополнительные резервные копии аппаратуры. При выходе из строя основной части или при необходимости модификации поведения систем на существующий аппаратный резерв возлагается задача реализации заданного функционирования. Во втором — используют текущий закон функционирования системы для формирования требуемой (отличной от заданной) реакции за счет имеющегося в данный конкретный момент или искусственно создаваемого резерва времени (организация "повторного счета", повторный запуск логической операции, измененной в результате нарушения).

Система обладает свойствами функциональной избыточности, если возможно использовать свойства текущего закона функционирования для формирования на выходах требуемой совокупности реакций. Функциональная избыточность может выявляться

в созданной системе при решении задачи управления поведением, а также целенаправленно создаваться на этапе проектирования системы, например, в целях восстановления ее поведения в случаях предполагаемых неисправностей.

Постановка задачи управления

Пусть дан конечный детерминированный автомат (КДА) $A = (X, Y, S, \delta, \lambda)$, где $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ — множество входных сигналов; $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}$ — множество выходных сигналов; $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ — множество состояний; $\delta: X \times S \rightarrow S$ — функция переходов; $\lambda: X \times S \rightarrow Y$ — функция выходов. Без ограничения общности будем считать, что $S = Y$ и $\delta \equiv \lambda$, т. е. выходом автомата A является его текущее внутреннее состояние. В этом случае первоначальный автомат упрощается и приводится к автомату

$$A = (X, S, \delta). \quad (1)$$

Введем обозначения: X^* — множество слов алфавита X ; S^* — множество слов алфавита S .

Пронумеруем состояния автомата вида (1) натуральными числами $S = \{0, 1, \dots, m-1\}$ и представим функции переходов данного автомата в виде обобщенных подстановок:

$$\delta_x: \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & m-1 \\ s_0 & s_1 & \dots & s_{m-1} \end{pmatrix}, x \in X. \quad (2)$$

Таким образом, поведение системы будет рассматриваться как совокупность подстановок вида (2) для каждого символа из входного алфавита. Обозначим $s = (0, 1, \dots, m-1)$, $s_x = (s_0, s_1, \dots, s_{m-1})$.

Определение 1. Пусть текущее поведение системы M моделируется автоматом $A = (X, S, \delta)$, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, а требуемое поведение — автоматом $B = (X, S, \delta')$, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Без ограничения общности будем считать $\delta'_{x_1}(s) \neq \delta_{x_1}(s)$, ..., $\delta'_{x_h}(s) \neq \delta_{x_h}(s)$, $\delta'_{x_{h+1}}(s) = \delta_{x_{h+1}}(s)$, ..., $\delta'_{x_n}(s) = \delta_{x_n}(s)$. Будем говорить, что существует возможность управления системой M на основе свойств функциональной избыточности, если $(\forall i, i = \overline{1, h})(\exists t_i \in X^*)$ такое, что $\delta'_{x_i}(s) = \delta_{t_i}(s)$. Последовательность t_i будем называть *восстанавливающей последовательностью*.

Из определения видно, что восстанавливающая последовательность — это последовательность входных символов, которая, будучи применима при любом текущем состоянии системы, в качестве послед-

него выходного символа даст требуемый выходной символ.

Фундаментальной основой для решения задачи управления поведением на основе свойств функциональной избыточности (далее — задачи управления поведением) является *теория универсальных автоматов — перечислителей*.

Определение 2. Пусть автомат $A = (X, S, \delta)$ реализует семейство отображений $\{\delta_p\}_{p \in X^*}$ вида $\delta_p: S \rightarrow S^*$ и генерирует множество последовательностей состояний

$$L(X^*) = \{s | (\exists s^* \in S)(\exists p \in X^*) : \delta_p(s^*) = s\}.$$

Тогда под поведением автомата A как *перечислителя* будем понимать множество $L(X^*)$ последовательностей состояний, генерируемых этим автоматом.

Определение 3. КДА $A = (X, S, \delta)$ является *универсальным перечислителем* для автоматов $\{A_i\}_{i \in I}$ семейства I (где $L(X_i^*)$ — множество, перечислимое автоматом A_i , $i \in I$), если выполняется условие $(\forall i \in I) L(X_i^*) \subseteq L(X^*)$.

Поставим задачу управления поведением системы в терминах теории универсальных автоматов. Пусть задан конечный детерминированный автомат A , моделирующий текущее поведение системы, и автомат B , моделирующий требуемое поведение системы. Определение возможности управления поведением системы эквивалентно ответу на вопрос: может ли автомат A моделировать каким-либо образом поведение автомата B . Иными словами, задача управления поведением системы разрешима тогда и только тогда, когда автомат A является универсальным для автомата B .

Задача построения универсального автомата-перечислителя относительно произвольного семейства КДА, а следовательно, и задача управления поведением системы являются алгоритмически неразрешимыми [2, 3]. Поэтому в настоящее время предпринимаются попытки выделить классы, для которых эти задачи имеют решение. Один из таких классов — класс КДА, допускающих моделирование семейством многочленов.

Рассмотрим многочлен, определенный на векторе s следующего вида:

$$f_x(s) = a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ls^l(\text{mod } m),$$

$$a_k \in S, k = \overline{1, l}, x \in X, \quad (3)$$

где операции сложения, умножения и возведения в степень — это операции кольца вычетов по модулю m .

Определение 4. Поведение автомата A вида (1) моделируется семейством многочленов $\{f_x\}_{x \in X}$ вида (3), если $(\forall x \in X)\delta_x$ представимо многочленом f_x , т. е. $f_x(s) = s_x$.

Формула для вычисления степени моделирующего многочлена и метод вычисления коэффициентов моделирующего многочлена для данной автоматной подстановки при условии, что он существует, приведены в работах [4, 5]. Условия моделируемости КДА семейством многочленов приведены в работе [7].

Для решения задачи управления поведением системы необходим некоторый критерий, позволяющий определить, является ли автомат A универсальным для автомата B . Такой критерий дает следующая теорема.

Теорема. Автомат $A = (X, S, \delta)$, который допускает моделирование семейством многочленов $\{f_x\}_{x \in X}$, является универсальным перечислителем для автомата $B = (X_B, S, \delta_B)$, который допускает моделирование семейством многочленов $\{f_x^{(B)}\}_{x \in X_B}$ тогда и только тогда, когда $(\forall x \in X_B)f_x^{(B)} \in L_A(X^*)$, где множество $L_A(X^*)$ — множество, перечислимое автоматом A [6].

Метод построения множества, перечислимого автоматами, моделируемыми семействами многочленов, приведен в работе [6].

Фактически вопрос о возможности управления поведением системы сводится к решению задачи универсальной перечислимости автомата B , задающим требуемое поведение системы, автоматом A , задающим текущее поведение системы, где автомат $A = (X, S, \delta)$ моделируется семейством многочленов $\{f_{x_1}, f_{x_2}, \dots, f_{x_h}, f_{x_{h+1}}, \dots, f_n\}$, автомат $B = (X, S, \delta')$ — семейством $\{f'_{x_1}, f'_{x_2}, \dots, f'_{x_h}, f'_{x_{h+1}}, \dots, f_n\}$. Таким образом, в общем случае для выяснения возможности управления поведением системы согласно теореме следует построить множество $L_A(X^*)$, перечислимое автоматом A , и проверить, принадлежат ли функции $f'_{x_1}, f'_{x_2}, \dots, f'_{x_h}$ данному множеству. Если хотя бы одна из этих функций не принадлежит вычисленному множеству, то делается вывод о невозможности управления поведением системы. Если же $(\forall i, i = \overline{1, h}) f'_{x_i} \in L_A(X^*)$, то $(\exists t_i \in X^*)$ такое, что $f'_{x_i}(s) = f_{t_i}(s)$. Последовательность t_i является *восстанавливающей последовательностью* для преобразования δ_{x_i} .

Предложим следующий метод построения восстанавливающей последовательности. Характерной особенностью данного метода является одновременность синтеза восстанавливающей последовательности и проверки ее существования для заданного преобразования.

Метод построения восстанавливающей последовательности

Вход: многочлены g_{x_i} , $i = \overline{1, n}$, и вида (3), моделирующие требуемое поведение автомата $A = (X, S, \delta)$ типа (1), многочлен g'_{x_h} ($1 \leq h \leq n$, $g'_{x_h}(s) \neq g_{x_h}(s)$) вида (3), моделирующий текущее поведение автомата A при подаче входного сигнала x_h .

Выход: последовательность входных символов t_h , порождающая после своего приложения структуру переходов внутренних состояний, соответствующую требуемому преобразованию, моделируемому функцией g_{x_h} , или вывод о невозможности управления поведением системы по данному преобразованию.

Шаг 1. Рассматриваем автомат $A' = (X, S, \delta')$, поведение которого моделируется многочленами f_{x_i} , $i = \overline{1, n}$, где

$$f_{x_i}(s) = \begin{cases} g_{x_i}(s), & i \neq h; \\ g'_{x_h}(s), & i = h, \end{cases} \quad i = \overline{1, n}.$$

Обозначим $f_x(s) = g_{x_h}(s)$.

Проверяем слова типа x_i^α , $i = \overline{1, n}$, $\alpha > 1$. $\forall k = \overline{1, n}$ строим функции $f_{x_k}^j$ следующим образом. Полагая $p = 2$.

a) Вычислим функцию $f_{x_k}^p = f_{x_k}(f_{x_k}^{p-1})$. Присвоим $j = 1$.

b) Сравним функцию $f_{x_k}^p$ с функцией $f_{x_k}^j$.

Если $f_{x_k}^p(s) = f_{x_k}^j(s)$, то $\alpha_k = p - 1$. В противном случае, если $f_{x_k}^p(s) = s$, тогда $\alpha_k = p$. В противном случае, если $j < p - 1$, увеличиваем j на 1 и повторяем действие b), а если $j = p - 1$, то увеличиваем p на 1 и переходим к действию a).

Если в результате вычисления $f_{x_k}^j$ выяснилось, что $(\exists x_k)(\exists j)$ такие, что $f_{x_k}^j(s) = f_x(s)$, то восстанавливающая последовательность $t_h = x_k^j$. В противном случае получаем числа α_k , $k = \overline{1, n}$, которые, по сути, определяют число различных подстановок, получаемых при последовательной подаче на вход только символа x_k , $k = \overline{1, n}$.

Положим $F_A^* = \{f_{x_1}, f_{x_2}, \dots, f_{x_n}\}$. Обозначим $T_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ — множество слов длины 1 в ал-

фавите $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. На данном шаге обозначим

$$SUF = \left\{ x_i^{\alpha_i + 1} \right\}_{i = \overline{1, n}}. \text{ Присваиваем } p = 2.$$

Шаг p. Проверяем слова типа $x_{j_1}^{\beta_{j_1}} x_{j_2}^{\beta_{j_2}} \dots x_{j_k}^{\beta_{j_k}}$ ($0 \leq \beta_{j_i} \leq \alpha_{j_i}$) длины p (причем возможно равенство $x_{j_i} = x_{j_k}$, $i \neq k$).

a) Строится множество слов $T_p = \{t_p^i\}_{i \in I_p}$ следующим образом. Строим слова длины p : к каждому слову из множества T_{p-1} добавляется справа каждый символ алфавита $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ т. е. $\forall k \in I_{p-1}$ строится слово $t_p^i = t_{p-1}^k x_j$, $j = \overline{1, n}$.

Построенное таким образом слово t включается во множество T_p тогда и только тогда, когда оно не имеет суффиксом ни одно из слов, принадлежащих множеству SUF . Иными словами, если слово представимо в виде $t = t' t_{suf}$ ($t_{suf} \in SUF$), то оно не включается в множество T_p . Если $T_p = \emptyset$, то делается вывод о невозможности управления поведением преобразования, моделируемого функцией g_{x_i} относительно заданного преобразования. Иначе переходим к действию b).

b) Для каждого слова $t_p = t_{p-1} x_j \in T_p$ вычисляем функцию

$$f_{t_p}(s) = f_{t_{p-1} x_j}(s) = f_{x_j}(f_{t_{p-1}}(s)).$$

Если $f_{t_p}(s) = f_x(s)$, то восстанавливающая последовательность равна t_p . Иначе сравниваем функцию f_{t_p} с каждой из функций из множества F_A^* . Если $\exists t_k^* \ 1 \leq k \leq p$ такое, что $f_{t_p} = f_{t_k}^*$ или, если $f_{t_p}(s) = \text{const}$, а $f_x(s) \neq \text{const}$, то слово t_p добавляется в множество SUF и исключается из множества T_p . Иначе функция f_{t_p} добавляется в множество F_A^* . В случае, если $f_{t_p}(s) = s$, функция f_{t_p} добавляется в множество F_A^* , а слово t_p добавляется в множество SUF и исключается из множества T_p . Делается вывод о том, что невозможно построить восстанавливающую последовательность длины, меньшей или равной p .

Увеличиваем p на 1 и выполняем шаг p.

Пример управления на основе предложенного метода

Пусть поведение автомата $A = (X, S, \delta)$, описывающее текущее поведение системы, с числом состояний $m = 3$ и множеством входных символов $X = \{x_1, x_2\}$, моделируется степенными функциями $f_{x_1}(s) = 1 + s$, $f_{x_2}(s) = s^2$, а поведение автомата $B = (X, S, \delta')$, описывающего требуемое поведение системы, моделируется степенными функциями $g_{x_1}(s) = 2 + 2s + 2s^2$, $g_{x_2}(s) = f_{x_2}(s) = s^2$.

Построим восстанавливающую последовательность для преобразования δ_{x_1} .

Шаг 1.

Обозначаем $f_x(s) = g_{x_1}(s) = 2 + 2s + 2s^2$.

Проверяем слова типа x_i^α , $i = 1, 2$, $\alpha > 1$, на решение задачи управления поведением:

$$f_{x_1}^2(s) = 2 + s; f_{x_1}^3(s) = s \Rightarrow \alpha_1 = 2; f_{x_2}^2(s) = s \Rightarrow \alpha_2 = 1;$$

$$F_A^* = \{f_{x_1}, f_{x_2}\}; T_1 = \{x_1, x_2\}; SUF = \{x_1^3, x_2^2\}; p = 2.$$

Шаг 2.

а) Строим слова длины 2: $x_1^2, x_1x_2, x_2x_1, x_2^2$. Из них только слово x_2^2 не включается в множество T_2 , так как принадлежит множеству $SUF \Rightarrow T_2 = \{x_1x_2, x_2x_1, x_1^2\}$. $T_2 \neq \emptyset \Rightarrow$ переходим к действию б).

б) Вычисляем функции $f_{x_1x_2}(s) = 1 + 2s + s^2$; $f_{x_2x_1}(s) = 1 + s^2$; $f_{x_1^2}(s) = 2 + s$.

Ни одна из них не совпадает с функциями множества F_A^* и не равна s и не является константой, следовательно, $F_A^* = F_A^* \cup \{f_{x_1x_2}, f_{x_2x_1}, f_{x_1^2}\} = \{f_{x_1}, f_{x_2}, f_{x_1x_2}, f_{x_2x_1}, f_{x_1^2}\}$.

Таким образом, относительно данного преобразования не существует восстанавливающей последовательности длины, меньшей или равной 2. $p = 2 + 1 = 3$.

Шаг 3.

а) Строим слова длины 3: $x_1x_2x_1, x_1x_2^2, x_2x_1^2, x_2x_1x_2, x_1^3, x_1^2x_2$. Из них слова $x_1x_2^2, x_1^3$ не включаются

в множество T_3 , так как их суффиксы принадлежат множеству $SUF \Rightarrow T_3 = \{x_1x_2x_1, x_2x_1^2, x_2x_1x_2, x_1^2x_2\}$. $T_3 \neq \emptyset \Rightarrow$ переходим к шагу б).

б) Вычисляем функцию $f_{x_1x_2x_1}(s) = 2 + 2s + s^2 = f_{x_1}(s)$.

Следовательно, восстанавливающая последовательность относительно заданного входного сигнала равна $t = x_1x_2x_1$. Таким образом, решена задача управления поведением системы относительно заданного преобразования.

Отметим, что для построения восстанавливающей последовательности относительно данного преобразования было вычислено только четыре функции, в то время как для построения множества $L_A(X^*) = 24$.

Заключение

Выделен класс конечных детерминированных автоматов, относительно которого разрешима задача управления поведением системы на основе свойств функциональной избыточности. Для достижения поставленной цели применен новый подход к исследованию свойств и моделированию поведения сложной системы — через рассмотрение свойств ее специальным образом построенной числовой модели. Этот подход позволяет применять известный аппарат алгебры при решении задач пересчетности автоматов.

Список литературы

1. Пархоменко П. П., Согомонян Е. С. Основы технической диагностики, оптимизации алгоритмов диагностирования, аппаратные средства. М.: Энегоиздат, 1981.
2. Сытник А. А. Перечисляемость при восстановлении поведения автоматов // Доклады РАН. 1993. Т. 238. С. 25—26.
3. Сытник А. А. Методы и модели восстановления автоматов // Автоматика и телемеханика. 1992. № 11.
4. Посохина Н. И. Об одном подходе к решению задачи синтеза автоматов-перечислителей // Теоретические проблемы информатики и ее приложений. Саратов: ГосУНЦ "Колледж". 1997. Вып. 1. С. 101—109.
5. Шульга Т. Э. Численные критерии восстановимости поведения КДА степенным многочленом // Теоретические проблемы информатики и ее приложений. Саратов: ГосУНЦ "Колледж". 1997. Вып. 1. С. 132—137.
6. Сытник А. А., Шульга Т. Э. Числовые методы функционального восстановления поведения систем // Автоматика и телемеханика. 2003. Вып. 10. С. 123—130.

УДК 004.4 + 338.364 + 669

А. С. Иванова, канд. экон. наук, ген. директор,
В. В. Пирогов, рук. проектов,
С. Н. Полотовский, ст. науч. сотр.,
ЗАО Научно-технический центр "Адепт", Самара

Опыт разработки и внедрения компьютерных систем управления производством металлообрабатывающих предприятий

Рассмотрены предпосылки, назначение, цель создания компьютерных систем управления производством металлообрабатывающих предприятий. Дано описание опыта разработки, внедрения и промышленной эксплуатации интегрированной системы управления производственной деятельностью группы компаний "Маяк".

Ключевые слова: металлообработка, интегрированные системы управления, этапы разработки, опыт внедрения, эффективность.

Актуальность проблемы

Металлообрабатывающие предприятия специализируются на производстве конструктивно простой (однопредметной) продукции: литая, штампованная, кованая продукция, листовой прокат, листовой профиль разной конфигурации, трубы, профиль и др. Продукция металлообрабатывающих предприятий используется в качестве заготовок, комплектующих и готовых изделий.

В советские времена эта продукция выпускалась заготовительными цехами машиностроительных предприятий или крупными металлургическими заводами. Период перестройки внес существенные изменения в организацию производства металлопродукции:

- заготовительные цеха выделились в самостоятельные предприятия (со статусом юридического лица);
- крупные предприятия разделились по видам продукции или видам деятельности (коммерция, производство, склады и др.) на самостоятельные предприятия;
- организовалось множество новых предприятий по производству металлопродукции, используемой при строительстве, реконструкции, ремонте зданий, павильонов, модулей различного назначения.

В основном это предприятия малого и среднего бизнеса, нередко объединенные в компании, холдинги и др. Характерными особенностями металлообрабатывающих предприятий, выявленными в процессе изучения и анализа их производственной деятельности, являются следующие:

- номенклатура выпускаемой продукции исчисляется десятками наименований, причем каждое наименование в зависимости от сочетаний марок материалов, цветов, размеров распадается на сотни различных позиций, заказываемых конкретными заказчиками;
- предприятия работают с большим числом заказчиков (сотни юридических и тысячи физических лиц) и поставщиков (десятки крупных, сотни мелких);
- производственная деятельность обеспечивается комплексом разнофункциональных (часто территориально удаленных), тесно взаимодействующих между собой подразделений (существуют структуры, обеспечивающие работу с заказчиками-покупателями продукции, организацию производства, сбыт продукции, материально-техническое обеспечение производства и др.).

Интенсивное развитие металлообрабатывающих предприятий, сопровождающееся резким увеличением количества обрабатываемой информации, привело к усложнению координации работ подразделений, обеспечивающих прием и выполнение заказов. Это обусловило необходимость использования компьютеров в существующих системах управления.

Изучение использования компьютерной техники в управлении металлообрабатывающими предприятиями и рынка готовых пакетов программ показало:

- на предприятиях компьютеры используются для решения отдельных задач в различных подразделениях (так называемая островковая компьютеризация);
- затраты на компьютеризацию существенные, а задача — низкая;
- готовые пакеты, предлагаемые различными фирмами, в основном направлены на решение задач бухгалтерского учета.

Отсутствие целостных информационных систем, увязывающих работу всех подразделений, обеспечивающих планирование, контроль и учет производственной деятельности в оперативном режиме, не позволяет оперативно решать задачи, влияющие на эффективность работы предприятий.

Интегрированные системы управления предприятиями

Повышение эффективности функционирования металлообрабатывающих предприятий на базе компьютеризации управления возможно путем создания принципиально новых интегрированных систем управления предприятиями (ИСУП), обеспечивающих сокращение сроков выполнения заказов, сокращение трудовых и материальных затрат на единицу выпускаемой продукции, снижение ее себестоимости и, как следствие, рост прибыли предприятия, повышение конкурентоспособности выпускаемой продукции.

ИСУП ориентированы на следующие основные принципы построения:

- ♦ единое информационное пространство для всех подразделений предприятия (в том числе территориально удаленных);
- ♦ обмен информацией между всеми подразделениями и функциональными блоками в режиме "on-line";
- ♦ оптимизация информационных потоков (исключение дублирования), сокращение документооборота, одноразовый ввод информации, разграничение доступа;
- ♦ рациональное перераспределение функций управления между службами и подразделениями предприятий;
- ♦ разработка новых технологий управления на базе включения в систему задач по оптимизации планирования производства заказов (календарное расписание, оптимизация партий запуска, сменно-суточное планирование); повышение уровня организации производства, моделирования, прогнозирования, анализа с просчетом различных вариантов и выбором оптимального управленческого решения;
- ♦ модульное (блочное) построение системы, обеспечивающее возможность развития и совершенствования системы путем наращивания или замены в системе отдельных модулей.

Практический опыт создания "ИСУП-Маяк"

Группа компаний "Маяк", объединяющая комплекс разнофункциональных территориально удаленных предприятий, которые, тесно взаимодействуя между собой, обеспечивают производство и реализацию около 100 видов металлопродукции (профнастил, металлочерепица, сайдинг, панели "сэндвич", подвесной потолок, гнутый профиль и др.), является характерным представителем современного металлообрабатывающего предприятия.

На рис. 1 показана структурная схема группы компаний "Маяк". Каждое предприятие, входящее

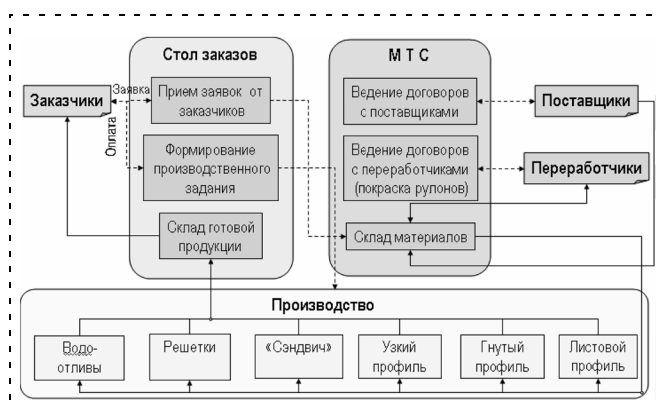


Рис. 1. Структурная схема группы компаний "Маяк"

в группу компаний "Маяк", выполняет определенные функции: прием заказов, отслеживание их выполнения, организацию производства металлопрофиля разных видов, материально-техническое обеспечение производства, хранение материалов, полуфабрикатов, готовой продукции, ее сбыт и др.

Компания работает с большим числом заказчиков (более ста юридических лиц и несколько тысяч физических лиц) и поставщиков (около десяти крупных, более пятидесяти мелких) из городов России и зарубежья: от Белоруссии до Сахалина, от Новороссийска до Норильска.

Интенсивное развитие группы компаний "Маяк" привело к резкому увеличению количества обрабатываемой информации, к усложнению координации работ всех входящих подразделений. Это обусловило необходимость создания целостной системы управления на единой информационной базе, информационно увязывающей работу всех предприятий, входящих в контур "Маяк" (в том числе и территориально удаленных), в режиме "on-line".

Спроектированная НТЦ "Адепт" и находящаяся в эксплуатации с 2001 года система управления производственной деятельностью группы компаний "Маяк" охватывает весь цикл управления от приема заявок на производство металлопродукции до отгрузки готовых заказов, соединяет три территориально удаленных площадки единой информационной системой, работает в режиме "on-line".

В системе задействовано более 100 компьютеров. В качестве среды создания и управления базами данных используется система управления реляционными базами данных (RDBMS) Oracle 9.02, в качестве инструментальных средств программного обеспечения используется интегрированная среда разработки клиент-серверных приложений Delphi (Inprize).

В первую очередь создаваемой системы управления было включено управление деятельностью всех подразделений группы компаний, обеспечивающих производство металлопродукции. Подсистема "Управление производственной деятельностью" является частью "ИСУП-Маяк". Другими составляющими являются подсистемы "Бухгалтерский учет (используется "Бухгалтерия 1С") и "Управление финансово-экономической деятельностью".

На рис. 2 показана укрупненная функциональная схема управления производственной деятельностью группы компаний в "ИСУП-Маяк", которая охватывает весь цикл управления от приема заявки на производство металлопродукции до отгрузки готовых заказов и включает следующие блоки задач.

Прием и ведение заявок. В коммерческом отделе при приеме заявки (при записи в компьютер) по каждой позиции спецификации и суммарно по заявке рассчитывается потребность в материале, проверяется его наличие на складе, до указанной в платежном документе даты оплаты на складе под заявку



Рис. 2. Функциональная схема управления производственной деятельностью в "ИСУП-Маяк"

резервируется материал, рассчитывается стоимость, формируются и распечатываются документ на оплату (счет или товарный чек).

По заявкам, не оплаченным в срок, выдается информация, необходимая для работы с заказчиком. После контакта с заказчиком срок оплаты заявки и, соответственно, срок резервирования материала под нее может быть продлен или заявка и резервирование снимаются. При нарушении второго срока оплаты заявка и резервирование снимаются автоматически.

Формирование производственного заказа. По выпискам банка отслеживается оплата заявок. По оплаченным заявкам формируются производственные заказы на производственные участки, определяется очередность и срок изготовления заказа на конкретном рабочем месте. Календарные графики изготовления металлопродукции рассчитываются для всего объема принятых производственных заказов из условия сокращения числа и продолжительности переналадок оборудования, рационального расхода металла.

Формирование сменных заданий на рабочие места. Сменные задания формируются на основе календарного графика с учетом фактического выполнения сменных заданий за предыдущую смену, при этом учитывается, для кого формируется сменное задание, уровень квалификации, производительность каждого рабочего или бригады.

Учет выполнения сменных заданий. По окончании смены вводится информация о фактическом вы-

полнении работ, включенных в сменное задание, учитывается фактический расход металла, отходы, некондиция. На производственном складе списывается израсходованный металл, регистрируется приход готовой продукции, начисляется зарплата за смену и нарастающим итогом от начала месяца.

Учет выполнения заказов. В коммерческий отдел поступает по сети и накапливается информация по каждой принятой заявке по всем стадиям ее жизненного цикла (резервирование металла, оплата, планируемая дата запуска в производство, поступление готовой продукции на склад, отгрузка готовой продукции).

Расчет показателей, формирование отчетов. По результатам работы за прошедший день или за заданный

период времени рассчитываются и в динамике отслеживаются показатели работы по объемам произведенной, реализованной продукции в разрезе операторов, оборудования, цехов по видам производств, по видам продукции, по расходу металла и др., на основании которых формируются и распечатываются отчеты по запросам пользователей, руководителей подразделений.

Этапы создания "ИСУП-Маяк"

Переход от "островковой" компьютеризации, от наращивания числа решаемых на компьютере задач практически без изменения действующей "ручной" системы управления к созданию ИСУП требует и другой методологии их создания.

Действующая система управления группой компаний "Маяк" основывалась на обмене информацией между предприятиями на бумажных носителях и через телефонную связь, на возможностях восприятия и обработки информации человеком, и потому в ней имелось много вынужденного дублирования в функциях подразделений и служб, в процедурах управления, в документообороте, а порой просто неразбериха и хаос. Перенос в проектируемую компьютерную систему управления существующей структуры и технологии управления мог привести в итоге к "автоматизированному хаосу".

Работы по созданию "ИСУП-Маяк" начались с проведения консалтинговых исследований, с рассмотрения предложений по изменениям технологии

работы предприятий, входящих в контур "Маяк", которые должны быть заложены в модель проектируемой системы. По результатам консалтинга было разработано техническое задание (ТЗ) на проектирование "ИСУП-Маяк", в котором было дано описание и анализ существующей системы управления, определены цель, состав задач, их краткое содержание, требования к техническому, информационному и программному обеспечению, намечены этапы, сроки выполнения работ.

На основании ТЗ была спроектирована функционально-информационная модель создаваемой системы управления "ИСУП-Маяк", состоящая из альбома схем, пояснительной записки, аван-проекта.

Альбом включал набор схем, отражающих функциональные и информационные связи между функциональными блоками и задачами проектируемой системы. В пояснительной записке давалось описание каждой схемы.

На рис. 3 приведен фрагмент схемы функционально-информационных связей блока "Прием и ведение заказов".

Описание схемы. Заявка (В31.01), поступающая от заказчика, вводится через клавиатуру (31.09) в ком-

пьютер, при этом используются справочники: "Контрагенты" (С31.03), "Продукция и услуги" (С31.01), "Покрытия" (С31.04), "Единицы измерения" (С31.05). При вводе заявки в автоматическом режиме делается пересчет объемов заказываемых материалов из линейных в весовые (31.10), поскольку продукция заказывается в линейных размерах (ширина, длина, толщина) и в штуках, а на складе учет ведется в тоннах.

После ввода заказываемой по заявке продукции и ее количества также в автоматическом режиме рассчитывается потребность материалов и комплектующих на заказанную продукцию и стоимость заказываемой продукции (31.13) согласно справочнику "Цены продукции и услуг" (С31.02). При этом на экране дается информация о наличии материалов и комплектующих на складах (ИМ1-4.01), требующихся для выполнения заявки.

Согласованная с заказчиком заявка (по условиям и срокам поставки, стоимости, срокам оплаты) и принятая к исполнению регистрируется в массиве "Заявки" (ИЗ1.01), под нее резервируется материал (31.12). При невыполнении сроков оплаты резервирование автоматически снимается (31.18), заявка переносится в архив (ИЗ1.02).

На принятую заявку формируется документ на оплату с использованием справочников "Формы реализации" (С31.07) и "Формы оплаты" (С31.06). Это может быть "Счет на оплату" (УЗ1.01) или "Товарный чек" (ВЗ1.02), которые сохраняются в соответствующих информационных массивах.

Функционально-информационные схемы всех блоков были тщательно проработаны со службами и подразделениями, скорректированы по их замечаниям и предложениям.

Дальнейшую детализацию проектируемая система получила при разработке аван-проекта. В аван-проекте дается описание технологии работы в системе каждого пользователя при решении закрепленных за определенными рабочими местами задач и при выполнении соответствующих процедур управления (меню, последовательность и алгоритмы внутримашинных расчетов, подробное описание экранных форм и отчетов, виды настроек, регламент работы подразделений в новых условиях). Аван-проект включает также раздел с описанием логической структуры базы данных и справочников. Аван-проект

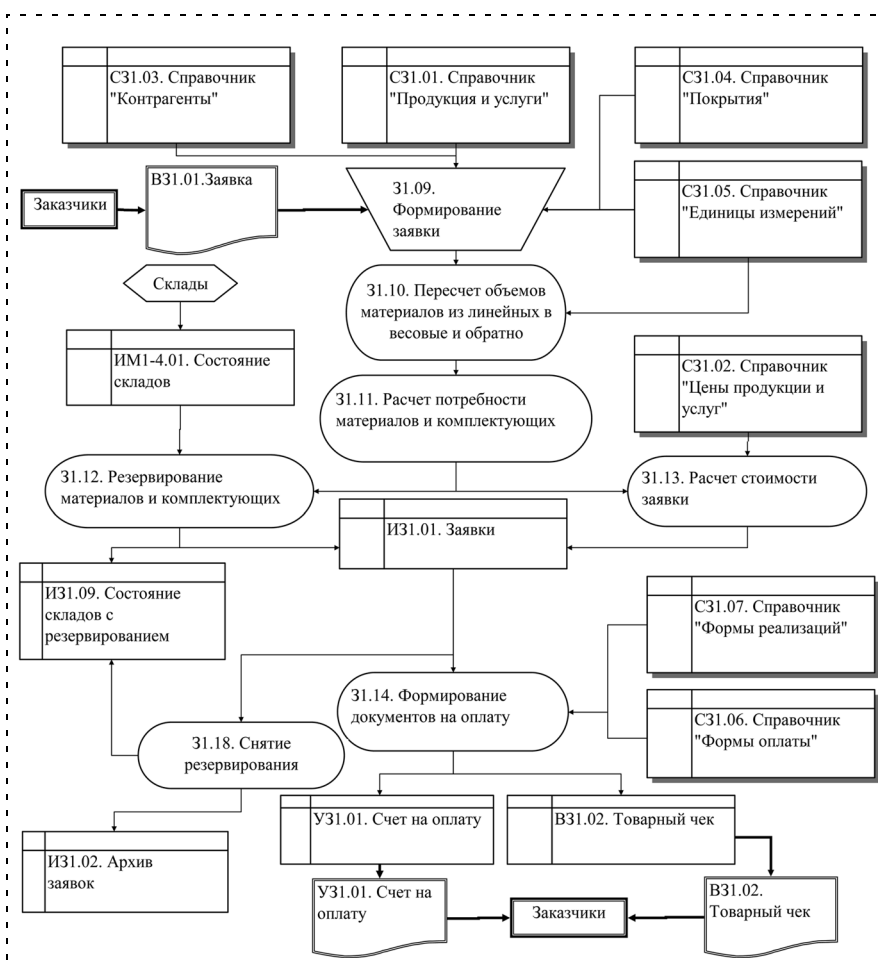


Рис. 3. Фрагмент функционально-информационной схемы блока "Прием и ведение заказов"

явился фактически подробным ТЗ для программистов и набором инструкций пользователям при работе с программами до разработки самих программ. Тщательно проработанный с пользователями аванпроект позволил существенно сократить время на написание программ и свести к минимуму их доработки в процессе опытно-промышленного внедрения.

Программное обеспечение разрабатывалось в строгом соответствии с аван-проектом. После проведения разработчиками экспериментальных расчетов на тестовой информации и демонстрации результатов заказчику были разработаны временные инструкции для пользователей, с помощью которых они могли бы самостоятельно работать в режиме опытно-промышленной эксплуатации системы.

Опытно-промышленная эксплуатация включала следующие работы: обучение пользователей, заполнение баз данных, отладку программно-математического обеспечения и корректировку инструкций в процессе опытно-промышленной эксплуатации по замечаниям и предложениям пользователей.

В промышленную эксплуатацию была сдана отлаженная, проверенная на жизнеспособность система: откорректированное программное обеспечение с заменой временных инструкций на постоянные и техническое описание "ИСУП-Маяк"

Эффективность "ИСУП-Маяк"

Создание ИСУП — процесс сложный, трудоемкий, дорогостоящий. Но как показывает опыт эксплуатации "ИСУП-Маяк", затраты окупались достаточно быстро за счет повышения эффективности функционирования предприятия, которая обеспечивается решением следующих задач:

- оперативный обмен информацией между удаленными подразделениями;
- планирование и учет оплаты и выполнения заказов и договоров на поставку готовой продукции по всем стадиям от момента принятия заказа до отгрузки продукции;
- планирование эффективной загрузки оборудования, учет и анализ его фактической загрузки;
- учет движения материальных средств, управление запасами;
- оптимизация распределения ресурсов предприятия.

Показателями эффективности внедрения "ИСУП-Маяк" являются следующие достигнутые результаты:

- улучшение качества и повышение оперативности работы менеджеров с заказчиками;
- сокращение сроков выполнения заказов;
- сокращение документооборота;

- повышение оперативности и исключение ошибок при обмене информацией между подразделениями (режим "on-line");
- улучшение использования трудовых и материальных ресурсов в процессе производства продукции;
- снижение себестоимости выпускаемой продукции;
- повышение конкурентоспособности выпускаемой продукции на российских и зарубежных рынках;
- рост прибыли предприятия.

"ИСУП-Маяк" эксплуатируется группой компаний "Маяк" с 2001 г., которая в эти годы продолжала динамично развиваться: расширялось производство (организовывались новые производственные площадки, расширялся ассортимент выпускаемой продукции, география потребителей и поставщиков), соответственно, развивалась и созданная ИСУП-Маяк":

- число компьютеров, задействованных в системе, возросло в два раза (было в 2001 г. — 50, в 2005 г. — 100, в 2007 г. — 150);
- появлялись новые задачи и функциональные блоки (система дополнилась блоком "управление финансами" — готовый покупной пакет программ);
- совершенствовались ранее разработанные алгоритмы, программы;
- произошла замена бухгалтерского пакета "БЭСТ" на программу "Бухгалтерия 1С".

При всех доработках спроектированной "ИСУП-Маяк" сохраняется одно из основных положений интегрированных систем управления — единое информационное пространство, созданное при проектировании первой очереди "ИСУП-Маяк", обеспечивающее функционирование блоков управления производственной деятельностью предприятий, входящих в контур "Маяк".

Возможность динамического развития "ИСУП-Маяк" (наращивание функциональных блоков и задач, совершенствование ранее спроектированных) без нарушения ее целостности и базовых положений, несомненно, может быть отнесено к достоинствам созданной и успешно эксплуатируемой интегрированной системы управления.

Список литературы

1. Гаврилов Д. А. Управление производством на базе стандарта MRPII. Принципы и практика. СПб.: Питер, 2003.
2. Питеркин С. В., Оладов Н. А., Исаев Д. В. Точно вовремя для России. Практика применения ERP-систем. 2-е изд. М.: АЛЬПИНА Паблишер, 2003 г.
3. Трушков В. Г. ООО "Маяк": современное управление и эффективное производство // Волга-бизнес. 2005. № 2.
4. Иванова А. С. "За ИСУП — будущее" // Волга-бизнес. 2005. № 2.

СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В ЗАДАЧАХ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ

УДК 681.3

В. А. Бимаков, директор,
директор ООО "Робинт", г. Ижевск

Высокоскоростная обработка пиксельных моделей для решения задач управления автономным роботом

Излагается один из подходов к построению устройств управления автономными роботами. Подход базируется на преимуществах пиксельного метода моделирования по глубокому распараллеливанию операций и процедур обработки, являющихся наиболее "проблемными" с точки зрения затрат времени на их выполнение.

Ключевые слова: автономный робот, задача управления, пиксельный метод моделирования, распараллеливание операций и процедур обработки информации.

*Полный текст статьи опубликован
в Приложении к журналу*

УДК 681.51:004.932.2:004.823

А. К. Платонов, д-р техн. наук, проф.,
В. П. Носков*, канд. техн. наук, доц.,
ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, Москва,
НИИ СМ МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва

Навигационная точность зрительного канала робота

Описан метод оценки точности привязки объектов окружения робота по сигналам откалиброванной видеокамеры. Модель зрительной системы робота базируется на представлении Ли проективного отображения двумерной плоскости в себя. Это позволяет получить аналитические выражения для параметров прямого и обратного отображений "сцена — кадр" (или "сцена — сцена" — в процессе движения) без знания характеристик видеодатчика и места его установки на роботе. Описывается метод калибровки параметров преобразования, оценивается его точность и анализируются причины потери точности навигационной привязки.

Ключевые слова: мобильные роботы, навигация, техническое зрение, обработка сцен, проективные преобразования, калибровка датчиков, погрешности навигационной привязки.

*Полный текст статьи опубликован
в Приложении к журналу*

УДК 004.896, 004.932.2, 004.823

А. А. Богуславский, д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник,
А. А. Кирильченко, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник,
А. К. Платонов, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотрудник,
С. М. Соколов, д-р физ.-мат. наук, проф., вед. науч. сотрудник,
О. В. Трифонов, канд. техн. наук, доц., ст. науч. сотрудник,
В. С. Ярошевский, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник,
Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва

Построение описания внешней среды в системах информационного обеспечения мобильных робототехнических комплексов

Рассматривается проблема представления окружающего пространства и решения в нем навигационной задачи мобильных робототехнических комплексов. Дается краткий обзор многолетнего опыта решения этой проблемы в Институте прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН. В качестве методической основы построения эффективного описания внешней среды мобильных роботов предлагается специально разработанное направление качественной навигации — интерпретирующая навигация. Приводятся результаты теоретических исследований, компьютерного моделирования и натурных экспериментов. Акцент делается на использование систем технического зрения. Плодотворность выбранных решений подтверждается рядом разработок для решения народнохозяйственных задач. Описываются действующие образцы программно-аппаратных средств построения многофункциональной системы информационного обеспечения мобильных роботов.

Ключевые слова: представление окружающего пространства, компьютерное видение, системы технического зрения реального времени, методы программирования, интерпретирующая навигация, мобильные роботы.

Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу

Указатель статей, опубликованных в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" в 2008 г.

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Акунов Т. А., Слита О. В., Ушаков А. В.** Назначение структуры собственных векторов, доставляющей динамической системе модальную робастность с минимальными затратами на управление. № 1.
- Асанов А. З., Каримов В. С.** Применение технологии вложения в задаче синтеза САУ для многосвязного объекта с запаздываниями по состоянию. № 9.
- Афанасьева К. Е., Ширяев В. И.** Адаптивное оценивание и прогнозирование в динамических системах на основе гарантированного подхода. № 8.
- Бобцов А. А., Кремлев А. С.** Алгоритм компенсации неизвестного синусоидального возмущения для линейного неминимально фазового объекта. № 10.
- Востриков А. С.** Старшая производная и большие коэффициенты в задаче управления нелинейными нестационарными объектами. № 5.
- Гайдук А. Р., Плаксиенко Е. А.** Синтез динамических систем по требуемым показателям качества. № 4.
- Ефанов В. Н., Шевяхов Е. Н.** Стабилизация сложных динамических систем с использованием метода полюсного сдвига. № 1.
- Кириллов А. Н.** Нелинейная стабилизация динамических систем управления. № 12.
- Колоколов Ю. В., Моновская А. В.** Прогнозирование С-бифуркационных явлений в динамике импульсных преобразователей по геометрическим инвариантам фазовых траекторий. № 7.
- Краснощеченко В. И.** Синтез управления в задаче быстрогодействия с использованием метода модельного прогнозируемого управления. № 10.
- Макаров Н. Н., Семашкин В. Е.** Предельно достижимая точность линейных следящих систем. № 10.
- Пилишкин В. Н.** Линейно-матричный метод синтеза регулятора при симметризации фазовых ограничений. № 7.
- Плешивцева Ю. Э.** Точная редукция к конечномерным моделям в одном классе задач оптимального управления системами с распределенными параметрами. № 7.
- Сельвесюк Н. И.** Использование адаптирующих регуляторов для синтеза оптимального управления множеством динамических объектов. № 11.
- Слита О. В., Ушаков А. В.** Модальное управление: два способа реализации концепции подобию. № 9.
- Тягунов О. А.** Выбор показателей качества при многокритериальной настройке параметров систем управления. № 4.
- Тян В. К.** Редукция процедуры синтеза многомерных линейных систем управления к синтезу одномерных с типовым объектом. № 4.
- Фалдин Н. В., Моржов А. В.** Методы анализа автоколебательных систем с двумя управляющими элементами. № 7.
- Феофилов С. В.** Периодические движения в релейных системах с трехпозиционным управлением и ограничителями в объекте регулирования. № 5.
- Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** О неробастности алгоритмов параметрической идентификации в условиях помех. № 12.
- Филимонов Н. Б., Деменков М. Н.** Дискретное упреждающее управление линейными динамическими объектами с параметрической полиэдральной неопределенностью. № 9.
- Французова Г. А.** Двухконтурные системы экстремального регулирования с формированием заданной динамики. № 5.
- Фуртат И. Б., Цыкунов А. М.** Адаптивное управление объектами с неопределенной постоянной структурой и неизвестным знаком высокочастотного коэффициента усиления. № 11.
- Цыкунов А. М.** Алгоритм робастного управления линейными динамическими объектами по выходу. № 8.

ИССЛЕДОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

- Алфимов С. М.** Перспективные направления развития базовых военных технологий в области создания систем управления и обработки информации. № 2.
- Ведерников Ю. В.** Некоторые подходы к решению задачи выбора сложных систем на основе нечетких отношений предпочтения. № 6.
- Гранкин Б. К., Козлов В. В., Лысенко И. В.** Принципы декомпозиции сложных объектов в проектных исследованиях. № 6.
- Ефанов В. Н., Шевяхов Е. Н.** Согласованно-децентрализованное управление сложными техническими объектами. № 6.

ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ, ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

- Абрамов Г. В., Емельянов А. Е., Ивлиев М. Н.** Математическая модель цифровой системы управления с состязательным методом доступа. № 7.
- Анисимов А. А., Тарарыкин С. В.** Автоматическая настройка полиномиальных регуляторов электромеханических систем с использованием искусственной нейронной сети. № 8.
- Бобков С. Г.** Проблемы создания быстродействующих системных контроллеров промышленного применения. № 12.
- Бурлаченко Т. Б., Морозова Т. Ю.** Нейросетевая оптимизация абдуктивных выводов в задачах диагностики технических систем. № 8.
- Габидулин М. А.** Синтез фотоэлектрического цифрового преобразователя угла и скорости, встраиваемого в исполнительный электродвигатель. № 5.
- Иванова А. С., Пирогов В. В., Полотовский С. Н.** Опыт разработки и внедрения компьютерных систем управления производством металлообрабатывающих предприятий. № 12.
- Колоколов Ю. В., Моновская А. В., Мелихов А. Ю.** Гибридный алгоритм моделирования динамики импульсных систем преобразования энергии большой размерности. Часть 1. Разработка гибридного алгоритма. № 1.
- Колоколов Ю. В., Моновская А. В., Мелихов А. Ю.** Гибридный алгоритм моделирования динамики импульсных систем преобразования энергии большой размерности. Часть 2. Оптимизация гибридного алгоритма по критерию временных затрат. № 5.
- Красильникьянц Е. В., Бурков А. П., Иванков В. А.** Применение контроллеров движения для систем управления электромеханическими объектами. № 2.
- Сытник А. А., Шульга Т. Э., Папшев С. В.** Управление поведением мехатронных систем на основе свойств функциональной избыточности. № 12.
- Шидловский В. И.** Дискретизация непрерывной системы управления методом квадратичной оптимизации. № 7.

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Аршанский М. М., Королев Д. Е.** Разработка специальной базы знаний на основе данных инспекционной системы в задачах управления мобильными роботами. № 10.
- Баранов Д. Н., Ермолов И. Л., Плешаков Р. В., Подураев Ю. В.** Повышение автономности мобильного робота "Вездеход-ТМЗ" на основе бортовой системы навигации. № 5.
- Большаков А. А., Голик М. С.** Интеллектуальная система поиска неисправностей в робототехническом комплексе. № 3.
- Евсеев А. А., Носков В. П., Платонов А. К.** Формирование электронной карты при автономном движении в индустриальной среде. № 2.
- Егоров О. Д.** Особенности расчета преобразователей движения мехатронных и роботизированных систем. № 10.
- Егоров О. Д.** Структурный анализ исполнительных устройств роботов. № 7.
- Ермолов И. Л.** Автономность мобильных роботов, ее сравнительные меры и пути повышения. № 6.
- Ермолов И. Л.** Иерархическое комплексирование данных в мобильной робототехнике. № 9.
- Каляев И. А., Шеремет И. А.** Военная робототехника: выбор пути. № 2.

- Кулаков Ф. М., Чернакова С. Э.** Информационные технологии обучения роботов показом движений. Ч. I. Концепция и принципы моделирования движений. № 7.
- Кулаков Ф. М., Чернакова С. Э.** Информационная технология обучения роботов показом движений. Ч. II. Алгоритмы и реализация модели формы движения. № 8.
- Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Кадочников М. В., Ситников М. С.** Использование генетических алгоритмов для автоматического формирования базы знаний интеллектуальной системы управления автономным мобильным роботом. № 6.
- Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П.** Интеллектуальные системы управления автономными мобильными объектами. № 2.
- Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Кадочников М. В.** Алгоритмы управления движением многозвенных мехатронно-модульных роботов с адаптивной кинематической структурой. № 3.
- Петухов С. В.** Методы автономной навигации при попятном движении робота по запомненным ориентирам на пройденной траектории. № 8.
- Пряничников В. Е.** Алгоритмическое обеспечение дистанционных сенсоров мобильных роботов. № 10.
- Пшихонов В. Х.** Организация репеллеров при движении мобильных роботов в среде с препятствиями. № 2.
- Скрябин А. М., Кардаш Д. И., Фрид А. И.** Модернизация управляющих программ систем автоматического управления автономными мобильными объектами. № 3.
- Шаршеналиев Ж. Ш., Даровских В. Д.** Эмергентность много-связной гибкой производственной системы. № 6.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

- Арапов Д. В., Курицын В. А.** Оптимизация температурного режима вертикального кристаллизатора. № 12.
- Атланов А. В.** Оценивание эксплуатационных характеристик смазочно-охлаждающей жидкости в ходе технологического процесса. № 3.
- Атрошенко О. И.** Стабилизация гидrolитосферных процессов методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов. № 12.
- Афонин С. М.** Исследование абсолютной устойчивости системы управления деформацией пьезопреобразователя для нано- и микроперемещений. № 1.
- Баталов С. А.** Синтез системы управления нефтедобычей и контроля нефтенасыщенности пласта на ранней стадии его разработки. № 6.
- Блинников А. Е.** Разработка новых методов организационного и технологического управления в литейном производстве. № 10.
- Бондарчук А. А., Матвеев М. Г.** Анализ моделей управления твердостью стали в процессе плавки. № 3.
- Буриян Ю. А., Сорокин В. Н.** Управление частотой излучения гидравлического скважинного вибратора. № 6.
- Валеева Р. Г., Сильнова С. В., Пузырникова Е. А.** Интеллектуальная система управления производством и сбытом. № 1.
- Гиберт Д. П., Ковригин Л. А.** Алгоритм управления дебитом нефтяных скважин с парафиновыми отложениями. № 6.
- Гузайров М. Б., Ильясов Б. Г., Тагирова К. Ф., Ганеев А. Р.** Оптимальное управление режимами работы группы нефтяных скважин на основе упрощенной модели участка пласта. № 12.
- Девятков Д. Х., Файнштейн С. И., Тутарова В. Д., Калитаев А. Н.** Оперативное планирование отгрузки готовой продукции со складов металлургических предприятий. № 4.
- Козырев В. В.** Мехатронные модули для наноиндустрии: разработка, создание и внедрение. № 1.
- Колосов О. С., Гармаш В. Б., Деев Р. В., Морозов Р. Б.** Повышение помехоустойчивости и эффективности алгоритма регулирования температуры горячего водоснабжения на центральных тепловых пунктах. № 10.
- Коростелев В. Ф., Рассказчиков А. Н., Мартынов И. Е.** Алгоритмическое и программное обеспечение системы управления процессом литья с наложением давления. № 1.

- Кудинов Ю. И., Иванченко К. С., Кудинов И. Ю.** Разработка нечеткой системы прогнозирования качества металлопродукции. № 10.
- Лебедев Г. Н., Щеткин С. Л.** Разработка оптимального управления процессом обогащения руды при ее сортировке. № 7.
- Левков А. А.** Методы повышения эффективности систем управления организационно-техническими объектами. № 7.
- Малков А. В., Першин И. М.** Проектирование распределенной системы управления режимами эксплуатации месторождения "Куюлус". № 4.
- Малогин В. Д., Иванов Е. Б.** Экспертная система управления технологическими процессами на примере шлакоперерабатывающей установки. № 3.
- Резчиков А. Ф., Голембиовский Ю. М., Аветисян Ю. А.** Повышение управляемости и компьютеризация систем электро-снабжения как важнейшее направление экономии энергии в промышленности. № 4.
- Саханский С. П.** Управление температурой нагревателя на установке выращивания монокристаллов германия. № 1.
- Фищенко А. Н.** Моделирование и анализ системы массового обслуживания вулканизационного производства. № 7.

ИЗМЕРЕНИЯ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Боровик С. Ю., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П.** Принципы построения систем сбора, преобразования и обработки информации для экспериментальных исследований винтовентиляторов. № 3.
- Горбатенко Б. Б., Максимова Л. А., Резчиков А. Ф., Рябухо В. П.** Восстановление изображения объекта по записи распределения интенсивности дифракционного поля для контроля микроперемещений. № 9.
- Гранкин Б. К., Козлов В. В., Лысенко И. В., Петров Г. Д.** Метод контроля технического состояния уникальных механических объектов при длительной их эксплуатации. № 3.
- Джаширов В. Э., Панкратов В. М., Барулина М. А.** Датчик температур для мониторинга и диагностики ракетно-космической техники в условиях тепловых ударов. № 3.
- Кычкин В. И., Кычкин А. В., Болотов Д. А.** Прибор для оценки сцепных качеств дорожных покрытий на основе нечеткой логики. № 11.
- Лазичев А. А., Самулеева Ю. А.** Расчет параметров сигнализирующей подсистемы управления давлением. № 11.
- Лазичев А. А., Самулеева Ю. А.** Система автоматизированной настройки манометров с помощью нанесения шкал. № 8.
- Мурынин А. Б., Сафонов И. В., Яковлев С. Ю.** Контроль качества пористых эластичных материалов методами технического зрения. № 11.
- Мусатов В. Ю., Сысоев В. В., Машенко А. А., Варежников А. С., Хризостомов А. А.** О возможности применения нейропроцессора для обработки отклика однокристалльной мультисенсорной микросистемы идентификации газов. № 1.
- Саханский С. П.** Измерение площади монокристалла в системе автоматического управления выращиванием германия. № 8.
- Саханский С. П.** Особенности определения формы фронта кристаллизации при выращивании монокристаллов германия. № 9.
- Седов А. В., Тришечкин Е. В.** Формула для вычисления спектра дискретного сигнала при варьировании частоты следования отсчетов в системах контроля и управления. № 8.
- Чекушкин В. В., Киселев Н. Ф., Аверьянов А. М.** Исследование методов реализации функциональных зависимостей между информативными параметрами измерительной системы. № 11.

МОДЕЛИРОВАНИЕ, УПРАВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЕ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

- Калугин Ф. В.** Двухрежимный алгоритм фильтрации частоты оборотов коленчатого вала дизельного двигателя. № 5.
- Кулешов А. С.** Математические модели движения скейтборда. № 5.
- Поддубный В. И., Trächtler A., Jäker K.-P., Nachtigal V.** Определение оптимальных параметров эластичных опор электро-

двигателя привода колеса для улучшения динамики колесной машины. № 5.

Соломахо В. Л., Руктешель О. С., Кусяк В. А., Филимонов А. А., Озеров Г. С., Ефимчик И. Н. Стендовые испытания автоматизированной системы переключения передач транспортного средства. № 5.

НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Александров А. А., Кабанов С. А. Оптимизация посадки беспилотного летательного аппарата с учетом ограничений на управление. № 2.

Алпатов Б. А., Балашов О. Е., Степашкин А. И. Повышение точности сопровождения объектов бортовой оптико-механической системой с двухосным карданным подвесом. № 9.

Бражник В. М., Герасимов Г. И. Развитие интегрированных комплексов бортового оборудования самолетов нового поколения. № 2.

Волжин А. С. Об опыте измерения методической ошибки спутникового навигационного приемника, вызванной различием абсолютной и относительной угловой скорости суточного вращения Земли. № 4.

Костюков В. М., Кутаранов А. Х. Определение путевой скорости летательного аппарата с помощью оптико-электронной системы. № 4.

Лебедев Г. Н., Тин Пхон Чжо. Оценка безопасности и экономичности полета самолетов при заходе на посадку с помощью обратной задачи линейного программирования. № 11.

Павлова Н. В., Петров В. Г., Видов К. С. Диалоговый комплекс прототипирования и имитационного моделирования бортового оборудования летательных аппаратов на основе информационной модели. № 4.

Пешехонов В. Г., Несенюк Л. П., Грязин Д. Г., Евстифеев М. И., Некрасов Я. А., Аксёненко В. Д. Микромеханический гироскоп, разрабатываемый в ЦНИИ "Электронприбор". № 2.

Скубилин М. Д., Письменов А. В., Спиридонов О. Б. Мониторинг летательного аппарата с учетом состояния его пилота. № 6.

Соколов В. Б., Теряев Е. Д. Беспилотные летательные аппараты: некоторые вопросы развития и применения (обзор по материалам публикаций в Интернете). № 2.

Солодухин В. А. Обоснование решений в автоматизированной системе поддержки деятельности диспетчера по управлению воздушным движением и обратная задача линейного программирования. № 11.

Шендрик Д. А., Французова Г. А. Подход к комплексному моделированию управляемой системы стабилизации оптической линии визирования. № 9.

СУДОВАЯ АВТОМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ И РЕЧНОМ ФЛОТЕ

Инзарцев А. В., Павин А. М. Управление автономным необитаемым подводным аппаратом при инспекции искусственных протяженных объектов. № 4.

Кислицын А. В., Буйневич М. В., Метелицин В. В. О повышении безопасности мореплавания путем интеграции систем наблюдения различных ведомств, занимающихся морской деятельностью. № 8.

Филаретов В. Ф., Бобков В. А., Юхимец Д. А., Мельман С. В., Борисов Ю. С. Особенности виртуального моделирования движений подводного аппарата с учетом воздействий окружающей вязкой среды. № 4.

МЕХАТРОНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ

Бодин О. Н., Митрохина Н. Ю. Регуляризация решения обратной задачи электрокардиографии в компьютерной диагностической системе "Кардиовид". № 11.

Ковшов Е. Е., Мути Д. И. Управление гетерогенными данными в корпоративной информационной системе медицинского учреждения путем применения XML-технологий. № 3.

Морозов В. В., Жданов А. В. Использование технологий быстрого прототипирования при создании искусственных желудочков сердца систем вспомогательного кровообращения. № 11.

Морозов В. В., Жданов А. В., Костерин А. Б. Биомеханические тренажеры на базе мехатронных модулей для разработки посттравматических контрактур. № 3.

Чернакова С. Э., Карпов А. А., Нечаев А. И., Ронжин А. Л. Мультимодальный человек-машинный интерфейс в медицинских приложениях. № 11.

Черняев А. В., Ясюкевич Д. О. Моделирование процесса насыщения потока крови кислородом в мехатронных медицинских устройствах массообменного типа. № 3.

МЕХАТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ И ТРЕНАЖЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

Дорри М. Х., Рошин А. А. Инструментальная программно-алгоритмическая система для разработки исследовательских комплексов. № 12.

Иванов В. С., Моисеев В. Л. Вопросы совершенствования методов аттестации испытательного оборудования для воспроизведения механических воздействующих факторов. № 12.

Прошин И. А., Тимаков В. М., Прошкин В. Н. Совершенствование динамических стендов авиационных тренажеров на базе гидроприводов. № 12.

ТЕСТИРОВАНИЕ И НАДЕЖНОСТЬ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Короткий Д. А., Устименко А. Б., Ренжин Д. В. Универсальная архитектура тестовой системы для функционального тестирования встроенного программного обеспечения мехатронных устройств. № 9.

Миронов Б. А., Филиппов С. И. Выбор метода определения надежности программных средств мехатронных систем. № 9.

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

Лохин В. М., Романов М. П., Манько С. В. Открытое письмо с обсуждением публикации С. Ф. Сергеева "Методология эргономического проектирования систем искусственного интеллекта для самолетов 5-го поколения". № 10.

Сергеев С. Ф. Ответ на открытое письмо В. М. Лохина, М. П. Романова, С. В. Манько. № 10.

Указатель статей, опубликованных в приложениях к журналу "Мехатроника, автоматизация, управление" в 2008 г.

ПРОБЛЕМЫ МЕХАТРОНИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ В РАБОТАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ЮЖНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА. № 1

Кравченко П. П., Хусаинов Н. Ш. Оптимизированные дельта-преобразования второго порядка и синтез алгоритмов цифрового управления для объектов с частичной структурной неопределенностью.

Кузьменко А. А. Синергетический синтез динамических регуляторов для энергосистем, функционирующих в условиях кусочно-постоянных возмущений.

Медведев М. Ю. Робастное управление системой с квадратичной нелинейностью.

Рогозов Ю. И., Бутенков С. А., Свиридов А. С., Горбань Н. С., Дубровский А. А., Друшков С. А., Жибулис Ю. А., Почечуев Н. В., Стукоцкий Л. Н. Метод создания инструментальных средств разработки автоматизированных информационно-управляющих систем.

Финаев В. И., Молчанов А. Ю. Задача автоматической оптимизации при нечетком интервальном задании параметров экстремальной характеристики объекта.

УПРАВЛЯЮЩИЕ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ЛАТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ. № 2

- Бронников А. М.** Формализованный синтез нелинейных законов управления систем улучшения устойчивости и управляемости летательных аппаратов.
- Заведеев А. И., Архипов Р. А.** Возможные подходы к построению перспективных систем управления ориентацией космических аппаратов с помощью гиросиловых устройств.
- Митрофанов Д. Г., Слатин В. В., Грибков В. Ф., Овчинникова Т. В.** Сравнение методов получения радиолокационных изображений с использованием синтеза апертуры бортовой антенны РЛС.
- Соколов С. В., Щербань И. В., Куликов Ю. А.** Решение задачи управления наведением подвижного объекта на цель с априорно неопределенным подвижным центром на основе оптимального оценивания.

МЕХАТРОНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ. № 3

- Зубков А. Ф., Назарова Н. В., Колгушкина Г. С.** Моделирование интеллектуальной деятельности в системе медико-технического образования.
- Истомина Т. В., Козлова Н. В., Назарова Н. В.** Применение модели выпускника при профориентации студентов медико-технического профиля.
- Ковшов Е. Е., Мутина Е. И.** Повышение эффективности функционирования распределенной медицинской информационной системы на основе интеллектуального анализа информации.
- Козырев В. В., Новожилов А. И., Федотов О. В., Парин С. М.** Шарнирно-стержневая конструкция автоматизированного аппарата остеосинтеза и ее исследование.
- Копыльцов А. В., Сенкевич Ю. И., Крыленков Л. В., Альжасем Х. И.** Моделирование капиллярного кровотока с использованием алгоритма распределенных вычислений.
- Моисеев В. Б., Бурлюкина Е. В., Павлов А. Ю., Истомина Е. В.** Рынок медицинской техники (на примере КВЧ-аппарата "АИСТ").
- Филатов И. А., Розин А. В.** Портативный комплекс экспресс-диагностики смерти мозга.

СУДОВАЯ АВТОМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ И РЕЧНОМ ФЛОТЕ. № 4, 8

- Борейко А. А., Мун С. А., Щербатюк А. Ф.** Определение движения подводного аппарата на основе обработки видеозаписей. № 8.
- Давыденко А. А.** Управление экономическим развитием морских торговых портов региона. № 4.
- Дорожко В. М.** Оценка информационного признака начального этапа поворота морского судна. № 8.
- Жадобин Н. Е., Лебедев А. И.** Линейно-кольцевой магнитоупругий датчик упора и продольных колебаний валопроводов. № 4.
- Казунин Д. В., Матвеев С. К.** Численное моделирование нестационарного газового перехода сжиженного газа в танках газозавоза. № 4.
- Королев В. В., Жадобин Н. Е., Заставный С. В.** Многоканальная система контроля напряженного состояния корпуса судна. № 8.
- Лаврентьева Е. Л.** Алгоритм формирования финансовых резервов на ремонт основных средств в организациях водного транспорта. № 4.
- Модеев Р. Н.** Лоцманская проводка с берега: международный опыт реализации и существующая нормативная база. № 4.
- Тювин А. В., Афонин А. А., Черноморский А. И.** Оценка потенциальной точности морских векторных гравиметрических измерений. № 8.
- Ушаков В. В.** Применение нейронных сетей при оценке состояния подвижных объектов. № 4.

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. № 5, 9

- Брискин Е. С.** Об управлении походкой шагающей машины "Восьминог". № 5.
- Казаков А. В.** Динамическая манипулятивность станочного оборудования на основе манипуляторов параллельной структуры. № 5.
- Клевалин В. А., Поливанов А. Ю.** Цифровые методы распознавания в системах технического зрения промышленных роботов. № 5.
- Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Кадочников М. В., Востриков Г. С.** Использование генетических алгоритмов в задачах автоматического обучения и самоорганизации интеллектуальных робототехнических систем. № 9.
- Пашков Н. Н.** Аналитический синтез оптимальных траекторий программного движения многозвенного манипулятора. № 9.
- Попов А. В., Юревич Е. И.** Позиционно-силовое управление манипуляторами: состояние и перспективы. № 5.
- Филаретов В. Ф., Кацури А. А.** Метод полуавтоматического позиционного управления манипулятором с помощью телекамеры, изменяющей пространственную ориентацию своей оптической оси. № 9.
- Шоланов К. С., Кочетков А. А.** Определение числа и места расположения приводов в механизмах и манипуляторах. № 5.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ. № 6, 11

- Борисенко Ю. Г., Володина Л. А., Кербер О. Б.** Основные принципы формирования закона управления по каналам руля высоты и тяги в режиме "Уход на 2-й круг". № 6.
- Девятисильный А. С., Кислов Д. Е.** Исследование метода динамического обращения в задачах определения орбит с известным энергетическим уровнем. № 11.
- Заведеев А. И.** Исследование характеристик системы дистанционного зондирования Земли с помощью космического аппарата. № 6.
- Корсун О. Н.** Принципы параметрической идентификации математических моделей самолетов по данным летных испытаний. № 6.
- Крыжановский Г. А., Солодун В. А.** Проблемы моделирования и обратные задачи оптимизации процессов деятельности, профессиональной подготовки и повышения квалификации операторов авиатранспортных систем. № 11.
- Мазур В. Н., Цатурян К. Т.** Методы проверки адекватности математической модели возмущенного движения самолета. № 6.
- Сапунков Я. Г., Молоденков А. В.** Аналитическое исследование особого режима управления в задаче оптимального разворота космического аппарата. № 11.
- Сапунков Я. Г., Молоденков А. В.** Численное решение задачи оптимальной переориентации вращающегося космического аппарата. № 6.
- Филиппов Ю. И.** Виброустойчивость нестационарного упругого космического аппарата с прецизионной целевой аппаратурой. № 11.
- Черноморский А. И., Фещенко С. В.** Управление угловой ориентацией платформы одноосного колесного транспортного модуля оптической системы посадки летательного аппарата. № 11.

ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ. № 7

- Васюков С. А.** Дискретная коррекция в импульсных электростатических подвесах с ШИМ.
- Мусатов В. Ю., Сысоев В. В., Машенко А. А., Варежников А. С., Хризостомов А. А.** О возможности применения нейропроцессора для обработки отклика однокристалльной мультисенсорной микросистемы идентификации газов.
- Подчукаев В. А., Шевченко Д. С.** Автоматическое проектирование технической реализации законов управления на платформе программируемых аналоговых интегральных схем производства компании Anadigm.
- Румянцев Г. Н., Чебурахин И. Ф.** Автоматизация и оптимизация синтеза комбинационных автоматов.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВИОНИКИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ. № 10

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

Телухин С. В., Матвеев В. В. Беспилотный летательный аппарат как объект управления.

СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В ЗАДАЧАХ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ. № 12

- Бимаков В. А. Высокоскоростная обработка пиксельных моделей для решения задач управления автономным роботом.
- Богуславский А. А., Кирильченко А. А., Платонов А. К., Соколов С. М., Трифонов О. В., Ярошевский В. С. Построение описания внешней среды в системах информационного обеспечения мобильных робототехнических комплексов.
- Платонов А. К., Носков В. П. Навигационная точность зрительного канала робота.

CONTENTS

Filimonov A. B., Filimonov N. B. Concerning Nonrobustness of Parametric Identification Algorithms in Interference Conditions 2

The problems of parametric identification of linear dynamic models "input-output" are considered. As illustrated the encountered identification algorithms have not the robustness property which is necessary for practical use in interference conditions of the metering information.

Keywords: dynamic models "input — output", parametric identification, interference in dimension channel, the analysis of robustness identification algorithms.

Kirillov A. N. The Dynamic Control Systems Nonlinear Stabilization 6

The notion of conic stabilization permitting to solve the nonlinear systems stabilization problems with state and control restrictions is introduced. The finite time stabilization problem is considered. Its solution is obtained with the help of s-cone algorithm, which is also used for auto-oscillation point stabilization.

Keywords: stabilization, dynamic control system, cone, point stabilization, auto-oscillation.

Dorri M. Kh., Roschin A. A. The Software Tool for Developing Research Computer Complexes. 12

The software tool to built research desks that was developed in Institute of Control Sciences RAS is considered. Its structure and facilitates are described. The example of some research desk which was developed by means of this software tool is given.

Keywords: software tool, simulation, control systems, research desks.

Proshin I. A., Timakov V. M., Proshkin V. N. Development of Dynamic Test Stands for Hydraulically Driven Flight Training Systems 18

The techniques are considered for simulation of acceleration effects. A means of vertical overload control is suggested based on the results of the control law analysis. A hydraulic drive is suggested for platform weight compensation, its mathematical model is built, as well as the experimental and simulation results are presented for the system developed.

Keywords: flight training system, acceleration effect, hydraulic drive, dynamic test stand, overload simulator, control law.

Ivanov V. S., Moiseev V. L. Aspects of Improvement of the Attestation Methods for the Testing Equipment Used for Simulation of the Influencing Mechanical Factors. 23

In this article we review a set of issues of optimization of the nomenclature of the standardized precision characteristics of the testing equipment, "controlled" during periodic attestation, as well as methods and ways of their definition. We indicate the peculiarities of the metrological provision of measurement facilities, used for the attestation of the testing equipment.

Keywords: testing equipment, attestation, precision characteristics.

Guzairov M. B., Ilyasov B. G., Tagirova K. F., Ganeev A. R., Mezentsev E. F., Dodulad A. V. Optimal Control of Work Regime for Oil Well Group Based on Oil Field Section Simplified Model 27

The problem of oil field-production wells operating mode is being discussed, and taken into account their hydrodynamic interactions through oil reservoir in the conditions of absence full information about characteristic and properties of wells interaction. The mathematical model of system and ways of using it oil extraction increasing is offered. Make a results of experiments, that adopt efficiency of defined approach to the oilfield section modeling.

Keywords: oil reservoir, oil recovery, optimization, simulation, well, oilfield, mathematical model, control system, interaction, criterion, adequacy, limitations, gradient method.

Arapov D. V., Kuritsyn V. A. Optimization of a Temperature Mode of a Vertical Crystallizer in Sugar-Beet Manufacture 31

In connection with transition of a domestic sugar industry to crystallizers of vertical type the problem of optimization of a temperature mode of a vertical crystallizer is actual. In article the mathematical model of process of mass crystallization of sugar is submitted at cooling massecuite last product. Problems of a finding and realization of an optimum temperature mode of cooling massecuite in a vertical crystallizer are put and solved. The software package is developed, allowing to calculate an optimum mode of cooling massecuite in vertical crystallizers in sugar-beet manufacture.

Keywords: sygar-beet manufacture, vertical crystallizer, massecuite, mathematical model, optimization temperature mode.

Atroschenko O. I. *Stabilisation Problem Hidrolitosfere Processes by a Method Analytical Designing of the Aggregated Regulators* 37

Application of method AKAR for nonlinear object of management by level falls horizon in chinks of the Central site of the Kislovodsk deposit is considered; construction of transient, crossing of invariant varieties and the phase trajectories, operating influences.

Keywords: factors of a filtration, water-selection, decrease in dynamic levels, operational chink, control chink, the law of management, regulator, system of automatic control, downturn of a level, system of the differential equations, phase space, process of a filtration, decomposition of system, transitive process, operating influence.

Sytnik A. A., Shulga T. E., Papshev S. V. *Control of Behavior of Mechatronic Systems Based on Properties of Functional Redundancy* 41

One of approaches to control of behavior of complex discrete systems (among them mechatronic systems) is considered. Possibility behavior control of such systems is investigated provided that hardware duplication is absent (or is faulty) and direct modification of their behavior is impossible or inexpedient. In other words, control of behavior of these system on the basis of their functional redundancy is studied. A finite determined automaton is used as the mathematical model.

Keywords: control of behavior, functional redundancy, determined automaton, recreative sequence.

Ivanova A. S., Pirogov V. V., Polotovskij S. N. *Experience of Development and Application Computer Systems in Production Administration of Metal-Working Enterprises* 45

Here considered preconditions, purpose, and aim of creation computer systems in production administration of metal-working enterprises. Here given the description of the experience in development, application and industrial exploitation of integrated administration system, created for production of the group of companies "Majak".

Keywords: metal-working, integrated administration system, work stages, introduction experience, effectiveness.

Bimakov V. A. *High Speed Processing of Dot Models to Solve Problems of Control for Autonomous Robot* 50

The way to construct the control devices for autonomous robots is described. The way is based on advantages of dot method of geometric modeling to execute the scene procedures, which are most "problematic" from the standpoint of time for their performance, with deep parallelism.

Keywords: autonomous robot, problem of control, dot method of geometric modeling to execute, deep parallelism of the scene procedure.

Platonov A. K., Noskov V. P. *Navigation Accuracy of Robot Vision Tract* 50

This work deals with peculiarities of representation method for visual scene transforms in task of a mobile robot video and laser range meter system analysis. This method permits to avoid necessity to know parameters and localization of a video sensor. Analytical expression of coefficients of Lie transformations for the direct and inverse mapping "scene — cadre" (or "scene — scene", during die robot motion) are got as result of a solving of calibration equations. A calibration method and causes of bad accuracy of place localizations are under consideration.

Keywords: mobile robots, navigation, computer vision, image processing, projective transformations, video sensor calibration, accuracy of place localization.

Boguslavsky A. A., Kirilchenko A. A., Platonov A. K., Sokolov S. M., Trifonov O. V., Yaroshevsky V. S. *The Construction of an Environment Description in the Information Systems of the Mobile Robotics Complexes* 50

The problem of the surrounding space representation and the decision in it mobile robot navigational task is considered. The brief review of long-term experience of this problem decision in Keldysh Institute of applied mathematics of the Russian Academy of Science is made. As a methodical basis of construction of the mobile robots an environment effective description specially developed direction of qualitative navigation — interpreting navigation is offered. Use of the Vision system is emphasized. Results of theoretical researches, computer modeling and natural experiments are resulted. Working samples of hardware-software construction tools of mobile robots multipurpose information system are described.

Keywords: surrounding space representation, computer vision, real time vision system, the programming methods, interpreting navigation, mobile robots.

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4/1

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова*. Художник *В. Н. Погорелов*.
Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *З. В. Наумова*.

Сдано в набор 29.09.2008. Подписано в печать 11.11.2008. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,07. Заказ 1224. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02
Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15