

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 9 (90)

сентябрь

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 Н. Б., Деменков М. Н.** Дискретное упреждающее управление линейными динамическими объектами с параметрической полиэдральной неопределенностью . . . 2
Слита О. В., Ушаков А. В. Модальное управление: два способа реализации концепции подобия 7
Асанов А. З., Каримов В. С. Применение технологии вложения в задаче синтеза САУ для многосвязного объекта с запаздываниями по состоянию. 13

ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ

- Алпатов Б. А., Балашов О. Е., Степашкин А. И.** Повышение точности сопровождения объектов бортовой оптико-механической системой с двухосным карданным подвесом 20
Шендрик Д. А., Французова Г. А. Подход к комплексному моделированию управляемой системы стабилизации оптической линии визирования 24

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 29
Миронов Б. А., Филиппов С. И. Выбор метода определения надежности программных средств мехатронных систем 34

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ В МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЯХ

- Горбатенко Б. Б., Максимова Л. А., Резчиков А. Ф., Рябухо В. П.** Восстановление изображения объекта по записи распределения интенсивности дифракционного поля для контроля микроперемещений 39
Саханский С. П. Особенности определения формы фронта кристаллизации при выращивании монокристаллов германия 45

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Ермолов И. Л.** Иерархическое комплексирование данных в мобильной робототехнике . 48
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. 53
Пашков Н. Н. Аналитический синтез оптимальных траекторий программного движения многозвенного манипулятора 54
Филаретов В. Ф., Кацурин А. А. Метод полуавтоматического позиционного управления манипулятором с помощью телекамеры, изменяющей пространственную ориентацию своей оптической оси 54
Contents 54

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 62-501:004.3:681.51.03

Н. Б. Филимонов, канд. техн. наук, доц.,
МГУПИ, Москва,

М. Н. Деменков, PhD,

Де Монфортский ун-т, г. Лейстер, Великобритания

Дискретное упреждающее управление линейными динамическими объектами с параметрической полиэдральной неопределенностью

Обсуждается метод управления дискретными линейными динамическими объектами с параметрической полиэдральной неопределенностью. В основу метода положена идеология дискретного управления с многошаговым прогнозом и оптимизацией управления на скользящем интервале. Алгоритмизация метода сводится к построению полиэдральных областей управляемости и решению систем линейных неравенств методами линейного программирования.

Ключевые слова: линейный объект управления, полиэдральные параметрические возмущения, дискретное робастное управление, стратегия упреждающего управления.

Важнейшим направлением исследований в современной теории автоматического управления являются методы робастного управления, направленные на решение широкого спектра задач анализа и синтеза автоматических систем в условиях параметрической неопределенности, обусловленной как незнанием истинных значений параметров модели объекта управления, так и непредсказуемым изменением их во времени. При этом все чаще провозглашается лозунг Я. З. Цыпкина [1]: "Робастизировать все, что робастизируется, а что не робастизируется — сделать робастизируемым". Здесь термин "робастность", введенный в 1953 г. Боксом (G. E. P. Vox), подразумевает сохранение свойств устойчивости системы при вариациях ее параметров, причем в отечественной литературе в эквивалентном смысле часто используется термин "грубость".

К настоящему времени опубликовано большое число работ, посвященных вопросам робастного управления, включая известные отечественные и зарубежные монографии и учебные пособия [2—25]. Несмотря на высокую активность исследований и достигнутые результаты еще недавно Я. З. Цыпкин заметил, что "среди основных открытых проблем современной теории управления можно указать проблемы синтеза робастных систем".

Проблема робастного управления, несмотря на свою актуальность, не избежала и критической оцен-

ки ряда специалистов как одного из "новых модных направлений в современной математической теории управления, замыкающихся на интересах самой этой теории", результаты которого "мало понятны для инженеров и зачастую не находят практического применения". При этом А. А. Красовский, скептически оценивая практичность теории робастного управления, особо подчеркивал, что "робастность возможна лишь при наличии прогнозирования, экстраполяции, хотя бы на коротком скользящем интервале".

В работах авторов [26—31] был предложен новый подход к робастной стабилизации динамических объектов с параметрической неопределенностью, в основу которого положена идеология дискретной стратегии упреждающего управления, предложенная в [32] и получившая развитие в работе [33]. Публикация данного подхода в журнале "European Journal of Control" [29] вызвала дискуссию на страницах двух номеров журнала [30, 31], в которой приняли участие известные зарубежные специалисты в области упреждающего управления (Predictive Control): Коуваритакис (B. Kouvaritakis), Майцеховский (J. M. Maciejowski), Моска (E. Mosca) и Анжели (D. Angeli) (см., например, [34—36]). Кроме того, следует отметить, что в недавней публикации Моска (E. Mosca) [37] использование авторами переменного горизонта прогноза отмечено как весьма уникальный подход к упреждающему управлению.

В данной статье отражены основные результаты, полученные авторами в рамках предложенного подхода.

Объекты управления с полиэдральной параметрической неопределенностью

Полагаем, что динамика объекта управления, функционирующего в условиях параметрической неопределенности, описывается разностным уравнением вида

$$\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{F}_0\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}_0\mathbf{u}(t) + \sum_{j=1}^m [\mathbf{F}_j\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}_j\mathbf{u}(t)]p_j,$$

где $t \in \mathbb{Z}_+$; $\mathbf{x} \in \mathbb{X} = \mathbb{R}^n$; $\mathbf{u} \in \mathbb{U} \subset \mathbb{R}^r$; $\mathbf{F}_j \in \mathbb{R}^{n \times n}$; $\mathbf{G}_j \in \mathbb{R}^{n \times r}$; p_j — скалярные неопределенные параметры; $\mathbf{p} = \text{col}(p_1, p_2, \dots, p_m) \in \mathbf{P} \subset \mathbb{R}^m$.

Пусть область управления \mathbb{U} является параллелепипедом:

$$\mathbb{U} = \{\mathbf{u} \mid \underline{\mathbf{u}} \leq \mathbf{u} \leq \bar{\mathbf{u}}\},$$

где $\underline{\mathbf{u}}$ и $\bar{\mathbf{u}}$ — соответственно нижняя и верхняя границы изменения вектора управления, а область изменения неопределенных параметров \mathbf{P} является политопом (ограниченным полиэдром), за-

данным множеством своих вершин — векторов $w_i = \text{col}(w_i^{(1)}, \dots, w_i^{(m)}), i = \overline{1, q}$:

$$P = \text{conv}\{w_1, w_2, \dots, w_q\} = \left\{ p : p = \sum_{i=1}^q \lambda_i w_i; \lambda_i \geq 0, i = \overline{1, q}; \sum_{i=1}^q \lambda_i = 1 \right\}.$$

Поскольку любой вектор, принадлежащий полиэдру P , может быть представлен в виде выпуклой комбинации его вершин, то исходное уравнение объекта с помощью несложных преобразований можно привести к следующему эквивалентному виду:

$$x(t+1) = \sum_{i=1}^q \lambda_i [A_i x(t) + B_i u(t)]; \lambda_i \geq 0; \sum_{i=1}^q \lambda_i = 1, (1)$$

где $A_i = F_0 + \sum_{j=1}^m F_j w_i^{(j)}$; $B_i = G_0 + \sum_{j=1}^m G_j w_i^{(j)}$.

Сформируем вектор параметров $\lambda \in \mathbb{R}^q$:

$$\lambda = \text{col}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q)$$

и введем симплекс $\Lambda \subset \mathbb{R}^q$:

$$\Lambda = \left\{ \lambda : \lambda_i \geq 0, i = \overline{1, q}; \sum_{i=1}^q \lambda_i = 1 \right\}.$$

Тогда уравнение (1) можно записать в следующей "политопической форме":

$$x(t+1) = A(\lambda)x(t) + B(\lambda)u(t), \lambda \in \Lambda, (2)$$

где $A(\lambda) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ и $B(\lambda) \in \mathbb{R}^{n \times r}$ — функциональные

матрицы $A(\lambda) = \sum_{i=1}^q \lambda_i A_i$, $B(\lambda) = \sum_{i=1}^q \lambda_i B_i$, а λ и Λ играют роль соответственно вектора и множества воз-

можных параметрических возмущений.

Полиэдральная стратегия дискретного робастного упреждающего управления

Пусть состояние объекта $x^* = 0$ является целевым, и положим, что удаленность текущего состояния x от целевого x^* оценивается некоторой полиэдральной целевой функцией $Q(x)$, которая является мерой возмущения целевого состояния объекта.

Идея полиэдральной стратегии дискретного робастного упреждающего управления объектом (2) заключается в прогнозировании его движения $x(t)$ на τ шагов вперед с учетом действия неопределенных параметрических возмущений λ и нацеливании на множество его будущих состояний $x(t+\tau)$, экстремальных в смысле минимума целевой функции $Q(x)$ в пределах заданной глубины прогноза $T: \tau \in [1 : T]$. На каждом такте движение объекта направляется по кратчайшему пути к поверхности наименьшего (из всех возможных) уровня h целевой функции $Q(x)$, которая может быть гарантированно достигнута в ус-

ловиях параметрических возмущений не более чем за T тактов. Решение соответствующих оптимизационных задач основано на построении параметризованных полиэдральных областей управляемости и сводится к решению конечной системы линейных неравенств методом линейного программирования (ЛП).

Введем следующие дополнительные обозначения:

- $D(h)$ — полиэдральное множество, ограниченное уровнем h целевой функции $Q(x)$: $D(h) = \{x : Q(x) \leq h\}$, которое будем именовать целевым;
- $\Omega_\tau(h)$ — область τ -управляемости объекта относительно целевого множества $D(h)$, т. е. множество всех его состояний, которые могут быть переведены предложенной стратегией управления в целевое множество за τ тактов при любых параметрических возмущениях $\lambda \in \Lambda$, причем $\Omega_0(h) \equiv D(h)$;
- Ω — область гарантированной устойчивости объекта, т. е. некоторое подмножество его состояний, из которых объект может быть переведен в начало координат допустимым управлением при любых параметрических возмущениях $\lambda \in \Lambda$.

Очевидно, для множеств $\Omega_\tau(h), \tau = 0, 1, 2, \dots$, с учетом (1) справедливо рекуррентное соотношение

$$\Omega_{\tau+1}(h) = \{x(t) : \exists u(t) \in U, x(t+1) \in \Omega_\tau(h)\}, \tau \geq 0. (3)$$

В предлагаемой стратегии робастного управления ключевой процедурой является линейная h -параметризация областей τ -управляемости $\Omega_\tau(h)$, заключающаяся в нахождении их "внешних представлений" в виде системы конечного числа линейных неравенств относительно только лишь вектора состояния x и уровня целевой функции h , обоснование которой дает следующая теорема.

Теорема. Область τ -управляемости объекта $\Omega_\tau(h)$ может быть представлена в виде некоторого линейного векторного неравенства

$$\Omega_\tau(h) = \{x : M_\tau x + d_\tau h \leq l_\tau\}, (4)$$

где $M_\tau \in \mathbb{R}^{N \times n}$ и $d_\tau \in \mathbb{R}^{N \times 1}, l_\tau \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ — числовые матрица и векторы соответственно.

Доказательство. Прежде всего, заметим, что учет фактора неопределенности, обусловленного параметрическими возмущениями $\lambda \in \Lambda$, сводится к исследованию динамических процессов

$$x(t+1) = A_i x(t) + B_i u(t), i = \overline{1, q}, (5)$$

которые являются базовыми (крайними — по терминологии выпуклого анализа, или угловыми — по терминологии интервального анализа), поскольку любое движение параметрически возмущенного объекта является их выпуклой комбинацией.

Ясно, что для полиэдра $\Omega_0(h) = D(h)$ правомерна линейная h -параметризация, т. е. представление некоторым линейным векторным неравенством вида

$$M_0 x + d_0 h \leq l_0.$$

Для построения области управляемости $\Omega_1(h)$ согласно (3) следует в полученное неравенство под-

ставить выражения (5). В итоге получим систему линейных векторных неравенств

$$\mathbf{M}_0(\mathbf{A}_i \mathbf{x} + \mathbf{B}_i \mathbf{u}) + \mathbf{d}_0 h \leq \mathbf{l}_0, \quad i = \overline{1, q},$$

которая определяет некоторое полиэдральное множество $\tilde{\Xi}_1(\mathbf{u}) \subset \mathbb{R}^{n+1}$.

Множество

$$\Xi_1 = \bigcup_{\mathbf{u} \in \mathbb{U}} \tilde{\Xi}_1(\mathbf{u})$$

в силу полиэдральности области управления \mathbb{U} также является полиэдральным и поэтому может быть представлено линейным векторным неравенством вида

$$\mathbf{M}_1 \mathbf{x} + \mathbf{d}_1 h \leq \mathbf{l}_1.$$

Отсюда при фиксированном параметре h мы получаем область управляемости объекта $\Omega_1(h)$, структура которой согласуется с (4).

Далее методом математической индукции с использованием рекуррентных соотношений (3) аналогичным образом строятся области управляемости $\Omega_2(h), \Omega_3(h), \dots$.

Пусть в общем случае Ξ_τ — полиэдральное множество в пространстве переменных \mathbf{x} и h , соответствующее τ -му такту управления и определяемое системой линейных неравенств

$$\Xi_\tau = \{[\mathbf{x}, h]: \mathbf{M}_\tau \mathbf{x} + \mathbf{d}_\tau h \leq \mathbf{l}_\tau\}, \quad (6)$$

где $[\mathbf{x}, h]$ — вектор-столбец, являющийся объединением вектора \mathbf{x} и переменной h . Тогда h -параметризованная область τ -управляемости объекта $\Omega_\tau(h)$ может быть представлена через множество Ξ_τ следующим образом:

$$\Omega_\tau(h) = \{\mathbf{x}: [\mathbf{x}, h] \in \Xi_\tau\}.$$

Если данное представление для области τ -управляемости известно, то оно весьма просто может быть получено и для области $(\tau + 1)$ -управляемости. Действительно, согласно уравнению динамики объекта (1) его состояние на следующем такте $\mathbf{x}(t + 1)$ определяется состоянием на текущем такте $\mathbf{x}(t)$ как выпуклая комбинация q векторов $\mathbf{v}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t)$, $i = \overline{1, q}$. Заменяя в неравенствах (6), определяющих множество Ξ_τ , вектор \mathbf{x} на вектор \mathbf{v}_i для всех $i = \overline{1, q}$ и объединяя полученную систему неравенств с неравенствами, ограничивающими вектор управления \mathbf{u} , можно сформировать в пространстве переменных \mathbf{x}, \mathbf{u} и h полиэдральное множество $\tilde{\Xi}_{\tau+1}$, соответствующее $(\tau + 1)$ -му такту управления и определяемое некоторой конечной системой линейных векторных неравенств относительно векторов состояния \mathbf{x} , управления \mathbf{u} и уровня h :

$$\tilde{\Xi}_{\tau+1} = \{[\mathbf{x}, \mathbf{u}, h]: \mathbf{M}_\tau \mathbf{A}_i \mathbf{x} + \mathbf{M}_\tau \mathbf{B}_i \mathbf{u} \leq \mathbf{l}_\tau - \mathbf{d}_\tau h, \mathbf{u} \in \mathbb{U}, i = \overline{1, q}\}. \quad (7)$$

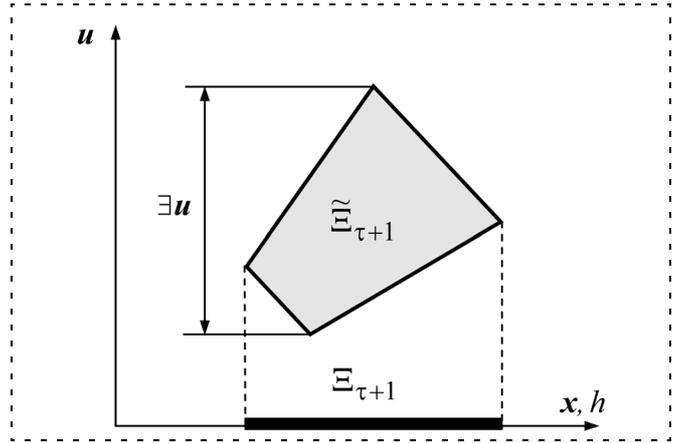


Рис. 1

Ясно, что множество $\Xi_{\tau+1}$ может быть представлено через множество $\tilde{\Xi}_{\tau+1}$ следующим образом:

$$\Xi_{\tau+1} = \{[\mathbf{x}, h]: \exists \mathbf{u}, [\mathbf{x}, \mathbf{u}, h] \in \tilde{\Xi}_{\tau+1}\}.$$

Проецируя [38, 39] теперь полиэдр $\tilde{\Xi}_{\tau+1}$, заданный линейными неравенствами в пространстве трех переменных \mathbf{x}, \mathbf{u} и h , на подпространство двух переменных \mathbf{x} и h (рис. 1), получаем требуемое представление области $(\tau + 1)$ -управляемости в виде системы линейных неравенств (6), так как проекция полиэдра также является полиэдром [39]. Заметим, что для получения проекции полиэдра $\tilde{\Xi}_{\tau+1}$ можно воспользоваться, например, методом Фурье—Моцкина для исключения векторной переменной \mathbf{u} из системы неравенств (7).

Отметим два важных свойства областей τ -управляемости $\Omega_\tau(h)$, вытекающих из теоремы:

- 1) полиэдральность;
- 2) линейная h -параметризованность.

В рассматриваемой задаче стабилизации полиэдральная стратегия дискретного робастного упреждающего управления сводится к следующему **трехэтапному алгоритму**, выполняемому на каждом такте управления.

На *первом этапе* решается экстремальная задача

$$h^* = \min\{h : \mathbf{x} \in \Omega_\tau(h), \tau \in [1: T]\}.$$

Здесь, фактически, определяется минимум целевой функции $Q(\mathbf{x})$, который может быть достигнут при движении управляемого объекта из состояния \mathbf{x} за заданное число шагов $\tau \leq T$. Данная задача сводится к семейству задач ЛП с целевой функцией в виде переменной h и системой ограничивающих неравенств (6) с фиксированным вектором \mathbf{x} :

$$h \rightarrow \min; \mathbf{M}_\tau \mathbf{x} + \mathbf{d}_\tau h \leq \mathbf{l}_\tau,$$

которые, в свою очередь, сводятся к задачам поиска пересечения отрезков по h и выбора наименьшей границы отрезка.

На *втором этапе* определяется минимальное число шагов, за которые объект может достигнуть целевое множество с уровнем h^* :

$$\tau^* = \min\{\tau : \mathbf{x} \in \Omega_\tau(h^*), \tau \in [1:T]\}.$$

Данное выражение сводится к простой проверке истинности неравенств

$$\mathbf{M}_\tau \mathbf{x} + \mathbf{d}_\tau h^* \leq \mathbf{l}_\tau$$

с известными \mathbf{x} и h^* и выбору минимального τ среди тех, для которых они являются истинными.

На *третьем этапе* определяется управление, обеспечивающее перевод состояния объекта в область $\Omega_{\tau^* - 1}(h^*)$:

$$\mathbf{u}(t) \in \mathbb{U} \Rightarrow \mathbf{x}(t + 1) \in \Omega_{\tau^* - 1}(h^*).$$

Здесь следует учесть, что условие попадания объекта в область $\Omega_{\tau^* - 1}(h^*)$ формализуется в виде системы неравенств (7), отвечающих значениям $\tau = \tau^* - 1$ и $h = h^*$. Однако данное условие допускает альтернативные управляющие воздействия на объект, из которых естественно выбирать единственное, оптимальное по некоторому, например, ресурсному критерию. В итоге искомое управление $\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}^*$ может быть найдено посредством решения задачи полиэдрального программирования [33] с целевой функцией в виде полиэдрального критерия энергетических затрат на управление.

В работе [29] на основе второго метода Ляпунова обоснована работоспособность описанной стратегии робастного управления, сформулированы условия и описана структура области гарантированной устойчивости:

$$\Omega = \bigcup_{\tau=1}^T \Omega_\tau(\bar{h}),$$

где скалярный параметр \bar{h} удовлетворяет условию

$$D(\bar{h}) \subseteq \beta \Omega_{\tau+1}(\bar{h}), \quad 0 < \beta < 1.$$

Все исходящие из области Ω фазовые траектории управляемого объекта (1) локализованы в ней при любых параметрических возмущениях $\lambda \in \Lambda$.

Особенности полиэдральной стратегии дискретного робастного упреждающего управления

В теории автоматического управления в зависимости от используемой информации различают два типа стратегий управления — программную и позиционную. В первых управление формируется как функция времени: $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t)$, во вторых — как функции от *позиции* $(t, \mathbf{x}(t))$: $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t, \mathbf{x}(t))$. В последнее время благодаря возросшим возможностям встраиваемых вычислительных средств все большее распространение получает третий, промежуточный тип стратегий управления — *программно-позиционные стратегии управления*, предложенные Дрейфузом (S. E. Dreyfus) в виде так называемых "размыкаемых обратных свя-

зей". Здесь управляющее воздействие формируется не в виде жесткой, а в виде гибкой, циклически обновляемой (в частности, на каждом такте), программы. На правомерность использования программной, т. е. разомкнутой, стратегии управления для реализации замкнутого управления по принципу обратной связи впервые указали Бертрам (J. E. Bertram) и Сарачик (P. E. Sarachik), а обоснование и применение данной стратегии в задачах дискретного управления получено в работах Н. Н. Красовского в виде принципа локальной эквивалентности позиционного и программного управлений [40, § 28]. Изложенный алгоритм дискретного робастного упреждающего управления реализует программно-позиционную стратегию управления. Согласно принятой классификации способов реализации процесса управления решение поставленной задачи полиэдральной оптимизации может быть ориентировано как на *предварительный алгоритмический синтез управления* (т. е. синтез на стадии проектирования автоматической системы), так и на *совмещенный алгоритмический синтез управления* (т. е. синтез непосредственно в процессе функционирования автоматической системы в реальном масштабе времени). Здесь алгоритмический синтез (по терминологии А. А. Колесникова), или алгоритмическое конструирование (по терминологии П. Д. Крутько), допускает, что решение задачи может быть не доведено до закона управления в форме функциональной зависимости управляющего воздействия объекта от его вектора состояния, а представлять собой совокупность алгоритмов, позволяющих в результате выполнения ряда взаимосвязанных вычислительных и/или численно-аналитических процедур с помощью соответствующих вычислительных устройств находить текущие значения управляющего воздействия. Совмещенный синтез как раз и обеспечивает реализацию в системе программно-позиционной стратегии управления, или так называемой *алгоритмической обратной связи* (по терминологии В. Н. Козлова [41, с. 72] и А. А. Первозванского [42, с. 490]).

Пример

Проиллюстрируем использование изложенной стратегии дискретного робастного упреждающего управления в задаче стабилизации объекта второго порядка с параметрической полиэдральной неопределенностью

$$\mathbf{x}(t + 1) = \mathbf{A}(p)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t),$$

где

$$\mathbf{A}(p(t)) = \begin{bmatrix} 1+p & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

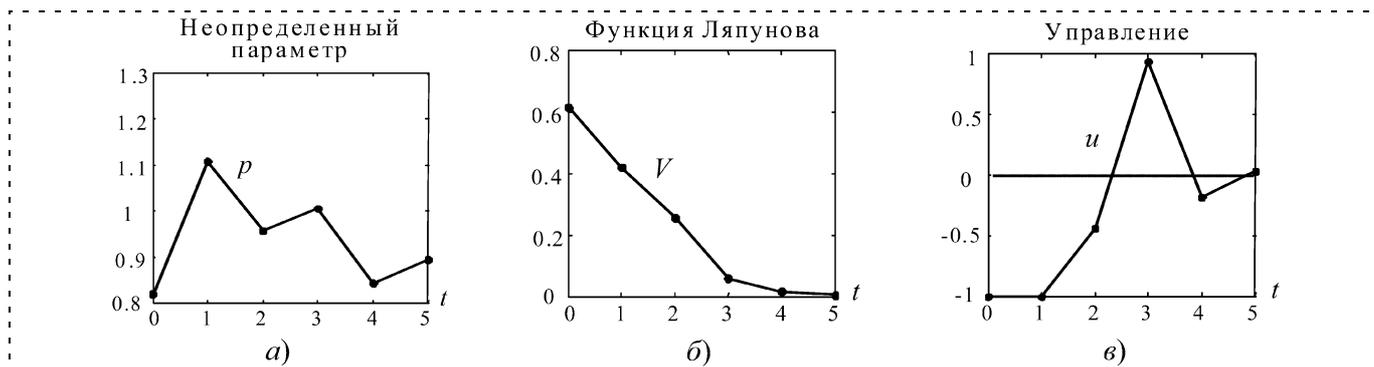


Рис. 2

Здесь управляющая переменная u и неопределенный параметр p , изменяющийся в по неизвестному закону, ограничены по модулю:

$$|u| \leq 1; |p| \leq 0,2.$$

Исходную модель объекта приводим к виду

$$x(t+1) = \lambda_1[A_1x(t) + B_1u(t)] + \lambda_2[A_2x(t) + B_2u(t)],$$

где

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0,8 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} 1,2 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; B_1 = B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$\lambda_1 \geq 0, \lambda_2 \geq 0, \lambda_1 + \lambda_2 = 1.$$

Зададим целевую функцию в следующей полиэдральной форме:

$$Q(x) = \max\{|x_1|, |x_2|\},$$

и установим глубину прогноза, равную $T = 3$.

Параметризованные области τ -управляемости $\Omega_\tau(\bar{h})$, $\tau = 1, 2, 3$, описываются системами линейных неравенств порядка 6, 16, 26 соответственно.

На рис. 2 и 3 представлены результаты цифрового моделирования управляемого движения объекта из

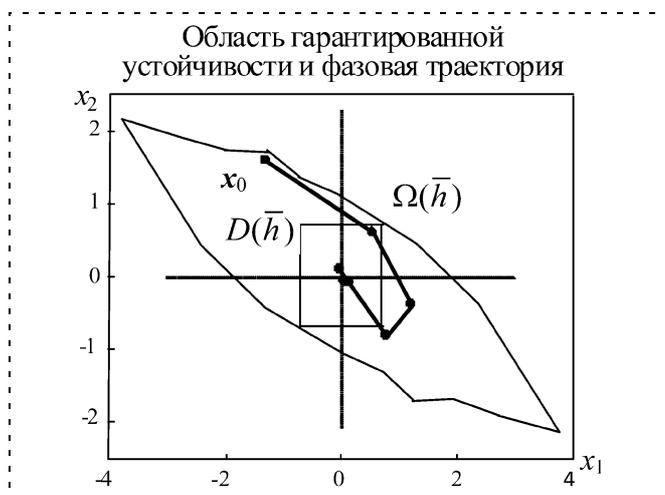


Рис. 3

начального $x_0 = (-1,33; 1,62)$ в целевое $x^* = (0; 0)$ состояние.

Здесь область гарантированной устойчивости Ω определяется следующим образом:

$$\Omega = \Omega_1(\bar{h}) \cup \Omega_2(\bar{h}) \cup \Omega_3(\bar{h});$$

$$D(\bar{h}) \subseteq \beta\Omega_3(\bar{h}); \bar{h} = 0,71; \beta = 0,97.$$

Список литературы

1. Цыпкин Я. З. Робастность в системах управления и обработки данных // Автоматика и телемеханика. 1992. № 1. С. 165—169.
2. Бесекецкий В. А., Небылов А. В. Робастные системы автоматического управления. М.: Наука, 1983. 240 с.
3. Шароватов В. Т. Обеспечение стабильности показателей качества автоматических систем. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 176 с.
4. Ходько С. Т. Проектирование систем управления с нестабильными параметрами. Л.: Машиностроение, 1987. 232 с.
5. Юсупбеков Н. Р., Цацкин М. Л. Робастность многосвязных систем управления. М.: Наука, 1990. 149 с.
6. Позняк А. С. Основы робастного управления (Н-теория). М.: МФТИ, 1991. 128 с.
7. Курдюков А. П. Основы робастного управления. М.: Изд-во МГТУ, 1995. 51 с.
8. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учеб. / Под ред. Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ, 2002. 744 с.
9. Поляк Б. Т., Щербаков П. С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002. 303 с.
10. Никифоров В. О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. СПб.: Наука, 2003. 282 с.
11. Ефимов Д. В. Робастное и адаптивное управление нелинейными колебаниями. СПб.: Наука, 2005. 314 с.
12. Morari M., Zafiriou E. Robust Process Control. N. J.: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1989.
13. Dorato P., Yedavalli (eds.). Recent Advances in Robust Control. N. Y.: IEEE Press, 1990.
14. Kwakernaak H. Robust Control. H_∞ -Optimization. University Twente, 1992.
15. Ackermann J. Robust Control, Systems with Uncertain Physical Parameters. Springer-Verlag, 1993.
16. Barmish B. R. New Tools for Robustness of Linear Systems. I. MacMillan, 1994.
17. Francis B. A., Khargonekar P. Robust Control Theory. N. Y.: Springer-Verlag, 1995.
18. Green M., Limebeer D. J. N. Linear Robust Control. Prentice Hall, 1995.
19. Chandrasekharan P. C. Robust Control of Linear Dynamical Systems. Academic Press, 1996.
20. Qu Z. Robust Control of Nonlinear Uncertain Systems. John Wiley & Sons, 1998.
21. Sánchez-Peña R. S., Szaiaer M. Robust Systems Theory and Applications. Wiley, Hardcover, 1998.

22. Dullerud G. E., Paganini F. A Course in Robust Control. Springer-Verlag, Berlin, 1999.
23. Zhou K., Doyle J., Glover K. Robust and Optimal Control. Upper Saddle River, N. J.: Prentice Hall, 1996.
24. Svensson L. E. Robust Control Made Simple. Working paper. Princeton University, 2001.
25. Turner M. C., Bates D. G. (eds.). Mathematical Methods for Robust and Nonlinear Control. EPSRC Summer School. Series: Lecture Notes in Control and Information Sciences. V. 367. 2007. 444 p.
26. Деменков М. Н. Прогнозирующее дискретное регулирование объектов с параметрическими неопределенностями // Тр. Третьего Междунар. симп. "Интеллектуальные системы". 1998. С. 178—180.
27. Филимонов Н. Б., Деменков М. Н., Кишалов П. А. Дискретное регулирование технических объектов методом прогнозируемого наискорейшего спуска // Приборы и системы управления. 1998. № 3. С. 10—12.
28. Деменков Н. П., Филимонов Н. Б. Одношаговые и многошаговые алгоритмы дискретной стабилизации объектов с параметрической неопределенностью // Проблемы эксплуатации и совершенствования авиационной техники и систем воздушного транспорта: Сб. науч. тр. асп. и мол. учен. Т. 3. СПб.: Академия ГА, 1997—1998. С. 44—48.
29. Demenkov M. N., Filimonov N. B. Variable Horizon Robust Predictive Control via Adjustable Controllability Sets // European Journal of Control. 2001. V. 7. № 6. P. 596—604.
30. Maciejowski J., Casavola A., Mosca E., Angeli D., Demenkov M. N., Filimonov N. B. Discussion on "Variable Horizon Robust Predictive Control via Adjustable Controllability Sets" by M. N. Demenkov and N. B. Filimonov // European Journal of Control. 2001. V. 7. № 6. P. 605—608.
31. Demenkov M. N., Filimonov N. B. The Author's Answer to the Letter to the Editor on the Paper "Variable Horizon Robust Predictive Control via Adjustable Controllability Sets" by M.N. Demenkov and N.B. Filimonov // European Journal of Control. 2002. V. 8. № 1. P. 90—94.
32. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Дискретное регулирование линейных объектов методом наискорейшего спуска // Современные технологии в задачах управления и обработки информации: Тр. междунар. науч.-техн. семина. М.: МАИ, 1997. С. 96—98.
33. Филимонов Н. Б. Методы полиэдрального программирования в дискретных задачах управления и наблюдения / Методы классической и современной теории автоматического управления. Учеб.: В 5 т. Т. 5. Методы современной теории автоматического управления. Гл. 7. М.: Изд-во МГТУ, 2004. С. 647—720.
34. Kouvaritakis B., Cannon M. (eds.). Nonlinear Predictive Control Theory and Practice // IEEE Control series, V. 61. IEEE, 2001. 261 p.
35. Mosca E. Optimal, Predictive and Adaptive Control. Englewood Cliffs, NJ: PrenticeHall, 1995.
36. Maciejowski J. Predictive control with Constraints. Prentice-Hall, 2001. 352 p.
37. Mosca E. Predictive Switching Supervisory Control of Persistently Disturbed input-Saturated Plants // Automatica. 2005. V. 41. № 1. P. 55—67.
38. Лотов А. В., Бушенков В. А., Каменев Г. К., Черных О. Л. Компьютер и поиск компромисса. Метод достижимых целей. М.: Наука, 1997. 239 с.
39. Ziegler G. M. Lectures on Polytopes. V. 152 of Graduate Texts in Mathematics. Springer-Verlag, New York, 1995. 370 p.
40. Красовский Н. Н. Теория управления движением. М.: Наука, 1968. 476 с.
41. Козлов В. Н., Куприянов В. Е., Заборовский В. С. Вычислительные методы синтеза систем автоматического управления. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1989. 224 с.
42. Первозванский А. А. Курс теории автоматического управления. М.: Наука, 1986. 616 с.

УДК 62-50

О. В. Слита, канд. техн. наук, доц.,

Балтийский государственный университет

"Военмех" им. Д. Ф. Устинова,

А. В. Ушаков, д-р техн. наук, проф.,

Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики

Модальное управление: два способа реализации концепции подобия

Рассматриваются два способа реализации концепции подобия при решении задачи модального управления: прямое модальное управление и модальное управление средствами обратной связи. Предлагаются методы оценки затрат на управление и исследования чувствительности систем с помощью прямого модального управления, а также алгоритм синтеза систем с заданными показателями качества с использованием модального управления средствами обратной связи.

Ключевые слова: модальное управление, концепция подобия, прямое модальное управление, модальное управление средствами обратной связи

При решении задач управления под концепцией подобия [1] понимают обеспечение подобия вектор-

ных процессов, в основном по состоянию, проектируемой системы процессам в некоторой модельной системе, обладающей желаемыми динамическими свойствами в переходном и установившемся режимах. В непараметризованной временем форме концепция векторного подобия сводится к выполнению соотношения

$$\kappa = M\chi, \quad (1)$$

где в общем случае размерности векторов κ и χ в зависимости от постановки задачи управления могут не совпадать, поэтому матрица преобразования подобия M в общем случае может быть особой.

В параметризованном временем виде равенство (1) достигается в асимптотике так, что

$$\kappa(v) = M\chi(v) - \theta(v), \quad (2)$$

при этом

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \theta(v) = 0 \quad \forall \chi(0), \kappa(0). \quad (3)$$

В (2) χ — вектор состояния некоторого модельного (эталонного) динамического процесса; κ — вектор состояния синтезируемой динамической системы; $\dim \kappa = n_\kappa$; $\dim \chi = n_\chi$; M — $(n_\kappa \times n_\chi)$ -мерная матрица в общем случае особого преобразования по-

добия; v принимает смысл непрерывного времени t ($v = t$) в *непрерывных* по времени процессах и смысл дискретного времени k ($v = k$), выраженного в числе интервалов дискретности длительности Δt так, что $t = k\Delta t$ в *дискретных* по времени процессах; θ — вектор невязки выполнения векторно-матричного подобия.

Тогда, если динамический процесс (объект) оказывается управляемым, то часть ресурса управления должна быть потрачена на обеспечение подобия в форме (2) с требуемым темпом и качеством сходимости к подобию в форме (1).

В такой постановке в настоящее время решаются задачи модального управления (МУ), задачи слежения за конечномерным задающим воздействием (КЗВ), использующие концепцию обобщенного изодрома (внутренней модели КЗВ), а также задачи динамического наблюдения в целях асимптотического восстановления вектора состояния объекта управления.

Данная статья посвящена решению задачи синтеза модального управления, причем рассматривается два вида МУ — *прямое* модальное управление и модальное управление *средствами обратной связи*.

В первоначальной постановке [2—4] в 70-е годы прошлого века задача МУ формулировалась как задача синтеза закона управления, обеспечивающего матрице F состояния системы, образованной объединением исходного динамического объекта и формирователя сигнала управления (регулятора), желаемую структуру собственных значений (мод) $\sigma\{F\} = \{\lambda_i, i = \overline{1, n}\}$.

Алгоритмически задача обеспечения требуемой структуры собственных значений матрицы состояния проектируемой системы, доставляющей последней желаемое качество переходных и установившихся процессов, решалась путем приведения модельного представления объекта управления (ОУ) к базису Фробениуса. Сложности синтеза МУ таким способом заметно возрастают при управлении объектами типа "многомерный вход — многомерный выход" (МВМВ-типа). Для преодоления этих трудностей разработчиками использовались достаточно громоздкие [5] конструкции матриц приведения ОУ МВМВ-типа к представлению в базисе Фробениуса. Однако с ростом размерности ОУ заметно ухудшается обусловленность матриц приведения подобия, что влечет за собой проблемы вычислительной устойчивости.

Поиск методов синтеза модального управления, инвариантных относительно базисных представлений, привел к модификации первичной постановки задачи, которая стала формулироваться следующим образом: обеспечение векторного и матричного подобия процессов в синтезируемой системе процессам в некоторой эталонной системе, именуемой модальной моделью. В такой постановке алгоритмическое

обеспечение процедуры синтеза модального управления опирается на решение неоднородного матричного уравнения Сильвестра [6, 7].

Прямое модальное управление

При решении задачи модального управления используются условия векторного подобия, характеризующиеся размерностями векторно-матричных компонентов, удовлетворяющими соотношениям

$$n_\kappa = n_\chi = n, \dim M = (n \times n). \quad (4)$$

Рассмотрим задачу управления линейным непрерывным динамическим объектом

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), x(t)|_{t=0} = x(0), y = Cx, \quad (5)$$

в котором $x \in R^n$, $u \in R^r$, $y \in R^m$ — векторы состояния, управления и выхода, $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times r}$, $C \in R^{m \times n}$ — матрицы состояния, управления и выхода.

Определение 1. Модальной моделью (ММ) будем называть автономную динамическую систему

$$\dot{z}(t) = \Gamma z(t); z(t)|_{t=0} = z(0); \eta(t) = Hz(t) \quad (6)$$

с векторами состояния и выхода $z \in R^n$ и $\eta \in R^r$, матрицами состояния и выхода $\Gamma \in R^{n \times n}$ и $H \in R^{r \times n}$, характеризующуюся:

- алгебраическим спектром собственных значений $\sigma\{\Gamma\} = \{\lambda_i : \det(\lambda I - \Gamma) = 0; i = \overline{1, n}\}$ матрицы Γ . Обеспечением данного спектра матрицы состояния проектируемой системы можно доставить последней желаемые динамические свойства в переходном и установившемся режимах;
- отсутствием совпадающих собственных значений матриц Γ и A , т. е. выполнением условия $\sigma\{\Gamma\} \cap \sigma\{A\} = \emptyset$;
- полной наблюдаемостью пары матриц (Γ, H) .

Определение 2. Прямым модальным управлением (ПМУ) называется управление динамическим объектом (5), осуществляемое в форме

$$u(t) = -Hz(t), \quad (7)$$

т. е. в виде прямой связи с матрицей H по вектору состояния ММ.

Поставим задачу поиска условий, накладываемых на начальные состояния объекта (5) и ММ (6) и их матричные компоненты, при которых достигается векторное подобие процессов $x(t)$ и $z(t)$ в форме

$$x(t) = Mz(t), \forall t \geq 0. \quad (8)$$

Для решения поставленной задачи введем в рассмотрение агрегированную динамическую систему с вектором состояния $\tilde{x} = [x^T, z^T]^T$, которая на ос-

новании (5)–(7) имеет векторно-матричное описание вида

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ax(t) - BH z(t) \\ 0x(t) + \Gamma z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - BH & \\ 0 & \Gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \\ &= \tilde{A} \tilde{x}(t); \tilde{x}(0) = \begin{bmatrix} x(0) \\ z(0) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

Нетрудно видеть, что решение системы (9) записывается как

$$\tilde{x}(t) = e^{\tilde{A}t} \tilde{x}(0), \quad x(t) = \tilde{C}_x \tilde{x}(t), \quad (10)$$

где матрицы \tilde{A} и \tilde{C}_x принимают форму

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A - BH & \\ 0 & \Gamma \end{bmatrix}, \quad \tilde{C}_x = [I_n \times n \quad 0_n \times n] \quad (11)$$

в силу (9) и соотношения $x = Ix + 0z = [I_n \times n \quad 0_n \times n] \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} =$

$= \tilde{C}_x \tilde{x}$. В целях упрощения вычисления матричной экспоненты $e^{\tilde{A}t}$ с матрицей \tilde{A} вида (11) докажем следующее утверждение.

Утверждение 1. Если невырожденная матрица M векторного преобразования подобия (8) удовлетворяет матричному уравнению Сильвестра

$$M\Gamma - AM = -BH, \quad (12)$$

то матричная экспонента $e^{\tilde{A}t}$ имеет представление

$$e^{\tilde{A}t} = \begin{bmatrix} e^{At} & Me^{\Gamma t} - e^{At}M \\ 0 & e^{\Gamma t} \end{bmatrix}. \quad \square (13)$$

Доказательство. Матричное уравнение Сильвестра (12) позволяет записать матрицу \tilde{A} вида (11) в форме

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A & M\Gamma - AM \\ 0 & \Gamma \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Тогда простым перемножением $\tilde{A}^2 = \tilde{A} \tilde{A}$, $\tilde{A}^3 = \tilde{A}^2 \tilde{A}$, ... $\tilde{A}^p = \tilde{A}^{(p-1)} \tilde{A}$ получим для степенной функции \tilde{A}^p , где \tilde{A} имеет вид (14), представление

$$\tilde{A}^p = \begin{bmatrix} A^p & M\Gamma^p - A^p M \\ 0 & \Gamma^p \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Так как матричная экспонента построена на степенных матричных функциях \tilde{A}^p от матрицы вида (14), то матричная функция $e^{\tilde{A}t}$ от матрицы \tilde{A} представима в форме (13).

Получим теперь аналитические выражения для $z(t) = z(t, z(0))$ и $x(t)$ под действием ПМУ (7) $x(t) = x\{t, x(0), u(t) = -Hz(t, z(0))\} = x\{t, x(0), z(0)\}$. Для этих целей воспользуемся (10), в которое подставим (13). Тогда

$$\tilde{x}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{At} & Me^{\Gamma t} - e^{At}M \\ 0 & e^{\Gamma t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(0) \\ z(0) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Полученное векторно-матричное соотношение позволяет для $x(t)$ и $z(t)$ записать

$$\begin{aligned} x(t) &= e^{At}x(0) + (Me^{\Gamma t} - e^{At}M)z(0) = \\ &= e^{At}(x(0) - Mz(0)) + Me^{\Gamma t}z(0); \end{aligned} \quad (17)$$

$$z(t) = e^{\Gamma t}z(0). \quad (18)$$

Если в выражении (17) обеспечить выполнение соотношения

$$z(0) = M^{-1}x(0), \quad (19)$$

приводящего к справедливости выражения

$$x(0) - Mz(0) = x(0) - MM^{-1}x(0) = x(0) - x(0) = 0, \quad (20)$$

то на основании (17), (20) и (18) можно сделать вывод, что ПМУ доставляет задаче векторное подобие в форме

$$x(t) = Mz(t) \text{ для } \forall t \geq 0. \quad (21)$$

При этом динамика процессов в управляемом ПМУ динамическом объекте (5) будет полностью определяться структурой собственных значений матрицы состояния ГММ (6) в силу аналитического представления

$$x(t) = Mz(t) = Me^{\Gamma t}M^{-1}x(0). \quad (22)$$

Формирователь сигнала $u(t)$ ПМУ в форме (7) будет содержать:

- 1) динамический структурный компонент в виде ММ (6) так, что ММ становится аппаратной, а не алгоритмической частью системы;
- 2) устройство измерения вектора $x(0)$ начального состояния объекта;
- 3) статический структурный элемент в виде матрицы M^{-1} , реализующий управление начальным состоянием ММ в форме $z(0) = M^{-1}x(0)$;
- 4) статический структурный элемент, обеспечивающий выполнение условия $u(t) = -\eta(t)$.

В качестве недостатка ПМУ следует отметить, что такое управление не обладает робастностью относительно неточности знания параметров матричных компонентов, погрешностей решения матричного

уравнения Сильвестра (12) и процедуры обращения матрицы M . В итоге эти факторы сказываются в невыполнении условия $x(0) - Mz(0) = 0$, что в случае неустойчивого исходного объекта (5) приводит к расходимости процессов в системе с ПМУ.

Тем не менее, система с ПМУ является хорошей модельной средой для оценки потенциальных затрат на управление как функции выбранной пары матриц (Γ, H) . Действительно, для управления вида (7) можно записать

$$u(t) = -Hz(t) = -He^{\Gamma t}z(0),$$

что, в свою очередь, для нормы $u(t)$ как элемента функционального пространства L^2_T , где $T = [0, \infty)$,

дает представление $\|u(t)\|^2 = z^T(0) \int_0^\infty e^{\Gamma^T t} H^T H e^{\Gamma t} dt z(0) = z^T(0) W_U z(0)$, в котором грамиан затрат на управление [8] W_U ищется как решение матричного уравнения Ляпунова

$$\Gamma^T W_U + W_U \Gamma = -H^T H. \quad (23)$$

Затраты на управление в форме нормы $\|u(t)\|$ удовлетворяют оценочным неравенствам

$$\alpha_{\min}^{1/2} \{W_U\} \|z(0)\| \leq \|u(t)\| \leq \alpha_{\max}^{1/2} \{W_U\} \|z(0)\|. \quad (24)$$

Таким образом, при фиксированной норме $\|z(0)\|$ вектора начального состояния ММ максимальные затраты в силу (24) определяются максимальным сингулярным числом $\alpha_{\max}\{W_U\}$, а минимальные — минимальным $\alpha_{\min}\{W_U\}$ грамиана W_U затрат на управление. Полученные соотношения позволяют найти оптимальную в смысле минимальных затрат на управление пару матриц (Γ, H) ММ путем решения оптимизационной задачи

$$(\Gamma, H) = \arg \min_{(\Gamma, H)} \{\alpha_{\max}\{W_U(\Gamma, H)\}\},$$

где \arg — аргумент выполнения условия минимизации $\alpha_{\max}\{W_U\}$.

Вторым положительным модельным качеством системы с ПМУ является возможность ранжирования параметрических неопределенностей матричных компонентов задачи с помощью исследования чувствительности к ним траекторий.

Модальное управление средствами обратной связи

Поставим задачу синтезировать закон управления динамическим объектом (5), сигнал которого $u(t)$ функционально был бы связан не с вектором $z(t)$ состояния ММ, а с вектором состояния $x(t)$ динамического объекта (ДО), иными словами, не с по-

мощью отрицательной прямой связи по вектору $z(t)$, а с помощью отрицательной обратной связи по вектору $x(t)$ с матрицей обратной связи K :

$$u(t) = u\{t, x(t)\} = -Kx(t). \quad (25)$$

Если управление (25) подставить в векторно-матричное описание (5), то получим модельное представление динамической системы, образованной исходным ДО и обратной связью с матрицей K , имеющее вид

$$\dot{x}(t) = Fx(t), \quad x(t)|_{t=0} = x(0), \quad y = Cx, \quad (26)$$

где $F = A - BK$.

От матрицы K требуется, чтобы выполнялось векторное подобие в форме (21), и совпадали алгебраические спектры собственных значений матрицы F состояния системы (26) и матрицы Γ состояния ММ (6) так, что $\sigma\{F\} = \sigma\{\Gamma\}$.

Для построения алгоритма вычисления матрицы K воспользуемся результатами предыдущего раздела. Введем "рабочую гипотезу" о том, что управление в форме (25) обеспечивает выполнение векторного подобия $x(t) = Mz(t)$, $\forall t \geq 0$, тогда становится справедливой альтернативная запись $z(t) = M^{-1}x(t)$, $\forall t \geq 0$, которая позволяет переписать соотношение (7) в форме

$$u(t) = -Hz(t) = -HM^{-1}x(t). \quad (27)$$

Введем обозначение

$$HM^{-1} = K. \quad (28)$$

Проверим, решает ли сформулированные задачи сигнал управления (25), реализуемый в виде обратной связи с матрицей K вида (28). Для этого запишем (28) в разрешенной относительно матрицы H форме

$$H = KM. \quad (29)$$

Подставим матрицу H вида (29) в правую часть матричного уравнения Сильвестра (12), тогда получим

$$M\Gamma - AM = -BKM. \quad (30)$$

Матричное уравнение (30) с введенным ранее обозначением $F = A - BK$ приводит к матричному условию подобия матриц Γ и F

$$M\Gamma = FM. \quad (31)$$

В силу того, что алгебраические спектры собственных значений подобных матриц совпадают, т. е. выполняется равенство $\sigma\{\Gamma\} = \sigma\{F\}$, то модальное управление, реализуемое средствами отрицательной обратной связи с матрицей K , вычисляемой в форме (2), решает задачу обеспечения матричного подобия [9].

Теперь покажем, что модальное управление в форме (27), (28) решает задачу обеспечения векторного подобию (21).

Утверждение 2. Матричное подобие в форме (31) порождает векторное подобие в форме (21), в котором вектор z является вектором состояния автономной системы с матрицей состояния Γ , а вектор x — вектором состояния автономной системы с матрицей состояния F .

Доказательство. Используем свойство матричной функции $f\{(*)\}$ от матрицы $(*)$ сохранять матричное подобие вида (31). Тогда оказывается справедливая запись

$$Mf(\Gamma) = f(F)M. \quad (32)$$

В качестве матричной функции $f\{(*)\}$ от матрицы $(*)$ воспользуемся матричной экспонентой, параметризованной временем так, что $f\{(*)\} = e^{(*)t}$. Тогда (32) принимает вид

$$Me^{\Gamma t} = e^{Ft}M. \quad (33)$$

Умножив матричное соотношение (33) на вектор $z(0)$ справа, получим векторно-матричное соотношение

$$Me^{\Gamma t}z(0) = e^{Ft}Mz(0), \quad (34)$$

которое состоит из двух цепочек векторно-матричных равенств, одна из которых, находящаяся в левой части (34), принимает вид

$$Me^{\Gamma t}z(0) = Mz(t). \quad (35)$$

Цепочка векторно-матричных равенств в правой части (34) имеет представление

$$e^{Ft}Mz(0) = e^{Ft}x(0) = x(t). \quad (36)$$

Следовательно, доказано, что МУ в форме отрицательной обратной связи по вектору состояния исходного технического объекта с матрицей K , формируемой в силу (28), доставляет образованной системе при условии согласования начальных состояний в форме $z(0) = M^{-1}x(0)$ векторное подобие ее текущего состояния состоянию модальной модели в форме $x(t) = Mz(t)$ для $\forall t \geq 0$.

Таким образом, создана алгоритмическая основа для синтеза модального управления, реализуемого в виде отрицательной обратной связи по состоянию исходного непрерывного объекта (5). Необходимо отметить, что модальное управление использует только часть ресурса управления. Оставшаяся составляющая этого ресурса расходуется на организацию вынужденного движения в системе с тем, чтобы выход системы $y(t)$ воспроизводил внешнее задающее воздействие $g(t)$ с ошибкой $\varepsilon(t)$ допустимой нормы. В соответствии с высказанными соображениями приводимый ниже алгоритм формирует управление $u(t)$ в форме $u(t) = u\{t, x(t), g(t)\}$.

Алгоритм

1. Сформировать векторно-матричное описание исходного непрерывного динамического объекта (5) так, чтобы пара матриц $\{A, B\}$ была управляемой, а пара матриц $\{A, C\}$ — наблюдаемой.

2. Сформировать векторно-матричное описание модальной модели (6) так, чтобы пара матриц $\{\Gamma, H\}$ была наблюдаемой; $\dim \Gamma = \dim A$, $\dim H = \dim B^T$; матрицу Γ задать в одном из канонических базисов из условия $\Gamma = \arg \min_{\Gamma} (C\{\Gamma\})$ [8], где \arg является аргументом выполнения условия минимизации числа $C\{\Gamma\}$ обусловленности матрицы Γ (минимизация $C\{\Gamma\}$ гарантирует вычислительную устойчивость решения уравнения Сильвестра (12)); матрицу H при выбранной матрице Γ выбрать из условия $H = \arg \{ \arg \{ \text{observ}(\Gamma, H) \} \& \arg \min_H \{ \alpha_{\max} \{ W_U(\Gamma, H) \} \} \}$. (37)

3. Сформировать алгебраический спектр $\sigma\{A\}$ собственных значений матрицы A : $\sigma\{A\} = \{\lambda_{Ai} : D_A(\lambda) = \det(\lambda_A I - A) = 0; i = \overline{1, n}\}$ и алгебраический спектр $\sigma\{\Gamma\}$ собственных значений матрицы Γ : $\sigma\{\Gamma\} = \{\lambda_i : D(\lambda) = \det(\lambda I - \Gamma) = 0; i = \overline{1, n}\}$. Проверить сформированные спектры на наличие одинаковых элементов: в случае их отсутствия перейти к п. 4 алгоритма, в случае наличия — к п. 2 для модификации матрицы Γ в рамках наблюдаемых пар $\{\Gamma, H\}$ с тем, чтобы обеспечить условие $\sigma\{\Gamma\} \cap \sigma\{A\} = \emptyset$.

4. Ввести "рабочую гипотезу" о полной измеримости вектора задающего внешнего воздействия $g(t)$ и вектора состояния $x(t)$ исходного объекта (5) с тем, чтобы поставить задачу формирования сигнала управления объектом в форме

$$u(t) = u\{t, x(t), g(t)\} = K_g g(t) - Kx(t). \quad (38)$$

5. Решить матричное уравнение Сильвестра (12) $M\Gamma - AM = -BH$ относительно матрицы M .

6. Вычислить матрицу K отрицательной обратной связи по вектору $x(t)$ объекта в силу соотношения (28) $K = HM^{-1}$.

7. Подставить управление вида (38) в модель объекта (5) в целях получения векторно-матричного описания системы, образованного объединением исходного объекта и формирователя сигнала управления (38)

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + Gg(t), x(t)|_{t=0} = x(0); y(t) = Cx(t); \varepsilon(t) = g(t) - y(t); \quad (39)$$

$$F = A - BK; G = BK_g. \quad (40)$$

8. Сформировать передаточную матрицу $\Phi(s)$ отношения "вход—выход" системы (39): $\Phi(s) = C(sI - F)^{-1}G = C(sI - F)^{-1}BK_g$.

9. Вычислить матрицу K_g прямой связи по задающему воздействию $g(t)$ из условия равенства выхода

входу $y(t) = g(t)$ в неподвижном положении ($g(t) = g_0 = \text{const}$), которое достигается при условии $\Phi(0) = I$:

$$K_g = \arg\{C(sI - F)^{-1}|_{s=0}BK_g = C(-F)^{-1}BK_g = I\} = -(CF^{-1}B)^{-1}. \quad (41)$$

10. Отказаться от нереалистической гипотезы об измеримости задающего воздействия $g(t)$ и заменить ее реалистической гипотезой об измеримости вектора ошибки $\varepsilon(t)$ для представления сигнала управления (40) в форме

$$u(t) = u\{t, \varepsilon(t), x(t)\} = K_\varepsilon \varepsilon(t) - K_x x(t) = K_\varepsilon g(t) - K_\varepsilon y(t) - K_x x(t) = K_\varepsilon g(t) - K_\varepsilon Cx(t) - K_x x(t) = K_\varepsilon g(t) - (K_\varepsilon C + K_x)x(t) = K_g g(t) - Kx(t), \quad (42)$$

где

$$K_\varepsilon = K_g = -(CF^{-1}B)^{-1}; \\ K_x = K - K_\varepsilon C = HM^{-1} + (CF^{-1}B)^{-1}C. \quad (43)$$

11. Если гипотеза о полной измеримости вектора $x(t)$ состояния динамического объекта сохраняется, то построить формирователь сигнала управления, реализующего его аналитическое представление в форме

$$u(t) = u\{t, \varepsilon(t), x(t)\} = K_\varepsilon \varepsilon(t) - K_x x(t) \quad (44)$$

и агрегировать его с объектом, образуя тем самым систему, которая характеризуется наличием:

- контура единичной отрицательной обратной связи по выходу $y(t)$ объекта в канале формирования вектора ошибки в силу соотношения $\varepsilon(t) = g(t) - y(t)$;
- контура отрицательной обратной связи по вектору состояния $x(t)$ с матрицей связей K_x ;
- прямой связи в канале ошибки с матрицей прямых связей K_ε .

Если гипотеза о полной измеримости вектора $x(t)$ состояния динамического объекта не выполняется, то следует спроектировать динамический наблюдатель вектора $x(t)$ состояния ОУ и агрегировать его с алгоритмом (44) формирования сигнала управления.

Примечание. Следует отметить, что уравнение Сильвестра $M\Gamma - A M = -BH$ может быть решено инверсным способом, при котором матрица M конструируется вне уравнения Сильвестра, а уравнение Сильвестра с известной матрицей M решается относительно матрицы H модальной модели.

Пример

Рассмотрим ОУ, состоящий из двух последовательно соединенных интеграторов, матрицы описания которого и начальные условия имеют значения

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}; C = [1 \ 0]; x_1(0) = 1; x_2(0) = 1.$$

Синтезируем для данного ОУ законы прямого модального управления и МУ средствами обратной связи. В качестве ММ используем систему вида (6) с матрицами

$\Gamma = \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 0 & -5 \end{bmatrix}$ и $H = [1 \ 1]$, образующими наблюдаемую пару.

Проведем синтез прямого модального управления. Проверим наличие одинаковых элементов в спектрах собственных значений матриц A и Γ : $\sigma\{A\} = \{\lambda_{A1} = \lambda_{A2} = 0\}$, $\sigma\{\Gamma\} = \{\lambda_1 = -2, \lambda_2 = -5\}$. Так как одинаковых собственных значений нет, то переходим к решению уравнения Сильвестра.

Подставим матрицы A , B , Γ и H в уравнение Сильвестра (12). Матрица M , являющаяся решением этого

уравнения, принимает значение $M = \begin{bmatrix} -0,25 & -0,04 \\ 0,5 & 0,2 \end{bmatrix}$.

Обратная ей матрица $M^{-1} = \begin{bmatrix} -6,66666 & -1,33333 \\ 16,66666 & 8,33333 \end{bmatrix}$.

Закон прямого модального управления принимает вид

$$u(t) = -He^{\Gamma t}M^{-1}x(0) = \\ = -[1 \ 1] \begin{bmatrix} e^{-2t} & 0 \\ 0 & e^{-5t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -6,67 & -1,33 \\ 16,67 & 8,33 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \\ = [8e^{-2t} \quad -25e^{-5t}].$$

Проведем синтез МУ, реализуемого средствами обратной связи в форме (38). Воспользуемся полученными выше результатами для матриц M и M^{-1} и вычислим матрицу K согласно (28): $K = HM^{-1} = [1$

$1] \begin{bmatrix} -6,67 & -1,33 \\ 16,67 & 8,33 \end{bmatrix} = [10 \ 7]$. Матрица состояния F замкнутой системы принимает вид $F = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -10 & -7 \end{bmatrix}$. Вычислим матрицу K в соответствии с (41): $K_g = 10$.

Для построения формирователя закона управления в форме (44) $u(t) = K_\varepsilon \varepsilon(t) - K_x x(t)$ вычисляем матрицы K_ε и K_x : $K_\varepsilon = -10$, $K_x = [0 \ 7]$. При этом для $g(t) = 0$, $x_1(0) = 1$, $x_2(0) = 1$ управление $u(t) = -Kx(t)$ принимает вид

$u(t) = -Kx(t) = -Ke^{Ft}x(0) = -KM e^{\Gamma t}M^{-1}x(0) =$

$$= -[10 \ 7] \begin{bmatrix} -0,25 & -0,04 \\ 0,5 & 0,2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-2t} & 0 \\ 0 & e^{-5t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -6,67 & -1,33 \\ 16,67 & 8,33 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \\ = [8e^{-2t} \quad -25e^{-5t}].$$

Как и следовало ожидать, на уровне сигнальных представлений управлений, параметризованных временем, при одном и том же начальном состоянии

объекта выражения для этих сигналов, сконструированных средствами ПМУ и МУ с помощью обратной связи, оказались эквивалентными.

Выводы

Для реализации ПМУ требуется знание только начального состояния объекта управления, для реализации МУ средствами обратной связи требуется знание текущего состояния объекта управления, эти ситуации информационно существенно различны. Конкретная практика применения сама решит задачу выбора того или иного способа МУ. Это в наибольшей степени должно проявиться в случае дистанционного модального управления.

Список литературы

1. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Линейные модели. М.: Наука, 1987.
2. Андреев Ю. Н. Управление конечномерными линейными объектами. М.: Наука, 1976.
3. Кузовков Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Машиностроение, 1976.
4. Porter B., Crossley T. P. Modal Control. London: Taylor & Francis, 1972.
5. Luenberger D. G. Canonical forms for Linear Multivariable Systems // IEEE Trans. Automatic Control. 1967. V. 12. P. 290—293.
6. Синтез дискретных регуляторов при помощи ЭВМ / В. В. Григорьев, В. Н. Дроздов, В. В. Лаврентьев, А. В. Ушаков. Л.: Машиностроение, 1983.
7. Ушаков А. В. Обобщенное модальное управление // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43. № 3. С. 8—15.
8. Акунов Т. А., Слита О. В., Ушаков А. В. Назначение структуры собственных векторов, доставляющей динамической системе модальную робастность, минимальными управлениями // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 1. С. 6—10.
9. Гантмахер Ф. П. Теория матриц. М.: Наука, 1973.

УДК 681.5

А. З. Асанов, д-р техн. наук, проф.,

В. С. Каримов, ассистент,

Казанский государственный университет

Применение технологии вложения в задаче синтеза САУ для многосвязного объекта с запаздываниями по состоянию

Рассматривается синтез системы автоматического управления для многосвязного объекта с запаздываниями по состоянию на основе технологии вложения систем. Предлагаются алгоритмы решения задачи синтеза. На численном примере показана эффективность применения технологии вложения при синтезе системы автоматического управления с запаздываниями.

Ключевые слова: технология вложения систем, многосвязный объект управления, запаздывания по состоянию, синтез систем автоматического управления, алгоритмы синтеза

Введение. Среди современных технических объектов управления (ОУ) значительное место занимают объекты, имеющие задержки прохождения сигналов через свои элементы. Примером таких ОУ с запаздываниями по управлению могут служить ленточные транспортеры, прокатные станы, процессы сушки и горения, а с запаздываниями по состоянию — процессы с рециклом, в частности, процессы в измельчительных машинах или процессы в химических реакторах.

Моделирование процессов, происходящих в реальных ОУ с запаздываниями, осуществляется с помощью дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом (дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом) [1, 2]. Запаздывания в системах управления весьма отрицательно влияют

на процессы регулирования, поэтому их необходимо учитывать при проектировании систем автоматического управления. Методы синтеза систем управления, не учитывающие фактор задержки сигналов при проектировании систем, оказываются малоэффективными [3]. Проблема же конструирования систем управления для многосвязных объектов управления с запаздываниями является еще более сложной.

В данной статье рассматривается задача синтеза системы автоматического управления (САУ) многосвязным объектом с запаздываниями по состоянию. Целью работы является синтез регуляторов и предкомпенсаторов, которые обеспечивали бы в системе процессы (в частности переходные) желаемого вида. Для решения задачи проектирования САУ с запаздываниями используется технология вложения систем [4]. Предполагается, что математические модели регулятора и предкомпенсатора имеют минимальную реализацию, т. е. представляются в виде матричных передаточных функций (МПФ). Законы управления рассматриваются только регулярные, в которых передаточная матрица предкомпенсатора $\mathbf{G}(p)$ обратима.

Постановка задачи. Пусть линейный стационарный объект с сосредоточенными запаздываниями может быть представлен в виде дифференциально-разностных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \sum_{i=0}^l (\mathbf{A}_i \mathbf{x}(t - \tau_i)) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t); \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\tau_0 = 0$, $0 < \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_l$ — постоянные времена запаздываний, $i = 0, \dots, l$; $\mathbf{u}(t) \in R^s$ — вектор входных переменных; $\mathbf{y}(t) \in R^m$ — вектор выходных переменных; $\mathbf{x}(t) \in R^n$ — фазовый вектор объекта управле-

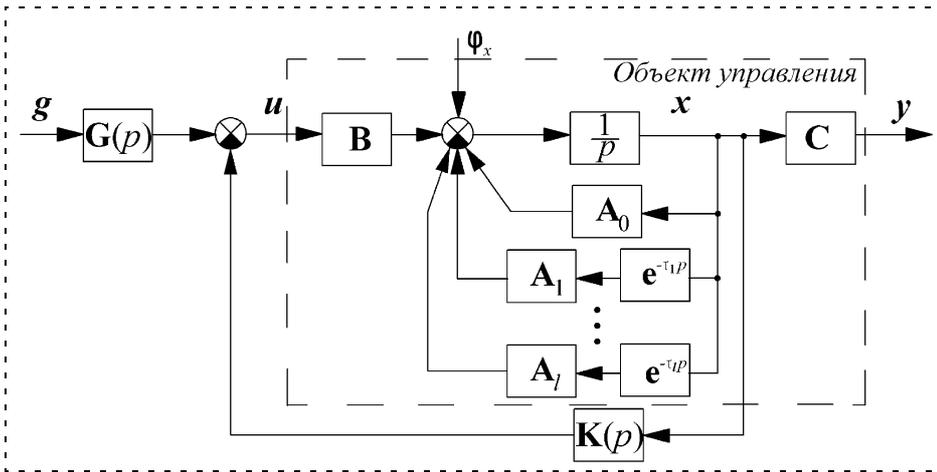


Рис. 1. Система автоматического управления с запаздываниями

ния. В нашем случае матрицы A_i имеют размерность $n \times n$, $B - n \times s$, $C - m \times n$. Матрицы A_i являются постоянными матрицами при временах запаздывания τ_i .

Слагаемые $A_i x(t - \tau_i)$ описывают запаздывания сигналов на время τ_i во внутренних каналах ОУ.

Начальные условия зададим с учетом запаздывания сигналов в ОУ — формально будем рассматривать отрицательные моменты времени $t < 0$, предполагая, что в объекте происходили динамические процессы до начального момента времени:

$$x(t) = \varphi_x(t), \quad t_0 - \tau \leq t \leq t_0,$$

где τ — наибольшее время запаздывания.

Применение преобразования Лапласа к уравнению (1) дает операторную форму описания объекта:

$$\begin{aligned} px(p) &= A_0 x(p) + A_1 e^{-\tau_1 p} x(p) + \\ &+ \dots + A_l e^{-\tau_l p} x(p) + Bu(p) + \varphi_x(p); \end{aligned} \quad (2)$$

$$y(p) = Cx(p).$$

Объекту управления, представленному в виде уравнений (2), соответствует структура, выделенная штриховыми линиями на рис. 1.

Систему уравнений (2) можно представить в следующем свернутом виде:

$$\begin{aligned} px(p) &= \sum_{i=0}^l (A_i e^{-\tau_i p} x(p)) + Bu(p) + \varphi_x(p); \\ y(p) &= Cx(p). \end{aligned}$$

Пусть закон управления в общем случае описывается матричным уравнением

$$G(p)g(p) = K(p)x(p) + u(p), \quad (3)$$

где $G(p)$ — МПФ предкомпенсатора размерности $s \times s$; $K(p)$ — МПФ регулятора размерности $n \times s$; $g(p) \in R^s$ — вектор управления на входе системы.

Пусть желаемое поведение САУ задается МПФ $E_y^{\varphi_x}(p)$ от начального условия φ_x к выходу y (свободная составляющая движения замкнутой динамической системы) или МПФ $E_y^g(p)$ от управляющих воздействий g к выходу y (вынужденная составляющая движения замкнутой динамической системы), или сразу двумя МПФ $E_y^{\varphi_x}(p)$ и $E_y^g(p)$.

Задача: для ОУ (1) и закона управления (3) найти МПФ предкомпенсатора $G(p)$ и регулятора $K(p)$ или условия, их определяющие, при которых поведение САУ (рис. 1) будет описываться желаемыми матричными передаточными функциями $E_y^{\varphi_x}(p)$ и/или $E_y^g(p)$.

Решение задачи. Для синтеза системы управления можно использовать технологию вложения систем [4]. С учетом уравнений (2), (3) и выполнения процедур метода вложения систем проблемная матрица (проматрица) рассматриваемой задачи будет иметь вид

$$\begin{aligned} \Omega(p) &= \\ &= \begin{bmatrix} pI_n - (A_0 + A_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + A_l e^{-\tau_l p}) & 0 & -B & 0 \\ -C & I_m & 0 & 0 \\ K(p) & 0 & I_s & -G(p) \\ 0 & 0 & 0 & I_s \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Репроматрица системы в обобщенном виде представляется следующим образом:

$$\Omega^{-1}(p) = \begin{bmatrix} E_x^{\varphi_x}(p) & * & * & E_x^g(p) \\ E_y^{\varphi_x}(p) & * & * & E_y^g(p) \\ E_u^{\varphi_x}(p) & * & * & E_u^g(p) \\ 0 & 0 & 0 & I_s \end{bmatrix}.$$

Здесь $E_j^i(p)$ — МПФ от параметра i к параметру j . Блоки, не представляющие особого интереса, отмечены звездочками.

Матрицы вложения α и β , используемые при вложении систем, имеют вид

$$\alpha = [\mathbf{I}_n \ 0 \ 0 \ 0]^T, \beta = [0 \ \mathbf{I}_m \ 0 \ 0] \text{ при } \omega = \mathbf{E}_y^{\phi_x}(p);$$

$$\alpha = [0 \ 0 \ 0 \ \mathbf{I}_s]^T, \beta = [0 \ \mathbf{I}_m \ 0 \ 0] \text{ при } \omega = \mathbf{E}_y^g(p);$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{I}_s \end{bmatrix}^T, \beta = [0 \ \mathbf{I}_m \ 0 \ 0] \text{ при } \omega = [\mathbf{E}_y^g(p) \ \mathbf{E}_y^{\phi_x}(p)],$$

где ω — образ синтезируемой системы — желаемая передаточная функция системы.

После выполнения процедур технологии вложения — последовательной факторизации матриц $\Omega = \Sigma \Xi$, $\alpha = \Sigma \delta$, $\beta = \pi \Xi$, $\omega = \pi \delta$ можно получить уравнения, которым должны удовлетворять МПФ предкомпенсатора $\mathbf{G}(p)$ и регулятора $\mathbf{K}(p)$, для трех случаев: при синтезе по свободной составляющей

$\mathbf{E}_y^{\phi_x}(p)$, при синтезе по вынужденной составляющей $\mathbf{E}_y^g(p)$, при синтезе по свободной $\mathbf{E}_y^{\phi_x}(p)$ и вынужденной $\mathbf{E}_y^g(p)$ составляющим движения замкнутой динамической системы.

Для решения матричных уравнений, которые получились в результате применения процедур вложения, возможно применение аппарата канонизации матриц [5].

Суть канонизации произвольной матрицы \mathbf{M} размера $m \times n$ заключается в нахождении четверки матриц $(\tilde{\mathbf{I}})_{r,m}^L$, $\overline{\mathbf{M}}_{(m-r),n}^L$, $(\tilde{\mathbf{I}})_{n,r}^R$, $\overline{\mathbf{M}}_{n,(n-r)}^R$, удовлетворяющих равенству

$$\begin{bmatrix} (\tilde{\mathbf{M}})_{r,m}^L \\ \overline{\mathbf{M}}_{m-r,n}^L \end{bmatrix} \mathbf{M} [(\tilde{\mathbf{M}})_{n,r}^R \ \overline{\mathbf{M}}_{n,n-r}^R] = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_r & 0_{r,n-r} \\ 0_{m-r,r} & 0_{m-r,n-r} \end{bmatrix},$$

где $(\tilde{\mathbf{I}})_{r,m}^L$ ($(\tilde{\mathbf{I}})_{n,r}^R$) называется левым (правым) канонизатором матрицы \mathbf{M} ; $\overline{\mathbf{M}}_{m-r,n}^L$ ($\overline{\mathbf{M}}_{n,n-r}^R$) — левым (правым) матричным делителем нуля матрицы \mathbf{M} ; $r = \text{rank} \mathbf{M}$; \mathbf{I}_r — единичная матрица размерности $r \times r$.

Сводный канонизатор $(\tilde{\mathbf{M}})$, используемый при решении матричных уравнений, определяется по формуле

$$(\tilde{\mathbf{M}}) = (\tilde{\mathbf{M}})^R (\tilde{\mathbf{M}})^L.$$

Введенные матричные конструкции могут вычисляться как аналитически, так и программным способом.

1. *Синтез по свободной составляющей движения замкнутой динамической системы $\mathbf{E}_y^{\phi_x}(p)$.*

В этом случае свободное движение системы, обусловленное начальными условиями объекта, не зависит от выбора предкомпенсатора, и закон управления принимает вид

$$\mathbf{u}(p) = -\mathbf{K}(p)\mathbf{x}(p).$$

Применение технологии вложения при синтезе по свободной составляющей дает следующее уравнение для определения регулятора $\mathbf{K}(p)$:

$$\mathbf{E}_y^{\phi_x}(p)\mathbf{B}\mathbf{K}(p) = \mathbf{C} - \mathbf{E}_y^{\phi_x}(p)(p\mathbf{I}_n - (\mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + \mathbf{A}_l e^{-\tau_l p})). \quad (4)$$

Из уравнения (4) с использованием результатов [4] можно выразить множество регуляторов:

$$\{\mathbf{K}(p)\}_\mu = (\mathbf{E}_y^{\phi_x}(p)\mathbf{B}) \tilde{\mathbf{V}} (\mathbf{C} - \mathbf{E}_y^{\phi_x}(p)(p\mathbf{I}_n - (\mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + \mathbf{A}_l e^{-\tau_l p}))) \overline{\mathbf{E}_y^{\phi_x}(p)\mathbf{B}}^R \boldsymbol{\mu}(p), \quad (5)$$

где $\boldsymbol{\mu}(p)$ — произвольная дробно-полиномиальная матрица соответствующих размеров. Условия разрешимости уравнения (4) при применении метода канонизации, а значит, и существования множества решений (5) имеют вид:

$$\overline{\mathbf{E}_y^{\phi_x}(p)\mathbf{B}}^L [\mathbf{C} - \mathbf{E}_y^{\phi_x}(p)(p\mathbf{I}_n - (\mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + \mathbf{A}_l e^{-\tau_l p}))] = 0, \quad (6)$$

или

$$\mathbf{C} - \mathbf{E}_y^{\phi_x}(p)(p\mathbf{I}_n - (\mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + \mathbf{A}_l e^{-\tau_l p})) = (\mathbf{E}_y^{\phi_x}(p)\mathbf{B})(\mathbf{E}_y^{\phi_x}(p)\mathbf{B})^R \xi(p), \quad (7)$$

где $\xi(p)$ — произвольная дробно-полиномиальная матрица соответствующего размера.

2. *Синтез по вынужденной составляющей движения замкнутой динамической системы $\mathbf{E}_y^g(p)$.*

Применение технологии вложения при синтезе по вынужденной составляющей дает следующие уравнения относительно искомым передаточных матриц $\mathbf{G}(p)$ и $\mathbf{K}(p)$:

$$\begin{aligned} \pi_x(p)\mathbf{B}\mathbf{K}(p) &= \mathbf{C} - \pi_x(p)(p\mathbf{I}_n - (\mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + \mathbf{A}_l e^{-\tau_l p})), \\ \pi_x(p)\mathbf{B}\mathbf{G}(p) &= \mathbf{E}_y^g(p), \end{aligned} \quad (8)$$

где $\pi_x(p)$ — вспомогательная дробно-полиномиальная матрица размерности $m \times n$.

Используя результаты [4], множество регуляторов и предкомпенсаторов в этом случае можно описать формулами

$$\{\mathbf{K}(p)\}_{\mathbf{T}, \lambda, \vartheta} = (\mathbf{B}) \left(\mathbf{T}^{-1}(p) \begin{bmatrix} (\mathbf{C})^{\sim L} \mathbf{C} \\ \lambda(p) \end{bmatrix} - (p\mathbf{I}_n - (\mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + \mathbf{A}_l e^{-\tau_l p})) \right) + \overline{\mathbf{B}}^R \vartheta(p); \quad (9)$$

$$\{\mathbf{G}(p)\}_{\mathbf{N}, \xi, \kappa} = (\mathbf{B}) \mathbf{N}^{-1}(p) \begin{bmatrix} (\mathbf{E}_y^g(p))^{\sim L} \mathbf{E}_y^g(p) \\ \kappa(p) \end{bmatrix} + \overline{\mathbf{B}}^R \xi(p),$$

удовлетворяющими условиям разрешимости:

a) ранг матрицы $\mathbf{E}_y^g(p)$ не превышает ранга матрицы \mathbf{B} :

$$\text{rank } \mathbf{E}_y^g(p) \leq \text{rank } \mathbf{B};$$

b) существует произвольная матрица λ , дополняющая строчечный базис $(\mathbf{C})^{\sim L} \mathbf{C}$ матрицы \mathbf{C} до размерности пространства состояний n , и произвольная обратимая матрица $\mathbf{T}(p)$ размерности $n \times n$, при которых выполняется условие

$$\overline{\mathbf{B}}^L \left(\mathbf{T}^{-1}(p) \begin{bmatrix} (\mathbf{C})^{\sim L} \mathbf{C} \\ \lambda(p) \end{bmatrix} - (p\mathbf{I}_n - (\mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + \mathbf{A}_l e^{-\tau_l p})) \right) = 0;$$

c) существуют произвольные дробно-полиномиальные матрицы $\psi(p)$ и $\eta(p)$, дополняющие столбцовые базисы матрицы \mathbf{C} и желаемой передаточной матрицы $\mathbf{E}_y^g(p)$ до размерности пространства состояний n , а также произвольная обратимая матрица $\mathbf{N}(p)$, при которой выполняются условия

$$\eta(p)\lambda(p) = 0, [\tilde{\mathbf{N}}(\tilde{\mathbf{N}})^{\sim R} \eta(p)]\mathbf{T}(p) = [\mathbf{E}_y^g(p)(\mathbf{E}_y^g(p))^{\sim R} \psi(p)]\mathbf{N}(p),$$

где $\vartheta(p)$, $\xi(p)$ — произвольные дробно-полиномиальные матрицы соответствующих размерностей; $\kappa(p)$ — произвольная дробно-полиномиальная матрица, дополняющая строчечный базис желаемой МПФ $\mathbf{E}_y^g(p)$ до размерности пространства состояний n и удовлетворяющая условию

$$\psi(p)\kappa(p) = 0;$$

матрицы $\mathbf{T}(p)$, $\mathbf{N}(p)$, $\lambda(p)$, $\eta(p)$ и $\psi(p)$ принимают значения, удовлетворяющие условиям разрешимости a), b), c).

3. Синтез по свободной $\mathbf{E}_y^{\phi x}(p)$ и вынужденной $\mathbf{E}_y^g(p)$ составляющим движения замкнутой динамической системы.

Применение технологии вложения при синтезе по вынужденной и свободной составляющим дает следующие уравнения относительно искомым передаточных матриц $\mathbf{G}(p)$ и $\mathbf{K}(p)$:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_y^{\phi x}(p)\mathbf{B}\mathbf{K}(p) &= \mathbf{C} - \mathbf{E}_y^{\phi x}(p)(p\mathbf{I}_n - (\mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + \mathbf{A}_l e^{-\tau_l p})); \\ \mathbf{E}_y^{\phi x}(p)\mathbf{B}\mathbf{G}(p) &= \mathbf{E}_y^g(p). \end{aligned} \quad (10)$$

Из уравнений (10) множество регуляторов и предкомпенсаторов может быть выражено следующим образом:

$$\begin{aligned} \{\mathbf{K}(p)\}_{\mu} &= (\mathbf{E}_y^{\phi x}(p)\mathbf{B}) \left(\mathbf{C} - \mathbf{E}_y^{\phi x}(p)(p\mathbf{I}_n - (\mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + \mathbf{A}_l e^{-\tau_l p})) \right) + \overline{\mathbf{E}_y^{\phi x}(p)\mathbf{B}}^R \mu(p); \\ \{\mathbf{G}(p)\}_{\eta} &= (\mathbf{E}_y^{\phi x}(p)\mathbf{B}) \mathbf{E}_y^g(p) + \overline{\mathbf{E}_y^{\phi x}(p)\mathbf{B}}^R \eta(p), \end{aligned} \quad (11)$$

где $\eta(p)$, $\mu(p)$ — произвольные дробно-полиномиальные матрицы соответствующих размерностей. Условия разрешимости уравнений (10) и получения множества решений (11) имеют вид

$$\overline{\mathbf{E}_y^{\phi x}(p)\mathbf{B}}^L [\mathbf{C} - \mathbf{E}_y^{\phi x}(p)(p\mathbf{I}_n - (\mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + \mathbf{A}_l e^{-\tau_l p}))] = 0; \quad (12)$$

$$\overline{\mathbf{E}_y^{\phi x}(p)\mathbf{B}}^L \mathbf{E}_y^g(p) = 0$$

или

$$\begin{aligned} \mathbf{C} - \mathbf{E}_y^{\phi x}(p)(p\mathbf{I}_n - (\mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + \mathbf{A}_l e^{-\tau_l p})) &= \\ &= (\mathbf{E}_y^{\phi x}(p)\mathbf{B})(\mathbf{E}_y^{\phi x}(p)\mathbf{B})^R \chi(p); \end{aligned} \quad (13)$$

$$\mathbf{E}_y^g(p) = (\mathbf{E}_y^{\phi x}(p)\mathbf{B})(\mathbf{E}_y^{\phi x}(p)\mathbf{B})^R \xi(p),$$

где $\chi(p)$, $\xi(p)$ — произвольные дробно-полиномиальные матрицы соответствующих размерностей.

Таким образом, получены соотношения (5), (9), (11) с условиями существования этих решений (6) или (7), a), b), c) при соотношении (9), с условиями (12) или (13) соответственно, которые позволяют найти множество регуляторов и предкомпенсаторов, удовлетворяющих закону управления (3).

Рассмотрим частный случай синтеза по свободной и вынужденной составляющим движения замкнутой динамической системы, когда желаемое поведение

замкнутой системы управления может быть задано следующей моделью:

$$\mathbf{E}_y^{\phi x}(p) = \mathbf{C}_ж(p\mathbf{I}_n - \mathbf{A}_ж)^{-1};$$

$$\mathbf{E}_y^g(p) = \mathbf{C}_ж(p\mathbf{I}_n - \mathbf{A}_ж)^{-1}\mathbf{B}_ж,$$

где $\mathbf{A}_ж, \mathbf{B}_ж, \mathbf{C}_ж$ — желаемые матрицы состояния, входа и выхода САУ. Примем, что $\mathbf{C} = \mathbf{C}_ж$, тогда из системы уравнений (10) получаем следующее выражение:

$$\mathbf{BK}(p) = (\mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + \mathbf{A}_l e^{-\tau_l p}) - \mathbf{A}_ж; \quad (14)$$

$$\mathbf{BG}(p) = \mathbf{B}_ж.$$

Из системы (14) найдем множество регуляторов и предкомпенсаторов:

$$\{\mathbf{K}(p)\}_\mu = (\tilde{\mathbf{B}})((\mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + \mathbf{A}_l e^{-\tau_l p}) - \mathbf{A}_ж) + \tilde{\mathbf{B}}^R \mu; \quad (15)$$

$$\{\mathbf{G}(p)\}_\eta = (\tilde{\mathbf{B}})\mathbf{B}_ж + \tilde{\mathbf{B}}^R \eta,$$

где μ, η — произвольные матрицы соответствующих размерностей.

Условия разрешимости в этом случае будут иметь вид

$$\tilde{\mathbf{B}}^L ((\mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + \mathbf{A}_l e^{-\tau_l p}) - \mathbf{A}_ж) = 0; \quad (16)$$

$$\tilde{\mathbf{B}}^L \mathbf{B}_ж = 0$$

или

$$((\mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + \mathbf{A}_l e^{-\tau_l p}) - \mathbf{A}_ж) = \mathbf{B}(\tilde{\mathbf{B}})^R \xi; \quad (17)$$

$$\mathbf{B}_ж = \mathbf{B}(\tilde{\mathbf{B}})^R \chi,$$

где ξ, χ — произвольные матрицы соответствующих размерностей.

Алгоритмы синтеза. Синтез системы автоматического управления можно проводить по трем вышеописанным случаям. Приведем для них алгоритмы синтеза.

Алгоритм 1. Алгоритм синтеза по свободной составляющей, по вынужденной составляющей, по свободной и вынужденной составляющим движения замкнутой динамической системы.

1.1 Определяются математическая модель объекта управления в виде дифференциально-разностных уравнений вида (1) и закон управления (3).

1.2 В случае синтеза по свободной составляющей формируется желаемая МПФ $\mathbf{E}_y^{\phi x}(p)$, в случае синтеза по вынужденной составляющей — желаемая МПФ $\mathbf{E}_y^g(p)$, в случае синтеза по свободной и вынужденной составляющим — желаемые МПФ $\mathbf{E}_y^{\phi x}(p)$ и $\mathbf{E}_y^g(p)$.

1.3 Проверяются условия существования решения матричных уравнений по формулам (6) или (7) в случае синтеза по свободной составляющей, по условиям *a), b), c)* при формулах (9) с предварительно подобранными матрицами $\mathbf{T}(p), \mathbf{N}(p), \lambda(p), \eta(p)$ и $\psi(p)$, удовлетворяющих этим условиям — в случае синтеза по вынужденной составляющей, по формулам (12) или (13), — в случае синтеза по свободной и вынужденной составляющим. Если условия разрешимости не выполняются, то переход на этап 1.2 и коррекция желаемых МПФ $\mathbf{E}_y^{\phi x}(p)$ и/или $\mathbf{E}_y^g(p)$.

1.4 По формуле (5) вычисляется регулятор $\mathbf{K}(p)$ при $\mu = 0$, по формулам (9) — регулятор $\mathbf{K}(p)$ и предкомпенсатор $\mathbf{G}(p)$ при $\xi = 0$ и $\eta = 0$, по формулам (11) — регулятор $\mathbf{K}(p)$ и предкомпенсатор $\mathbf{G}(p)$ при $\mu = 0$ и $\eta = 0$ соответственно при синтезе по свободной, по вынужденной, по свободной и вынужденной составляющим.

1.5 При необходимости возможно получение множества решений регулятора $\mathbf{K}(p)$ по формуле (5), регулятора $\mathbf{K}(p)$ и предкомпенсатора $\mathbf{G}(p)$ по формулам (9), регулятора $\mathbf{K}(p)$ и предкомпенсатора $\mathbf{G}(p)$ по формулам (11) соответственно при синтезе по свободной, по вынужденной, по свободной и вынужденной составляющим с последующим решением задачи оптимизации [6] на найденном множестве регуляторов и предкомпенсаторов.

Алгоритм 2 (модифицированный алгоритм). Синтез по свободной и вынужденной составляющим движения замкнутой динамической системы в частном случае при $\mathbf{C} = \mathbf{C}_ж$.

2.1 Определяются математическая модель объекта управления в виде дифференциально-разностных уравнений вида (1) и закон управления (3).

2.2 Формируются матрицы $\mathbf{A}_ж, \mathbf{B}_ж$ желаемых МПФ $\mathbf{E}_y^g(p)$ и $\mathbf{E}_y^{\phi x}(p)$.

2.3 Осуществляется проверка существования множества решений регуляторов и предкомпенсаторов по формулам (16) или (17). Если условия разрешимости не выполняются, то корректируются матрицы $\mathbf{A}_ж, \mathbf{B}_ж$ желаемых МПФ $\mathbf{E}_y^g(p)$ и $\mathbf{E}_y^{\phi x}(p)$ и происходит возврат на этап 2.2.

2.4 По формулам (15) вычисляются единственные значения регулятора $\mathbf{K}(p)$ и предкомпенсатора $\mathbf{G}(p)$ при $\mu = 0$ и $\eta = 0$.

2.5 При необходимости возможно получение множества решений регулятора $\mathbf{K}(p)$ и предкомпенсатора $\mathbf{G}(p)$ по формулам (15) с последующим решением задачи оптимизации [6] на найденном множестве регуляторов и предкомпенсаторов.

Пример. Рассмотрим объект управления, представляющий собой химический реактор для очистки

нефти [7]. Динамику процессов, происходящих в нем, можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}_0 \mathbf{x}(t) + \mathbf{A}_1 \mathbf{x}(t-1) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t); \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(t), \end{aligned}$$

где $\mathbf{x}(t) = \{x_1(t), \dots, x_4(t)\}$; $\mathbf{u}(t) = \{u_1(t), u_2(t)\}$;

$$\mathbf{C} = \mathbf{I}_4; \mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} -4,93 & -1,01 & 0 & 0 \\ -3,20 & -5,30 & -12,80 & 0 \\ 6,40 & 0,347 & -32,50 & -1,04 \\ 0 & 0,833 & 11,00 & -3,96 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1,92 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,92 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,87 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,724 \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Начальные условия объекта управления представлены функциями:

$$\varphi_{x_1}(t) = 0, 1; \varphi_{x_2}(t) = 0; \varphi_{x_3}(t) = 0; \varphi_{x_4}(t) = 0.$$

Закон управления зададим в виде (3). Синтез системы управления будем проводить по свободной и вынужденной составляющим движения замкнутой динамической системы.

Допустим, что матрица \mathbf{C} объекта управления равна $\mathbf{C}_ж$, и пусть динамика желаемой системы задана матрицами

$$\mathbf{E}_y^{\varphi_x}(p) = \frac{1}{b} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}; \mathbf{E}_y^g(p) = \frac{1}{b} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \\ a_{41} & a_{42} \end{bmatrix},$$

где $b = p^4 + 47,9p^3 + 586p^2 + 2440p + 3100$; $a_{11} = p^3 + 39,8p^2 + 268p + 480$; $a_{21} = -3,2p^2 - 199p - 773$; $a_{31} = 6,4p^2 + 45,9p + 84$; $a_{41} = 67,7p + 70,9$; $a_{12} = -1,01p^2 - 36,8p - 142$; $a_{22} = p^3 + 44,5p^2 + 435p + 1130$; $a_{32} = 0,347p^2 - 3,15p - 21,5$; $a_{42} = 0,833p^2 + 37,6p + 178$; $a_{13} = 12,9p + 51,2$; $a_{23} = -12,8p^2 - 154p - 410$; $a_{33} = p^3 + 15,4p^2 + 69,5p + 95,4$; $a_{43} = 11p^2 + 115p + 179$; $a_{14} = -13,4$; $a_{24} = 13,3p + 108$; $a_{34} = -1,04p^2 - 11,9p - 25$; $a_{44} = p^3 + 44p^2 + 401p + 736$.

Матрицы $\mathbf{A}_ж$, $\mathbf{B}_ж$ желаемых МПФ $\mathbf{E}_y^g(p)$ и $\mathbf{E}_y^{\varphi_x}(p)$ будут иметь вид

$$\mathbf{A}_ж = \begin{bmatrix} -3,58 & -1,01 & 0 & 0 \\ -3,20 & -3,38 & -12,80 & 0 \\ 6,40 & 0,347 & -32,50 & -1,04 \\ 0 & 0,833 & 11,00 & -3,96 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_ж = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для упрощения процедур вычисления принимаем $\mathbf{B}_ж = \mathbf{B}$. Тогда синтез системы уравнения будем проводить по частному случаю в соответствии с алгоритмом 2.

Проведем проверку существования множества решений регуляторов и предкомпенсаторов по формулам (16) или (17), предварительно вычислив сводный канонизатор, правый канонизатор и левый делитель нуля матрицы \mathbf{B} , используя метод канонизации матриц [5], реализованный в виде подпрограммы в пакете математических программ MatLab [8]:

$$(\tilde{\mathbf{B}}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; (\tilde{\mathbf{B}})^R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \bar{\mathbf{B}}^L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Из-за невыполнения условий (16) или (17) множества решений регуляторов и предкомпенсаторов не существует, в чем нетрудно убедиться, подставив необходимые матрицы, например, в первое тождество уравнений (16):

$$\begin{bmatrix} -4,93 & -1,01 & 0 & 0 \\ -3,20 & -5,30 & -12,80 & 0 \\ 6,40 & 0,347 & -32,50 & -1,04 \\ 0 & 0,833 & 11,00 & -3,96 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1,92 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,92 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,87 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,724 \end{bmatrix} \mathbf{e}^{-p} - \begin{bmatrix} -3,58 & -1,01 & 0 & 0 \\ -3,20 & -3,38 & -12,80 & 0 \\ 6,40 & 0,347 & -32,50 & -1,04 \\ 0 & 0,833 & 11,00 & -3,96 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \xi_{13} & \xi_{14} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \xi_{23} & \xi_{24} \end{bmatrix}.$$

Перемножая матрицы в правой части тождества, получим

$$\begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \xi_{13} & \xi_{14} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \xi_{23} & \xi_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Вид матрицы, получившейся в правой части тождества, говорит о том, что в данном случае решений не существует ни при какой произвольной матрице ξ .

Проанализировав уравнения (16) или (17), можно сделать вывод, что условия существования множества регуляторов и предкомпенсаторов выполняются только тогда, когда последние две строчки матрицы $\mathbf{A}_ж$ будут такими же, как у исходной суммы $\mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 \mathbf{e}^{-p}$. Поэтому желаемые матрицы $\mathbf{A}_ж$, $\mathbf{B}_ж$ представим в следующем виде:

$$\mathbf{A}_ж = \begin{bmatrix} -3,58 & -1,01 & 0 & 0 \\ -3,20 & -3,38 & -12,80 & 0 \\ 6,40 & 0,347 & -32,50 & -1,04 \\ 0 & 0,833 & 11,00 & -3,96 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,87 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,724 \end{bmatrix} \mathbf{e}^{-p}; \mathbf{B}_ж = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

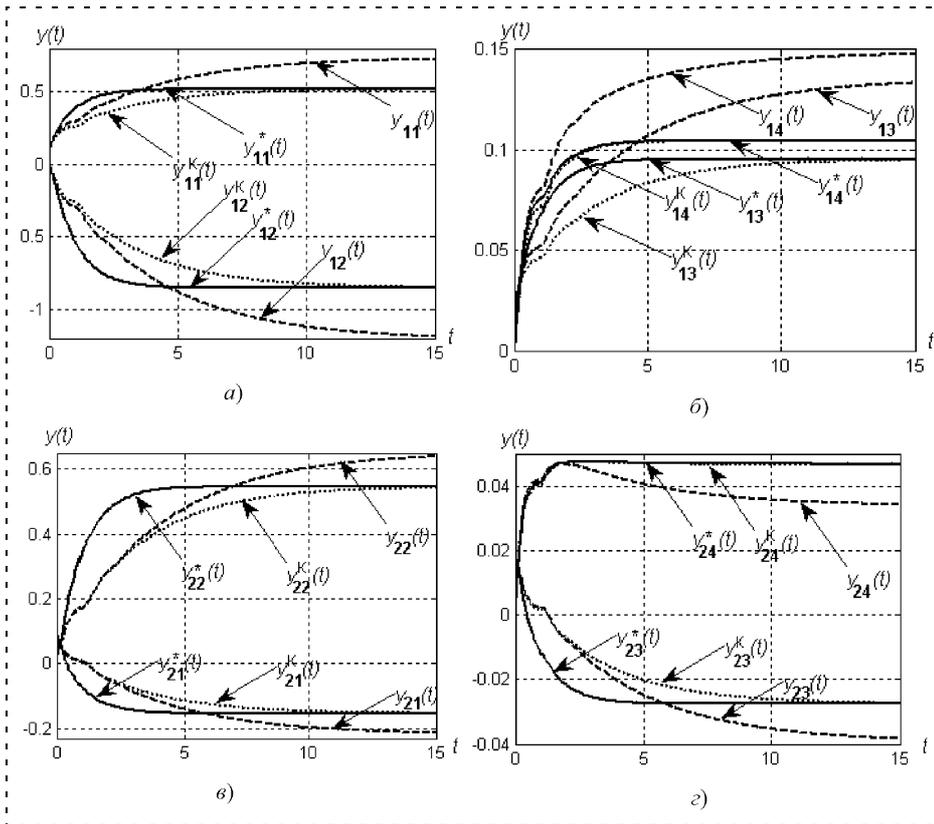


Рис. 2. Переходные характеристики исходного объекта управления $y_{ij}(t)$, синтезированной системы управления $y_{ij}^*(t)$, полученной на основе технологии вложения систем, синтезированной системы управления $y_{ij}^k(t)$, полученной на основе метода классического регулирования (i — номер входа, j — номер выхода)

Далее по формулам (15) вычислим значения регулятора $K(p)$ и предкомпенсатора $G(p)$ при $\mu = 0$ и $\eta = 0$:

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; K = \begin{bmatrix} -1,35 + 1,92e^{-p} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1,92 + 1,92e^{-p} & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Сравним результат, полученный при синтезе по технологии вложения систем, с результатом, полученным одним из классических методов и имеющим матрицы

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; K = \begin{bmatrix} 0,57 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Также проведем моделирование и сравнительный анализ переходных характеристик (рис. 2).

Анализируя переходные характеристики систем управления, полученных двумя методами, можно отметить, что время переходных процессов по разным каналам, полученных при синтезе по техноло-

гии вложения, в большинстве случаев в несколько раз меньше времени переходных процессов, полученных при синтезе классическим методом. Отметим, что переходные процессы, полученные с помощью технологии вложения, почти всегда имеют аperiodический вид.

Вывод. Проведен синтез САУ для многосвязного ОУ с запаздываниями по состоянию на основе технологии вложения систем. Рассмотрены несколько случаев синтеза: синтез по свободной составляющей, вынужденной, по свободной и вынужденной составляющим движения замкнутой системы управления. Разработаны алгоритмы синтеза системы управления для многосвязного объекта управления с запаздываниями по состоянию.

На численном примере показана эффективность применения предлагаемых алгоритмов синтеза системы автоматического управления для многосвязного ОУ с запаздываниями по состоянию.

Список литературы

1. Эльсгольц Л. Э., Норкин С. Б. Введение в теорию дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом. М.: Наука, 1971.
2. Мышкис А. Д. Линейные дифференциальные уравнения с запаздывающим аргументом. М.: Наука, 1972.
3. Филимонов А. Б. Спектральная декомпозиция систем с запаздываниями. Компенсация запаздываний. М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 2002. 288 с.
4. Буков В. Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. Калуга: Изд-во науч. лит-ры Н. Ф. Бочкаревой, 2006. 720 с.
5. Буков В. Н., Рябченко В. Н., Косьянчук В. В., Зябин Е. Ю. Решение линейных матричных уравнений методом канонизации // Вест. Киевского ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. Вып. 1. 2002. С. 19–28.
6. Буков В. Н., Рябченко В. Н., Зубов Н. Е. Вложение и оптимизация линейных систем // Автоматика и телемеханика. 2002. № 5. С. 12–23.
7. Громов Ю. Ю., Матвейкин В. Г., Земской Н. А. Системы автоматического управления с запаздыванием: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. 75 с.
8. Асанов А. З., Ахметзянов И. З. Канонизация матриц произвольного размера средствами MATLAB // Тр. 2 всерос. науч. конф. "Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB". М.: ИПУ РАН, 2004.

ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ

УДК 681.513.3

Б. А. Алпатов, д-р техн. наук, проф.,
О. Е. Балашов, канд. техн. наук, доц.,
А. И. Степашкин, канд. техн. наук, доц.,
Рязанский государственный
радиотехнический университет

Повышение точности сопровождения объектов бортовой оптико-механической системой с двухосным карданным подвесом

Рассматривается алгоритм управления приводами двухосного карданного подвеса, установленного на подвижном носителе, для автоматического сопровождения объектов оптико-механической системой.

Ключевые слова: автоматическое сопровождение, двухосный кардан, прогнозирование направления на объект.

Научная проблема, которой посвящена данная статья, актуальна в технических задачах, известных под названием "системы наведения и автоматического сопровождения объектов". Автоматическое сопровождение объекта по данным видеонаблюдений — это постоянное отслеживание положения объекта в пространстве по последовательности видеокладов и совмещение оптической оси оптико-механической системы с направлением на объект [1]. Системы, реализующие описанную задачу, называются системами видеосопровождения (СВС).

В данной статье помимо алгоритма вычисления требуемых углов поворота рамок кардана для совмещения направления оптической оси видеодатчика (ВД) с направлением на объект [2] рассматривается и организация структуры управления приводами

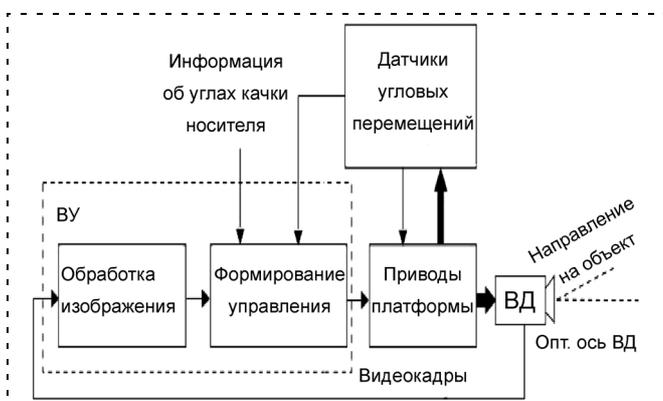


Рис. 1. Увеличенная функциональная схема СВС

СВС. Рассмотрение в комплексе задач вычисления требуемых углов поворота рамок кардана и формирования управления приводами СВС дает возможность улучшить качество сопровождения объектов.

СВС (укрупненная функциональная схема показана на рис. 1) содержит вычислительное устройство (ВУ) для оценки координат сопровождаемого объекта на изображении, сформированном ВД, и формирования заданных угловых положений рамок карданного подвеса, а также следящие приводы отработки заданных угловых положений и датчики угловых положений рамок подвеса относительно их осей вращения. При установке системы на подвижном носителе (корабле, летательном аппарате, автомобиле и т. п.) предусматривается поступление в СВС информации о текущих значениях углов качки носителя (крена, тангажа или дифферента, рыскания [3]).

Алгоритм вычисления требуемых углов поворота рамок кардана

Для решения задачи непрерывного во времени совмещения оптической оси видеодатчика с направлением на объект достаточно использовать двухосный карданный подвес, который рассматривается ниже. При установке СВС на подвижном носителе (корабле, самолете и т. д.), подверженном качке, на точность сопровождения объектов значительное влияние оказывают амплитуда и частота качки носителя вокруг каждой строительной оси носителя. Рассматриваемый подход, использующий переход в неподвижно ориентированную систему координат для вычисления направления на объект, позволяет учесть качку носителя и повысить точность сопровождения объектов.

На рис. 2 показан вариант двухосного карданного подвеса, расположенного на корабле, с изображе-

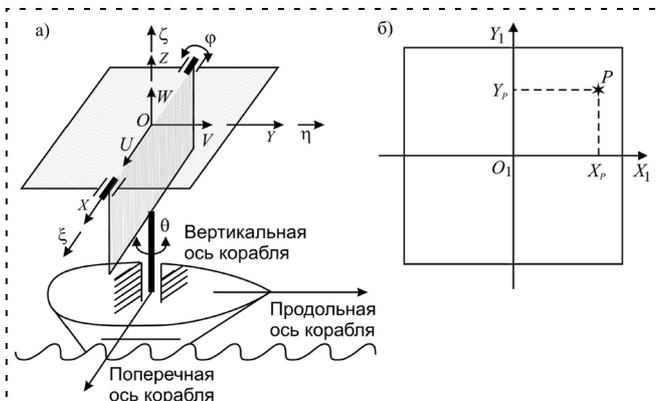


Рис. 2. Двухосная карданная система (а) и изображение, формируемое ВД (б)

нием соответствующих систем координат (рис. 2, а) и изображение, сформированное ВД, с отметкой P положения условного центра сопровождаемого объекта (рис. 2, б). Управление ориентацией платформы осуществляется путем изменения углов поворота θ (поворота внешней рамки кардана), φ (поворота внутренней рамки) рамок подвеса электромеханическими приводами.

На рис. 2, а показаны жестко связанная с платформой система координат $OUVW$ (направление оптической оси видеодатчика совпадает с осью OV); система координат $O\xi\eta\zeta$ — неподвижно ориентированная относительно поверхности Земли так, что плоскость $O\xi\eta$ параллельна плоскости горизонта, а ось $O\zeta$, образует правую систему координат с плоскостью $O\xi\eta$; система координат $OXYZ$, оси которой совпадают со строительными осями носителя. При отсутствии качки носителя и равенстве нулю углов θ и φ все указанные системы координат совпадают.

Введем в рассмотрение дополнительную систему координат $OU_TV_TW_T$, определяющую требуемое (заданное) положение в пространстве системы координат $OUVW$ платформы с видеодатчиком. Положение системы координат $OU_TV_TW_T$ относительно неподвижной $O\xi\eta\zeta$ удобно задать углами азимута θ_T и места φ_T оси OV_T , направление которой определяет требуемое положение оптической оси в неподвижной системе координат. Требуемые значения углов θ_T и φ_T в режиме обзора пространства могут задаваться оператором или программно, а в режиме автоматического сопровождения объекта данные углы должны вычисляться по значениям координат объекта на изображении при текущих значениях углов поворота рамок карданного подвеса и углов качки носителя.

Положение требуемой системы координат относительно неподвижной системы можно описать квадратной матрицей $\mathbf{A}(\theta_T, \varphi_T)$ направляющих косинусов осей координат системы $OU_TV_TW_T$ относительно осей системы $O\xi\eta\zeta$ [2]. Координаты вектора в системе $O\xi\eta\zeta$ определяются через координаты того же вектора в системе $OXYZ$ посредством матрицы \mathbf{B} направляющих косинусов [4]:

$$[\xi \ \eta \ \zeta]^T = \mathbf{B}(\alpha, \beta, \gamma)[x \ y \ z]^T. \quad (1)$$

В выражении (1) углы α, β, γ определяют соответственно углы рыскания, дифферента, крена носителя. С учетом $\mathbf{A}(\theta_T, \varphi_T)$ и (1) можно записать

$$\begin{bmatrix} u_T \\ v_T \\ w_T \end{bmatrix} = \mathbf{A}(\theta_T, \varphi_T)\mathbf{B}(\alpha, \beta, \gamma) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{C}(\theta_T, \varphi_T, \alpha, \beta, \gamma) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Введем в рассмотрение матрицу $\mathbf{D}(\theta, \varphi)$, переводящую координаты вектора из системы $OXYZ$ в систему $OUVW$.

Для получения указанной матрицы следует осуществить переход от системы координат $OXYZ$, считая ее неподвижной, к системе $OUVW$, начальное положение которой совпадает с $OXYZ$. Для координат вектора $[u \ v \ w]^T$ можно записать

$$[u \ v \ w]^T = \mathbf{D}(\theta, \varphi)[x \ y \ z]^T, \quad (3)$$

где $\mathbf{D}(\theta, \varphi)$ — матрица направляющих косинусов системы координат $OXYZ$ в системе $OUVW$ [4].

Задача управления приводами карданного подвеса заключается в таких поворотах его рамок на углы $\tilde{\theta}, \tilde{\varphi}$, при которых система координат платформы $OUVW$ совпадает с требуемой ориентацией платформы, определяемой системой координат $OU_TV_TW_T$. С учетом сказанного и выражений (2) и (3) требуемые углы поворота рамок должны определяться как решение матричного уравнения

$$\mathbf{D}(\tilde{\theta}, \tilde{\varphi}) = \mathbf{C}(\theta_T, \varphi_T, \alpha, \beta, \gamma).$$

Данное решение может быть выражено в виде [2] (если углы качки носителя не превышают по модулю значения 90°)

$$\begin{cases} \tilde{\varphi} = \arcsin c_{2,3}; \\ \tilde{\theta} = \arcsin c_{1,2}, \text{ если } c_{1,1} \geq 0; \\ \tilde{\theta} = \arcsin c_{1,2} + \frac{\pi}{2} \text{sign} c_{1,2}, \text{ если } c_{1,1} < 0, \end{cases}$$

где $c_{i,j}$ — элементы матрицы $\mathbf{C}(\theta_T, \varphi_T, \alpha, \beta, \gamma)$.

При автоматическом сопровождении объекта величины θ_T, φ_T , входящие в $c_{i,j}$, можно определить путем перевода координат вектора, направленного на объект \overline{OP} , из системы координат $OUVW$ в систему $O\xi\eta\zeta$. Координаты $[U_P \ V_P \ W_P]^T$ указанного вектора в системе $OUVW$ можно определить по координатам N_{XP}, N_{YP} , измеренным в пикселях, центра объекта в прямоугольной системе координат $X_1 O_1 Y_1$ оцифрованного изображения (модель формирования изображения и пересчет координат в пиксели описаны в [2]).

$$\begin{bmatrix} U_P \\ V_P \\ W_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N_{XP}}{N_{XM}} \text{tg} \theta_M \\ \frac{N_{YP}}{N_{YM}} \text{tg} \varphi_M \end{bmatrix},$$

где $N_{XM} \times N_{YM}$ — размер изображения в пикселях; $2\theta_M \times 2\varphi_M$ — ширина поля зрения ВД.

Для определения θ_T, φ_T осуществим пересчет полученных проекций вектора \overline{OP} в систему координат $O\xi\eta\zeta$ следующим образом:

$$[\xi_1 \ \eta_1 \ \zeta_1]^T = \mathbf{B}(\alpha, \beta, \gamma)\mathbf{D}^T(\theta, \varphi)[U_P \ V_P \ W_P]^T.$$

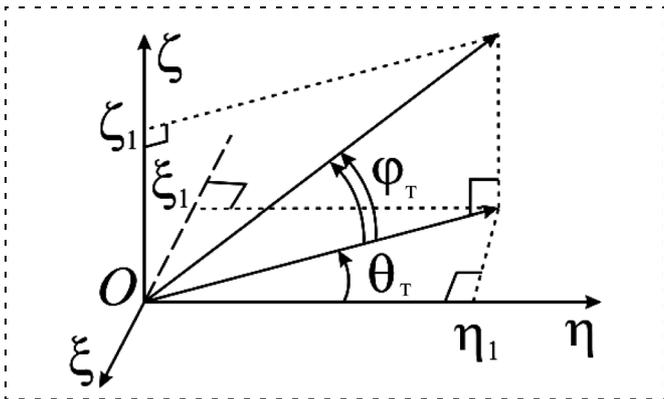


Рис. 3. Определение углов направления на объект

По координатам ξ_1, η_1, ζ_1 легко определить углы θ_T, φ_T вектора, направленного на сопровождаемый объект (рис. 3).

Угол азимута и угол места определяются по следующим соотношениям:

$$\theta_T = \arctg \frac{-\xi_1}{\eta_1};$$

$$\varphi_T = \arctg \frac{-\zeta_1}{\sqrt{\xi_1^2 + \eta_1^2}}.$$

Для определения углов $\theta_T, \varphi_T, \tilde{\theta}, \tilde{\varphi}$ информация об углах качки носителя α, β, γ и углах поворота рамок карданного подвеса θ, φ поступает с соответствующих датчиков углов в моменты, синхронизированные с получением кадров изображений с ВД.

Функциональная схема системы видеосопровождения

СВС может быть реализована по различным функциональным схемам. Отметим, что сложность

используемых алгоритмов обработки изображений ведет к значительному запаздыванию выдачи требуемых углов $\tilde{\theta}, \tilde{\varphi}$ поворота рамок кардана, что снижает точность сопровождения объектов. Кроме того, частота поступления кадров изображений меньше частоты выдачи информации с датчиков углов карданного подвеса, которая определяет точностные возможности используемых следящих приводов. Вполне очевидно, что введение статистического прогнозирования угловой траектории сопровождаемого объекта в целях компенсации запаздывания в выдаче результатов обработки изображения, повышения частоты выдачи заданных значений углов поворотов рамок кардана до частоты дискретизации датчиков углов поворотов, а также организации движения по прогнозу при пропадании информации об объекте ведет к существенному повышению точности сопровождения объекта. Целесообразно прогнозирование угловых траекторий объекта осуществлять в неподвижной системе координат $O\xi\eta\zeta$.

Для компенсации запаздывания, возникающего в системе, и увеличения частоты дискретизации следящих приводов представляет интерес схема, представленная на рис. 4, позволяющая реализовать указанный выше алгоритм.

Функциональная схема включает в себя следующие компоненты:

- вычислительное устройство (ВУ), содержащее блок обнаружения и определения координат (БООК), выполняющий сложный вычислительный алгоритм обработки изображения или последовательности изображений, сформированных ВД. Результатами такой обработки являются оценки $\tilde{N}_{XP}, \tilde{N}_{YP}$ координат N_{XP}, N_{YP} центра объекта в прямоугольной системе координат $X_1 O_1 Y_1$. Величины N и \tilde{N} исчисляются в пикселях матрицы изображения. Удобно время запаздывания τ , затрачи-

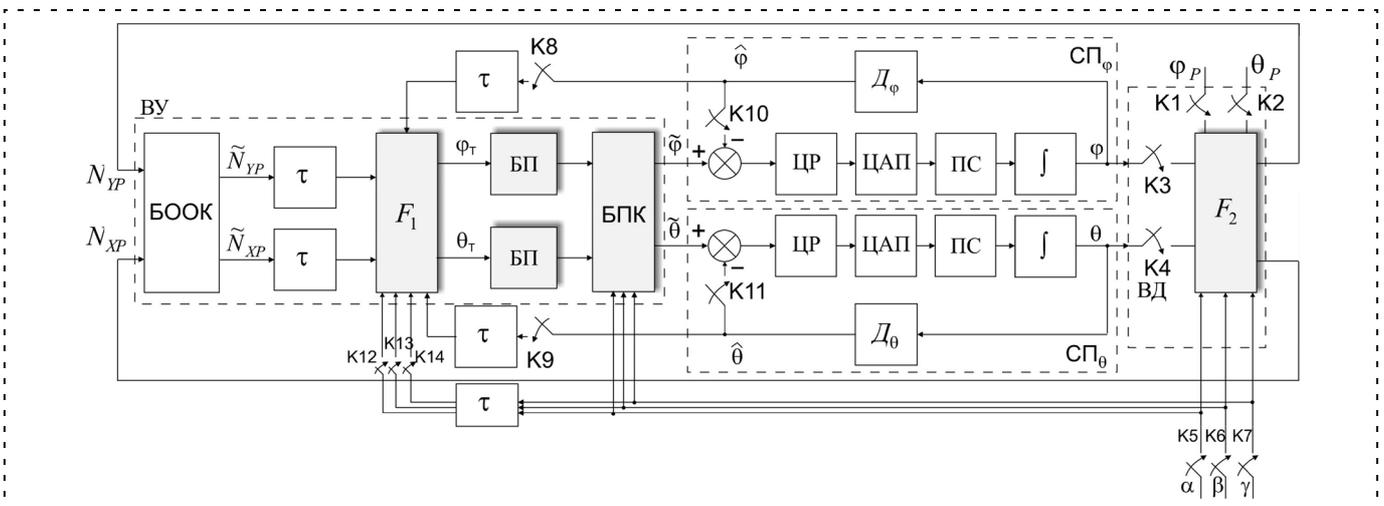


Рис. 4. Функциональная схема СВС

ваемое на вычисление \tilde{N}_{XP} , \tilde{N}_{YP} , учесть вводом элементов задержки на данное время (на схеме обозначены в виде $\lceil \tau \rceil$). Функциональный преобразователь координат F_1 (для удобства представлен отдельным вычислительным блоком) вычисляет угловые координаты направления на объект $\tilde{\theta}_T$ и $\tilde{\varphi}_T$ по текущим значениям \tilde{N}_{XP} , \tilde{N}_{YP} , $\hat{\varphi}$, $\hat{\theta}$, α , β и γ , где $\hat{\varphi}$, $\hat{\theta}$ (оценки датчиками углов D_θ , D_φ текущих углов поворота рамок кардана) и α , β , γ получены в момент фиксации кадра текущего изображения;

- блоки прогноза (БП), которые осуществляют прогнозирование на время τ запаздывающих оценок $\tilde{\varphi}_T$ и $\tilde{\theta}_T$ относительно моментов замыкания ключей K1, ..., K4, K8, K9, K12, ..., K14 и повышение частоты дискретизации задающих воздействий на следящие приводы до значения $f_2 = Kf_1$, где f_1 — частота формирования видеокадров; f_2 — частота дискретизации информации о текущих углах поворота рамок кардана и качки носителя; K — коэффициент повышения частоты дискретизации. Прогнозирование угловых координат объекта осуществляется методом наименьших квадратов по полиному первого или второго порядка;
- блок преобразования координат (БПК), который вычисляет требуемые углы поворота рамок кардана $\tilde{\theta}$, $\tilde{\varphi}$;
- цифровые регуляторы (ЦР) с цифроаналоговыми преобразователями (ЦАП), формирующие требуемые законы управления соответствующими следящими приводами. ЦАП выдают управляющие напряжения на соответствующие приводы скорости;
- электромеханические приводы скорости (ПС), предназначенные для поворота рамок двухосной карданной системы и имеющие, как правило, отрицательную обратную связь по скорости Ω_φ , Ω_θ углов поворотов φ и θ соответствующих рамок системы. Прямоугольники на схеме с обозначением интеграла определяют связь угла поворота соответствующей рамки с угловой скоростью ее вращения;
- ВД, представленный формально на функциональной схеме в виде функционального преобразователя F_2 , преобразующий координаты направления на объект φ_P , θ_P в неподвижно ориентированной системе координат, направления оптической оси ВД φ , θ в системе координат носителя и углы качки носителя α , β , γ в координаты N_{XP} , N_{YP} положения центра объекта на изображении;
- синхронно работающие ключи K1, ..., K4, K8, K9, K12, ..., K14 определяют моменты формирования изображений в ВД и моменты выдачи углов поворота рамок кардана и углов качки носителя в функциональный преобразователь F_1 . Частота замыкания ключей определяется частотой формирования кадров изображений и обычно имеет зна-

чение $f = 50$ Гц. Частота дискретизации ключей K5, ..., K7 определяется частотой измерения углов качки носителя соответствующими датчиками и углов поворота рамок кардана датчиками D_φ , D_θ .

Узлы, включающие ЦР, ЦАП, ПС, \int , D_φ , D_θ , ключи K10, K11, работающие на повышенной частоте дискретизации f_2 , и элементы сравнения представляют два следящих привода $СП_\varphi$ и $СП_\theta$, назначение которых сводится к согласованию угловых положений φ и θ оптической оси ВД с заданными значениями углов поворота $\tilde{\varphi}$ и $\tilde{\theta}$ соответственно.

При реализации СВС по предложенному варианту динамические свойства системы в целом определяются динамическими свойствами контуров следящих приводов $СП_\varphi$ и $СП_\theta$, которые не включают элементов запаздывания и работают на повышенной частоте дискретизации $f_2 > f_1$. При этом коэффициенты передачи внешних по отношению к $СП_\varphi$ и $СП_\theta$ разомкнутых контуров управления близки к единице, что дает возможность с помощью БП компенсировать запаздывание τ в каждом контуре без потери ими устойчивости.

В заключение отметим следующие моменты. Во-первых, введение статистического прогнозирования угловых траекторий в целях компенсации запаздывания в выдаче результатов вычисления координат объектов, повышения частоты выдачи заданных значений углов поворотов до частоты датчиков углов поворотов позволяет существенно повысить точность сопровождения объектов [5]. Во-вторых, по различным причинам возможно кратковременное пропадание информации о положении сопровождаемого объекта на изображении, что требует организации движения ВД по прогнозу. В-третьих, использование предложенного алгоритма формирования управляющих воздействий, учитывающего углы качки носителя, позволяет прогнозировать угловые траектории объекта в неподвижной системе координат $O\xi\eta\zeta$ с большой точностью как при наличии, так и кратковременном отсутствии информации о положении объекта на изображении.

Список литературы

1. Криксунов Л. З. Следящие системы с оптико-электронными координаторами. Кишинев: Техника, 1991. 156 с.
2. Алпатов Б. А., Балашов О. Е., Степашкин А. И. Формирование управления приводами трехосного карданного подвеса в системе сопровождения объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49. № 5. С. 24—28.
3. Математические основы теории автоматического регулирования / В. А. Иванов, В. С. Медведев, Б. К. Чемоданов, А. С. Ющенко. М.: Высш. шк., 1977. 518 с.
4. Бесекерский В. А., Фабрикант Е. А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации. Л.: Судостроение, 1968. 351 с.
5. Алпатов Б. А., Балашов О. Е., Степашкин А. И. Исследование ошибки сопровождения объектов системой видеосопровождения // Кибернетика и высокие технологии XXI века С&Т*2006. Тез. докл. 7-й междунар. науч.-техн. конф. Т. 1. Воронеж, 2006. С. 406—410.

УДК 62-5

Д. А. Шендрик, аспирант,
Г. А. Французова, д-р техн. наук, проф.,
 Новосибирский государственный
 технический университет

Подход к комплексному моделированию управляемой системы стабилизации оптической линии визирования

Обсуждается применение современных компьютерных технологий, в основе которых лежат прикладные пакеты программ, позволившие качественно изменить и существенно улучшить методику проектирования и исследования управляемой системы стабилизации оптической линии визирования. Предложен подход к комплексному моделированию, который дает возможность перевести методику исследования в виртуальную действительность, осуществить необходимые исследования с помощью качественных и количественных результатов.

Ключевые слова: система стабилизации оптической линии визирования (ССОЛВ), оптическая линия визирования (ОЛВ), двухмассовая система, комплексная модель, ПИД-регулятор.

Введение

Повышение точности и быстродействия оптико-электронных систем, устанавливаемых на подвижных объектах, приводит к необходимости применения систем стабилизации оптического изображения (ССОИ) линии визирования (ЛВ), обеспечивающих сохранение разрешающей способности оптики при различных режимах работы.

Система стабилизации оптической линии визирования (ССОЛВ) решает задачи автоматической стабилизации и управления в пространстве (в двух плоскостях) оптической линией визирования (ОЛВ) при различных возмущающих воздействиях [1, 2].

К современным системам предъявляются высокие требования по точности и скорости работы. Поэтому возникает необходимость разработки и исследования новых принципов построения систем управления ССОЛВ.

Система стабилизации и управления в пространстве ОЛВ, представляет собой очень сложную динамическую систему [3, 4]. Для проектирования эффективной системы управления необходимо знать точные динамические характеристики системы. Требуемые характеристики можно получить посредством проведения натурального эксперимента, но не всегда существует возможность проведения такого типа экспериментов. Альтернативой натуральному эксперименту могут быть программные средства. В настоящее время существуют эффективные пакеты программ, такие как *MatLab*, позволяющие проводить комплексный анализ сложных динамических систем.

Для качественной и количественной оценки работы каждого элемента системы предлагается использовать комплексное моделирование, которое позволяет всесторонне исследовать мехатронную систему, а также элементы управления. Предлагаемый подход к комплексному моделированию обеспечивает интеграцию всех модулей и звеньев системы в один программный комплекс, который, в свою очередь, функционирует как реальный объект исследований. Тем самым, появляется возможность работы с виртуальной моделью реальной системы.

Целью настоящей работы является исследование и анализ полученного математического описания управляемой ССОЛВ с помощью комплексного моделирования.

Постановка задачи

На первом этапе разработки комплексной модели адекватного математического описания ССОЛВ будем рассматривать процесс стабилизации ОЛВ только в одной плоскости — по вертикали. При этом функционально-кинематическая схема исследуемой системы имеет вид, показанный на рис. 1.

Как видно, система стабилизации ОЛВ по вертикали представляет собой совокупность двух составляющих: механической части и исполнительного механизма, которые связаны между собой посредством компенсирующего момента, создаваемого двигателем. При вращении на ССОЛВ помимо сил деформации действуют реактивные моменты, силы сухого и вязкого трения. Действие этих моментов и сил всегда направлено противоположно моменту двигателя.

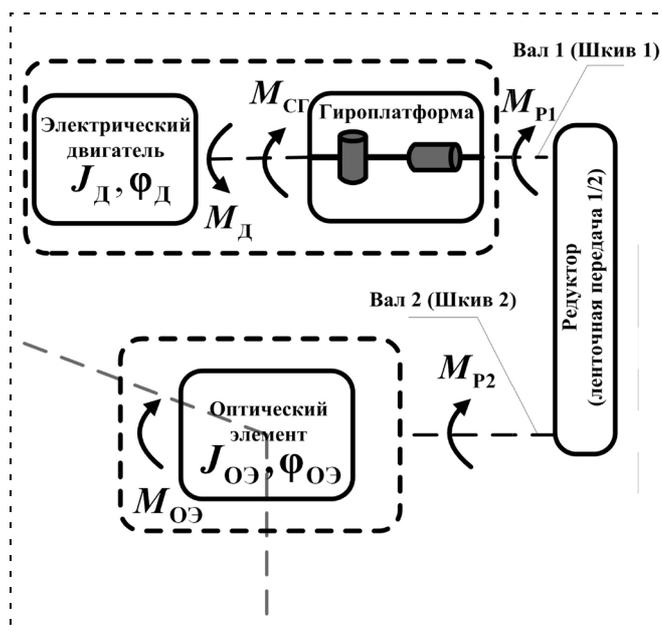


Рис. 1. Функционально-кинематическая схема ССОЛВ

Учитывая, что реактивные силы малы по сравнению с моментом M_d , развиваемым двигателем, и моментом сопротивления оптического элемента $M_{OЭ}$ (зеркала), для упрощения кинематической модели механической части этими силами можно пренебречь.

Поскольку по имеющимся результатам измерения спектра частот колебаний, действующих на механическую систему, доминирует одна частота $f = 1$ Гц, имеющая амплитуду $A = 3^\circ$, систему стабилизации ОЛВ с достаточной точностью при математическом описании можно рассматривать как классическую двухмассовую систему [5].

Целью данной работы была реализация в виде адекватной комплексной модели в пакете программ *MatLab R2006a* полученное математическое описание ССОЛВ и систему управления.

Расчетная схема динамической модели ССОЛВ

Расчетная механическая система (рис. 2) состоит из двигателя 1 (гироплатформа и ротор двигателя), редуктора и исполнительного устройства 2 (оптический элемент).

На рис. 2 приняты следующие обозначения: J_d и $J_{OЭ}^*$ — моменты инерции соответственно ротора электродвигателя (с приведенным моментом инерции гиросплатформы) и оптического элемента; C_1 и C_2^* — крутильные жесткости соответственно входного и выходного валов; M_d и $M_{OЭ}$ — моменты движущих сил и сил сопротивления (оптического элемента); угловые координаты φ_d — ротора двигателя, φ_1' — шестерни редуктора, φ_2' — колеса редуктора и $\varphi_{OЭ}^*$ — оптического элемента.

Согласно принятым допущениям [5] приведем движения всех подвижных звеньев системы к движению с частотой (или скоростью вращения) вала дви-

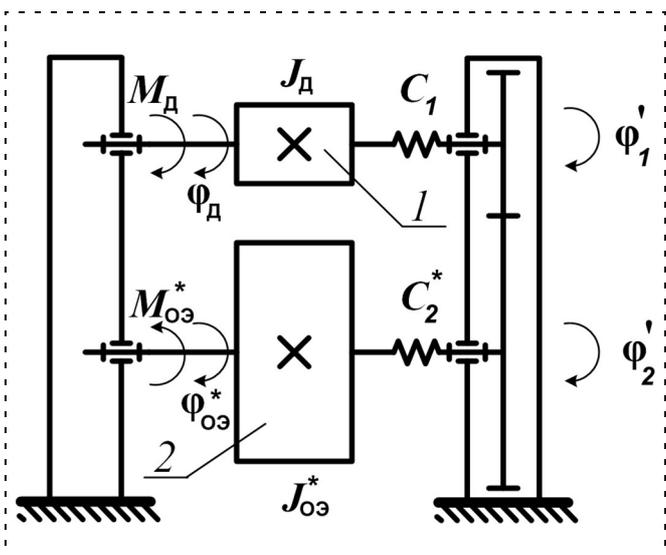


Рис. 2. Расчетная схема динамической модели ССОЛВ

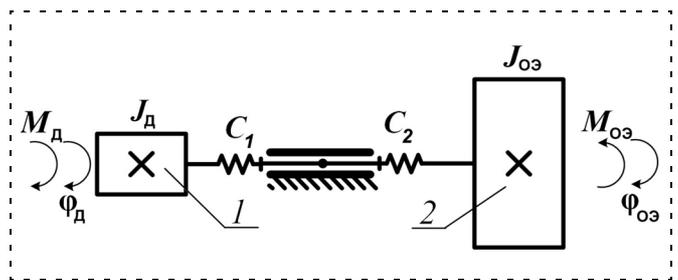


Рис. 3. Преобразованная расчетная схема динамической модели ССОЛВ

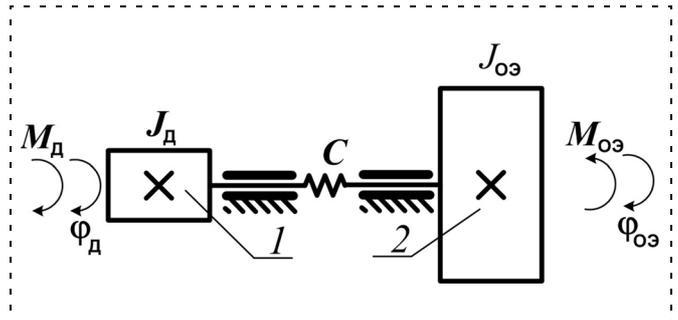


Рис. 4. Окончательная расчетная схема динамической модели ССОЛВ

гателя. Для этого определим приведенные жесткости, моменты сил и моменты инерции. При этом жесткости приводятся из условия равенства потенциальных энергий деформации, моменты сил — из условия равенства работ, моменты инерции — из равенства кинетических энергий. Передаточное отношение редуктора равно

$$i = \varphi_1' / \varphi_2'. \quad (1)$$

Будем рассматривать приведенные к одной скорости движения параметры системы. В этом случае приведенный момент инерции оптического элемента имеет вид $J_{OЭ} = J_{OЭ}^* / i^2$; приведенная крутильная жесткость выходного вала $C_2 = C_2^* / i^2$; приведенная угловая координата оптического элемента $\varphi_{OЭ} = \varphi_{OЭ}^* / i$; приведенный момент сопротивления на валу оптического элемента $M_{OЭ} = M_{OЭ}^* i$.

После приведения к одной частоте вращения расчетная схема динамической модели ССОЛВ принимает вид, изображенный на рис. 3.

Два последовательно соединенных элемента системы можно заменить одним эквивалентным, при этом суммируются податливости (величины, обратные коэффициентам жесткости) этих элементов:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \Rightarrow C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (2)$$

Окончательная расчетная схема ССОЛВ показана на рис. 4.

Положение звеньев динамической модели определяется двумя обобщенными координатами φ_d и $\varphi_{o\Omega}$. Уравнения движения динамической модели ССОЛВ запишем в виде условий кинестатического равновесия звеньев 1 и 2:

$$\begin{cases} J_{O\Omega} \ddot{\varphi}_{O\Omega} - c(\varphi_d - \varphi_{O\Omega}) = M_{O\Omega}; \\ J_d \ddot{\varphi}_d + c(\varphi_d - \varphi_{O\Omega}) = M_d. \end{cases} \quad (3)$$

Полученное описание (3) является базовым математическим описанием ССОЛВ.

Реализация полной модели системы

Полная модель системы включает в себя три основных блока (рис. 5): блок реализации алгоритма управления (Control Block); блок электропривода (Motor DBM); блок объекта управления (Mechanical Block).

Блок реализации алгоритма (рис. 6) представляет собой точный аналог программной реализации. В нем присутствует модель аналого-цифрового преобразователя (блок ADC), модель дискретного ПИД-регулятора (блок Discrete PID) и модель формирователя управляющих ШИМ-последовательностей (блок PWM). В модели АЦП осуществляется квантование по уровню входного сигнала и сигнала с датчика обратной связи с шагом квантования 90 мкс.

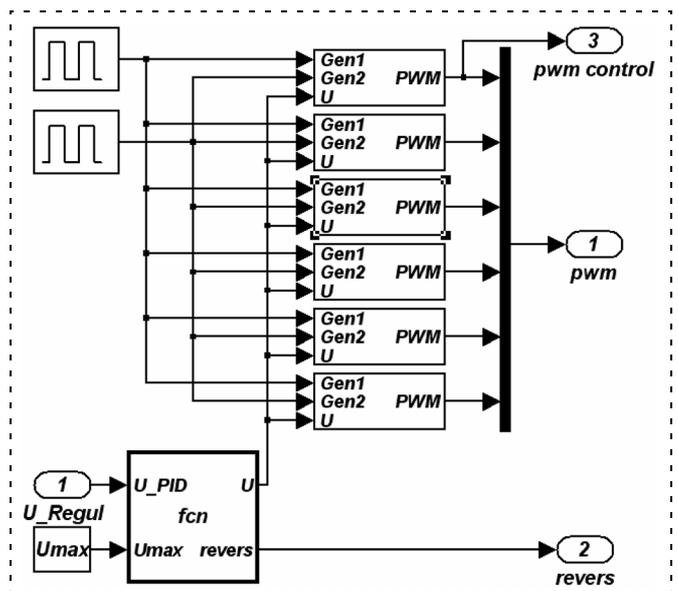


Рис. 7. Модель формирователя управляющих ШИМ-последовательностей

В блоке дискретного ПИД-регулятора реализован стандартный ПИД-регулятор, а его параметры рассчитаны с учетом требований, предъявляемых к динамике работы замкнутой системы. В блоке PWM реализован алгоритм формирования управляющих последовательностей и также сигнала реверса для работы электродвигателя. Выходные сигналы формируются посредством преобразования выходного сигнала ПИД-регулятора. Развернутая модель блока PWM представлена на рис. 7.

Блок PWM состоит из двух генераторов прямоугольных импульсов, блока нормирования входного сигнала и формирования сигнала реверса, шести выходных формирователей ШИМ-сигналов. Число выходных формирователей обусловлено числом силовых вентилях, необходимых для коммутации фаз электродвигателя.

Модель электропривода (рис. 8) включает в себя модели моментного двигателя (блок Permanent Magnet Synchronous Machine), модели силовых ключей (IGBT — биполярные транзисторы с изолиро-

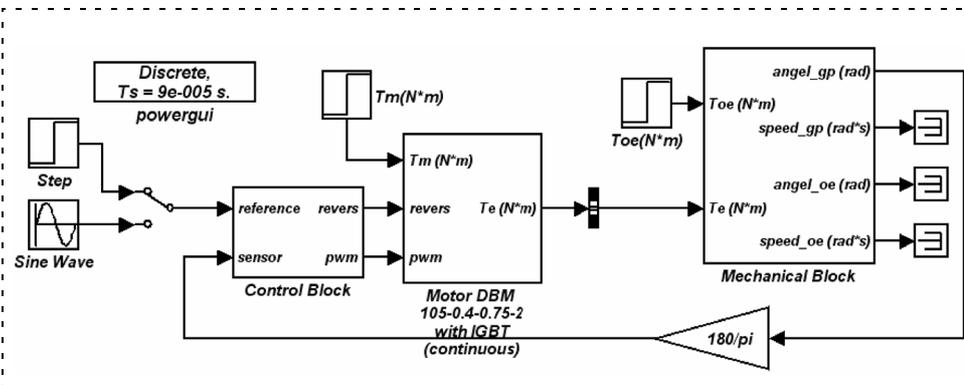


Рис. 5. Полная модель управляемой ССОЛВ

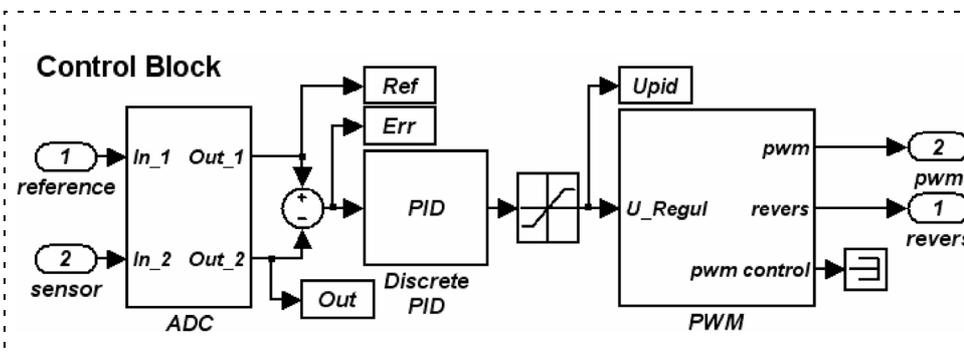


Рис. 6. Модель блока управления системой

ванном затвором) (блок Universal Bridge), модели декодера сигналов, поступающих с датчиков Холла (блок Decoder), модели драйвера силовых ключей (блоки Gates и PWM_Gates).

В качестве модели электродвигателя используется стандартная модель синхронного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов, которая имеется в пакете Simulink. Модель функционирует со справочными параметрами двигателя ДБМ 105-0,4-0,75-3 (рис. 9). В качестве силовых ключей также используется стандартная модель трехфазного IGBT-моста, с параметрами реальных силовых ключей (IRAMS10UP60A).

Декодер сигналов, поступающих с датчиков Холла, реализован в виде таблицы соответствий напряжения на датчиках Холла коммутируемым фазам. В модели управляющего силовыми ключами драйвера реализован алгоритм коммутации и реверсивного включения обмоток фаз электродвигателя, с учетом коэффициента заполнения ШИМ-последовательности.

Блок объекта управления (Mechanical Block) представляет собой программную реализацию в виде модели системы уравнений (3). Развернутая модель этого блока представлена на рис. 10.

Инициализация работы полной модели осуществляется с помощью исполняемого файла инициализации параметров системы, таких как параметры дискретного ПИД-регулятора, шага дискретизации системы, а также параметров работы всех остальных блоков. Файл инициализации позволяет централизованно изменять параметры системы, осуществлять их перебор для подбора оптимального результата. Полученная полная модель системы может быть легко интегрирована с системой трехмерной анимации (Virtual Reality Toolbox), что позволяет непосредственно наблюдать за функционированием системы.

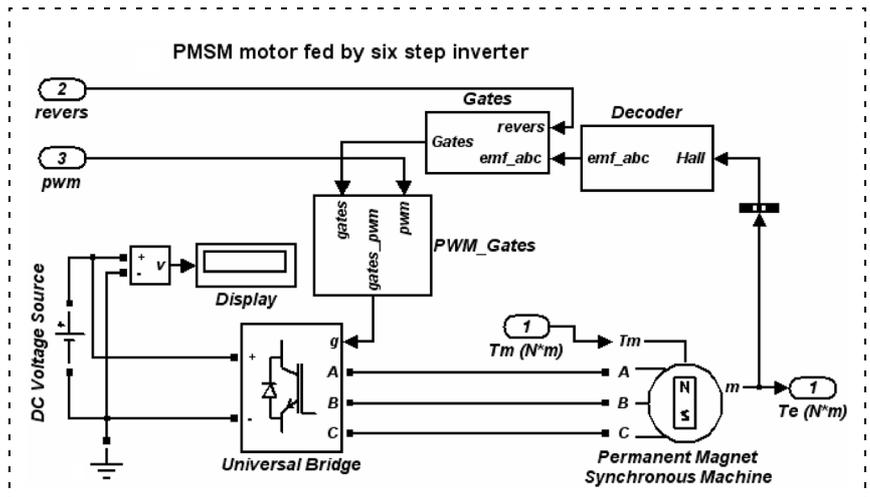


Рис. 8. Модель электропривода

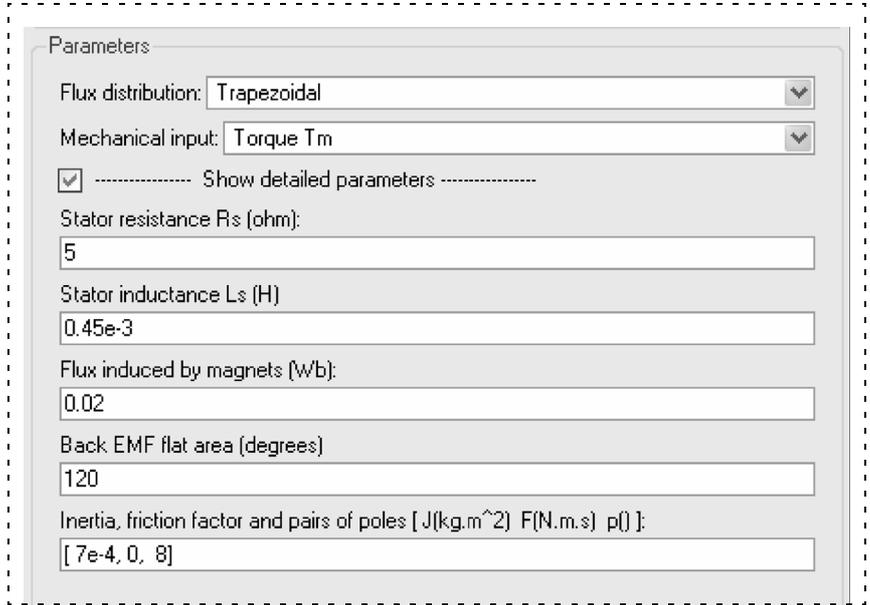


Рис. 9. Окно инициализации параметров электродвигателя

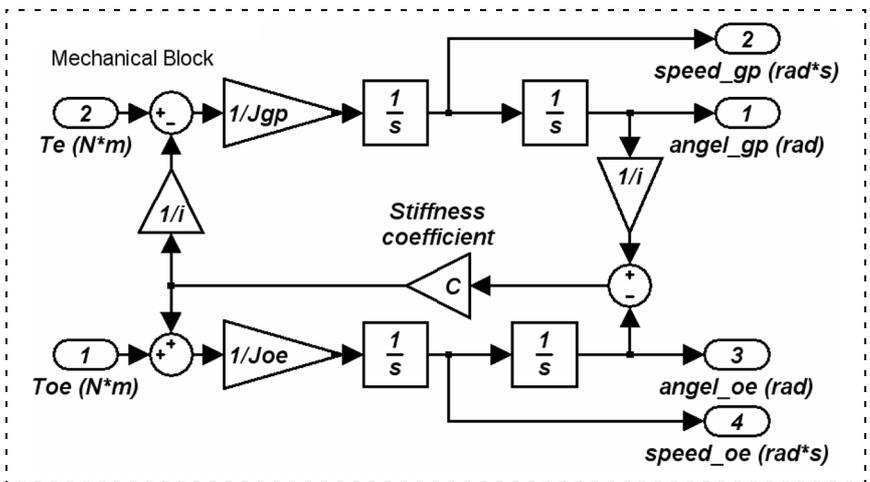


Рис. 10. Модель объекта управления

Результаты численного моделирования

Функционирование полной модели позволило достаточно эффективно проанализировать динамические характеристики работы системы. Кроме того, удалось рассчитать параметры адекватной системы управления, эффективно работающей во всех требуемых режимах. Например, на рис. 11, 12 представлены графики переходных процессов работы системы в режиме обработки входного сигнала системы и в ре-

жиме стабилизации соответственно. Комплексное моделирование позволило проанализировать работу всех звеньев в замкнутой системе.

Комплексная модель системы позволяет получить графики переходных процессов практически любого звена, модуля или совокупности модулей макета ССОЛВ. В результате всегда есть возможность эффективно исследовать систему управления, а также влияние каждого звена на ее работу.

Заключение

Полученные в ходе комплексного моделирования результаты доказывают эффективность предложенного метода, в котором реализована идея комплексной модели, объединяющей и объект, и систему управления. Аналитически-численный метод, составляющий основу комплексного подхода к моделированию сложных динамических систем, обладает необходимыми для этого расчетными схемами и вычислительными алгоритмами, а его функциональные возможности позволяют провести всестороннее и полное исследование собственных свойств и особенностей объекта моделирования, включая элементы системы управления. Все расчеты и преобразования, сопровождающие процесс моделирования динамических систем, включая формирование их моделей различной степени сложности, хорошо формализованы и корректным образом согласованы, представляя в совокупности с программным обеспечением единый проблемно-адаптируемый комплекс моделирования.

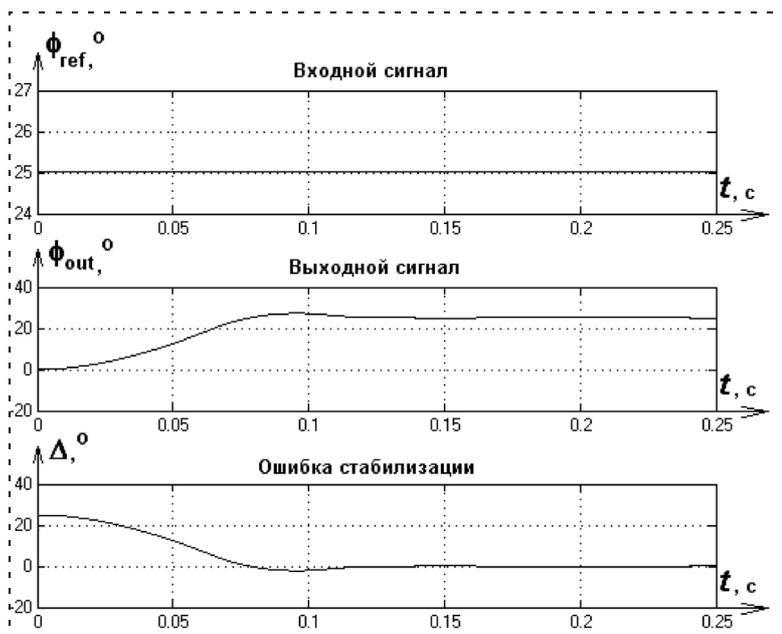


Рис. 11. Переходные процессы по угловому положению гироскопа в режиме обработки входного сигнала

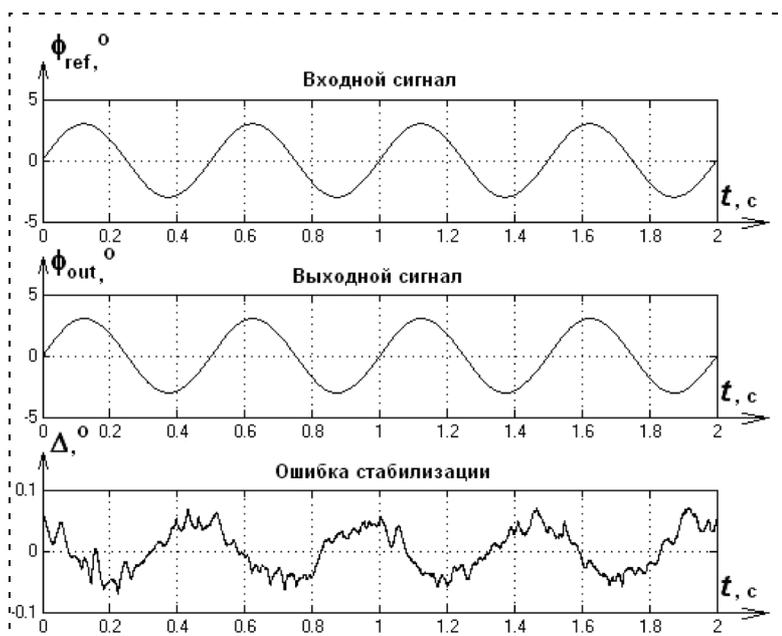


Рис. 12. Переходные процессы по угловому положению гироскопа в режиме стабилизации

Список литературы

1. Lee T. H., Tan K. K., Lee M. W. A variable structure-augmented adaptive controller for a gyromirror line-of-sight stabilization platform // *Mechatronics*. Vol. 8. Issue 1. February 1998. P. 47–64.
2. Tan K. C., Lee T. H., Khor E. F., Ang D. C. Design and real-time implementation of a multivariable gyro-mirror line-of-sight stabilization platform // *Fuzzy Sets and Systems*. Vol. 128. Issue 1. 16 May 2002. P. 81–93.
3. Шендрик Д. А., Французова Г. А. Применение оптических компенсаторов в системе подстабилизации оптической линии визирования // *Мат. VIII междунар. конф. АПЭП-2006*. Т. 7. 2006. С. 267–271.
4. Филонов М. П., Родионов В. И., Аджиев В. С. Математическое описание системы стабилизации изображения оптических приборов с учетом динамики зеркала // *Изв. ТулГУ. Сер. "Проблемы специального машиностроения"*. Тула, 2001. Вып. 5 (2). С. 69–72.
5. Бургин Б. Ш. Анализ и синтез двухмассовых электромеханических систем. Новосибирск: Изд-во Новосибирск. электротехн. ин-та. 1992. 199 с.

ТЕСТИРОВАНИЕ И НАДЕЖНОСТЬ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

УДК 004.41:621.01

Д. А. Короткий, канд. техн. наук, инженер,
А. Б. Устименко, инженер, **Д. В. Ренжин**, инженер,
Технический университет г. Мюнхен (Германия)

Универсальная архитектура тестовой системы для функционального тестирования встроенного программного обеспечения мехатронных устройств

Рассматривается универсальная архитектура тестовой системы, позволяющая структурировать тестовые инструментари, применяемые в процессе разработки мехатронных устройств. Архитектура тестовой системы определяет пять функциональных уровней и обеспечивает возможность повторного использования уже реализованных тестовых компонентов, таких как тестовые сценарии, тестовые инструментари и окружение объекта тестирования.

Ключевые слова: мехатроника, встроенное программное обеспечение, функциональное тестирование, систематизация тестовых инструментариев.

Введение

Разнообразие мехатронных устройств простирается от потребительских товаров до продукции автомобильной промышленности и сложных промышленных установок. Встроенное программное обеспечение мехатронных устройств дает возможность с наименьшими затратами реализовать дополнительную функциональность и таким образом позволяет производителям удовлетворить растущие требования заказчиков.

Многосторонняя междисциплинарная взаимосвязь между механикой, электроникой и информатикой обуславливает сложность процесса разработки мехатронных устройств. Для своевременного выявления и значительного уменьшения рисков, связанных с разработкой таких устройств, используются аналитические методы контроля качества.

Применение динамических методов контроля качества, включающих *функциональное тестирование**, позволяет определить соответствие функциональности разрабатываемого устройства *системным требованиям*. Функциональное тестирование проводится *методом черного ящика* и применяется на различ-

* Используемые термины приведены в **Приложении** к статье.

ных этапах разработки: при изолированном рассмотрении программных компонентов, их интеграции в исполняемый программный код, при слиянии программного и аппаратного обеспечения в информационно-техническую подсистему с последующей интеграцией с механическими частями, а также для тестирования готового мехатронного устройства (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

Автоматизация теста позволяет добиться экономической эффективности при проведении функционального тестирования за счет снижения объема работ, выполняемых разработчиками и тестирующими мехатронных устройств. Кроме того, автоматизация теста дает возможность с наименьшими затратами времени и ресурсов воспроизвести и повторить большое число тестов, что важно при проведении *регрессионного тестирования* в процессе разработки. За последнее время для автоматизации теста были созданы различные *тестовые инструментари*, ориентированные на конкретные этапы процесса разработки и на решение специфических задач фирм-разработчиков мехатронных устройств. Для функционального тестирования сложных мехатронных устройств часто используют несколько различных инструментариев на каждом этапе процесса разработки. Многообразие применяемых инструментариев увеличивает затраты на сопровождение и поддержку, а также на необходимую подготовку персонала. В то же время несовместимые интерфейсы между инструментариями делают невозможным проведение непрерывного *процесса тестирования* при разработке мехатронных устройств. Это снижает эффективность всего процесса тестирования и значимость проведения функционального тестирования как меры обеспечения контроля качества при разработке мехатронных устройств.

Так как принципиальные требования к различным тестовым инструментариям в течение всех этапов разработки совпадают, то, сгруппировав такие требования, можно разработать унифицированную тестовую систему (инструментарий) с универсальной архитектурой. Для решения этой проблемы сотрудники кафедры "Информационная техника в машиностроении" Технического университета г. Мюнхен под руководством проф. К. Бендера в рамках проекта "TeSiM" ввели определение универсальной архитектуры тестовой системы. Применение архитектуры поможет сократить значительную часть затрачиваемых времени и ресурсов для проведения функционального тестирования.

Объект и цель тестирования

Главными пунктами при рассмотрении архитектуры тестовой системы является выявление объекта и определение цели тестирования. Целью тестирования является проверка правильности выполнения функциональных системных требований. На основе этих требований формируются *тестовые сценарии*. Каждый тестовый сценарий связан с конкретным системным требованием, каждое требование — с конкретным объектом тестирования (рис. 2).

В рамках научно-исследовательского проекта TeSiM рассматривается процесс разработки мехатронных устройств. Встроенное программное обеспечение на различных этапах процесса разработки рассматривается далее как объект тестирования.

При определении универсальной архитектуры тестовой системы необходимо учитывать, что в процессе разработки интерфейсы доступа к объекту тестирования изменяются в зависимости от конфигурации его окружения. Кроме того, на различных этапах разработки могут появляться дополнительные функциональные требования к объекту тестирования.

На ранних этапах разработки программное обеспечение рассматривается изолированно (рис. 1, см. вторую сторону обложки). Использование программных *симуляторов* позволяет смоделировать окружение и провести функциональное тестирование в новых условиях, имитирующих динамический режим работы объекта тестирования. Для автоматизации теста связь с объектом тестирования осуществляется через предоставляемые симулятором интерфейсы *взаимодействия процессов*. Хотя программный симулятор влияет на поведение объекта тестирования, сам он рассматривается лишь как окружение, необходимое для проведения функционального тестирования.

В процессе разработки происходит последовательная интеграция программного обеспечения и электроники в информационно-техническую подсистему, а позже совместно с механическими компонентами — в готовое мехатронное устройство, как это показано на рис. 1. Таким образом изменяются окружение и интерфейсы объекта тестирования, а именно, становится возможным использовать информационно-технические и физические интерфейсы. Несмотря на влияние окружения (механических и электронных компонентов) на поведение объекта тестирования самим объектом тестирования остает-



Рис. 2. Взаимосвязи между объектом тестирования, системными требованиями и тестовыми сценариями

ся программное обеспечение. Если причиной невыполнения системных требований является *отказ* при совместной работе окружения и объекта тестирования, то необходимо проведение диагностики.

Набор тестовых сценариев

С учетом многообразия мехатронных устройств и изменения конфигурации окружения встроенного программного обеспечения в течение процесса разработки универсальная тестовая система должна удовлетворять многочисленным требованиям. Эти требования можно представить в виде различных наборов тестовых сценариев. Например, при проведении сертификационного тестирования PROFIBUS-устройств (системный уровень на рис. 1, см. вторую сторону обложки) возможны два набора сценариев: проверка на соответствие спецификации и на функциональную совместимость. Другим примером является функциональное тестирование на этапе информационно-технической интеграции (подсистемный уровень на рис. 1) такой сложной мехатронной системы, как высокопроизводительное печатное оборудование (скорость печати порядка 800 страниц в минуту формата А4). В этом случае требуется контроль взаимодействия и синхронизация всех компонентов оборудования, включая систему управления приводами, блок высокого напряжения, контроллер шины данных и прочее. Компоненты, относящиеся к аппаратной части, являются окружением, а встроенное программное обеспечение — объектом тестирования. Для проверки их совместной работы согласно спецификации для каждого компонента должен быть определен, по крайней мере, один набор тестовых сценариев (позитивные и негативные сценарии) исходя из функциональных требований.

Как показывают оба представленных примера, конкретный набор тестовых сценариев определяется в зависимости от этапа процесса разработки и целей тестирования. При этом объект тестирования в процессе разработки остается неизменным — встроенное программное обеспечение, а цели тестирования можно систематизировать, например, в соответствии с категориями, представленными в стандарте ISO 9126 (точность, эффективность, надежность и др.).

Архитектура тестовой системы

На основе многолетнего опыта и исследований в области аналитического контроля качества в рамках проекта "TeSiM" была определена универсальная архитектура тестовой системы, представленная на рис. 3 (см. вторую сторону обложки).

Архитектура тестовой системы расширяет классическое представление тестовой системы, состоящей из тестового автомата и тестовой среды, и пред-

ставляется в виде пяти функциональных уровней. На верхнем уровне архитектуры решаются, главным образом, организационные и административные задачи (диспозитивные задачи), в то время как нижний уровень находится в непосредственном контакте с объектом тестирования (оперативные задачи). Кроме того, в архитектуре представлено изменение объема данных (тестовые сценарии, тестовые отчеты, план тестирования, информация о конфигурации и т. п.) и скорости их обработки. Так, *управление тестами* не критично по времени ввиду ограничений, связанных со скоростью работы человека, а стимуляция и наблюдение, напротив, напрямую зависят от времени реакции объекта тестирования и лежат в области микро- и миллисекунд, что возможно достичь только при автоматическом выполнении теста.

Тестовый автомат

Архитектура тестовой системы включает два функциональных уровня тестового автомата (рис. 3, см. вторую сторону обложки), расширяя круг решаемых им задач от выполнения тестовых сценариев, организации тестовых журналов и обработки тестовых отчетов до администрирования всего процесса тестирования, а также планирования ресурсов и времени.

Управление тестами. Уровень управления тестами решает задачи организационно-административного характера и предоставляет пользовательский интерфейс для управления тестовой системой. Согласно стандарту IEEE 829 уровень отвечает за планирование, подготовку и конфигурацию процесса тестирования. Сюда же относится, например, спецификация тестовых сценариев и их реализация на подходящем языке программирования или в виде тестового скрипта. В административные задачи входят группировка, конфигурирование и параметрирование тестовых сценариев.

Для эффективного решения задач уровня управления тестами целесообразно использовать

- редактор для создания, внесения изменений, сохранения и загрузки тестовых сценариев;
- управление версиями тестовых сценариев, отчетов и конфигурации окружения и объекта тестирования (помогает при проведении регрессионного тестирования);
- контроль за ходом тестирования (позволяет связать проверку функциональных требований с выполнением тестовых сценариев и своевременно выявить отклонение от плана тестирования — дефицит ресурсов);
- оценку рисков (позволяет расставить приоритеты в последовательности выполнения тестовых сценариев и тем самым сократить затраты времени на проведение тестирования).

Уровень управления тестами необходим не только при автоматизированном тестировании, но может оказать значительную поддержку пользователю при тестировании вручную.

Выполнение и оценка тестов. На уровне выполнения и оценки тестов реализуются отдельные тестовые сценарии в соответствии с их описанием и дается оценка реакций объекта тестирования на его стимуляцию. Для этого тестовые сценарии разбиваются на отдельные тестовые шаги тестирования и передаются для непосредственного выполнения в тестовой среде. Наблюдаемые реакции тестового объекта протоколируются и сравниваются с заданными в тестовом сценарии ожидаемыми значениями. На основе сравнения наблюдаемого и ожидаемого поведения объекта тестирования можно вынести решение об успешности выполнения тестового сценария (пройден/не пройден). Тестовые сценарии должны быть описаны в пригодной форме для их автоматической обработки. Тестовый отчет, включая результат тестирования, передается затем на уровень управления тестами для администрирования.

Тестовая среда

Тестовая среда окружает объект тестирования и связывает его с различными уровнями архитектуры тестовой системы. Тестовая среда включает три уровня: управление тестовой средой, стимуляция и наблюдение объекта тестирования и окружение объекта тестирования.

Управление тестовой средой. На уровне выполнения и оценки тестов тестовые сценарии разбиваются на отдельные шаги: выработку сигнала (стимуляция), настройку компонента тестовой среды или чтение и анализ сигнала (наблюдение) объекта тестирования. Система управления тестовой средой гарантирует корректное выполнение тестовых шагов за счет воздействия на существующие компоненты тестовой среды, представленные на рис. 4 (см. вторую сторону обложки).

Другой важной задачей системы управления тестовой средой является отделение уровня выполнения и оценки тестов от уровней окружения объекта тестирования и его стимуляции (рис. 3, см. вторую сторону обложки). Последнее необходимо при проведении функционального тестирования с учетом требований соблюдения ограничений по времени. Примером такого разделения может являться размещение системы управления тестовой средой на независимой от тестового автомата платформе для обработки данных в режиме реального времени, что, в свою очередь, требует четкого определения интерфейсов между системой управления тестовой средой и уровнем выполнения и оценки тестов.

Таким образом, задачами уровня управления тестовой средой являются: конфигурация и инициализация

зация тестовой среды, администрирование и синхронизация работы компонентов тестовой среды, выполнение команд тестового шага, а также обеспечение корректной работы обмена данными между тестовым автоматом и тестовой средой. В случае сбоев, например, при разрыве связи между тестовым автоматом и тестовой средой или при некорректном поведении компонентов системы управления тестовой средой должна обеспечивать принятия соответствующих контрмер.

Стимуляция и наблюдение объекта тестирования.

Архитектура тестовой системы включает функциональный уровень стимуляции и наблюдения объекта тестирования, на котором команда записи значения переменной преобразуется в сигнал стимуляции, а команда чтения преобразует наблюдаемый сигнал в значение переменной тестового сценария. Для достижения этой цели компоненты стимуляции и наблюдения должны с достаточной гибкостью взаимодействовать с доступными интерфейсами и окружением объекта тестирования.

На рис. 4 (см. вторую сторону обложки) представлены компоненты тестовой среды, реализующие следующие функции:

- стимуляция (С) — обеспечение программного доступа к параметрам компонентов окружения объекта тестирования для установки значений параметров имитационной модели, послыки команд объекту тестирования или для запуска генератора ШИМ-сигнала и т. п.;
- генерация сигналов (Г) — фактическая выработка сигналов для воздействия на объект тестирования, например, сетевого пакета данных, ШИМ-сигнала, цифрового или аналогового сигнала;
- возмущения и помехи (В) — воспроизводимое изменение сигнала, для приближения поведения окружения объекта тестирования к реальным условиям и вызова определенных ошибок, например, при использовании заведомо неверных данных;
- прием сигналов (П) — прием цифровых и аналоговых сигналов;
- анализ сигналов (А) — преобразование цифровых и аналоговых сигналов в приемлемую форму для последующей обработки на верхних уровнях архитектуры тестовой системы (рис. 3, см. вторую сторону обложки);
- контроль сигналов (К) — непрерывная проверка граничных значений сигналов;
- наблюдение (Н) — обеспечение программного доступа к параметрам компонентов окружения объекта тестирования для считывания принятых сигналов, значений переменных объекта тестирования, параметров имитационной модели и т. п.

В зависимости от этапа процесса разработки и окружения объекта тестирования к компонентам тестовой среды предъявляются различные требования.

Окружение объекта тестирования. Как уже отмечалось ранее, основным объектом тестирования является встроенное программное обеспечение мехатронных устройств. Окружение объекта тестирования позволяет придать статичному программному обеспечению динамическое, а значит подходящее для тестирования, состояние. В процессе разработки мехатронных устройств программное обеспечение как объект тестирования может быть выполнено в программной среде, имитирующей работу микроконтроллеров, на оценочной плате (evaluation board) или на прототипах мехатронных продуктов. При этом для объекта тестирования не должно существовать отличий в обмене сигналами с реальными окружением и тестовой средой. Необходимые для выполнения встроенного программного обеспечения компоненты, недоступные на момент тестирования, должны быть заменены их моделями. С помощью имитационных моделей можно воссоздать, например, отдельные части мехатронного устройства, имитационную модель технического процесса или модели механических и электромеханических компонентов.

Схема применения

На рис. 5 представлена схема применения универсальной архитектуры тестовой системы. Первым шагом является определение тестируемой функциональности или части встроенного программного обеспечения (ПО) (например, пользовательский интерфейс, стек протоколов, ПО управления двигателем и др.). Кроме того, необходимо выбрать как минимум один набор тестовых сценариев с информацией о цели тестирования (функциональность, безопасность, надежность и др.), этапе разработки мехатронного устройства (рис. 1, см. вторую сторону обложки) и доступных интерфейсах окружения объекта тестирования. В результате полученная информация упрощает выбор существующих тестовых инструментариев для создания тестовой системы. При этом с учетом требований рассматриваемого набора тестовых сценариев проводится адаптация

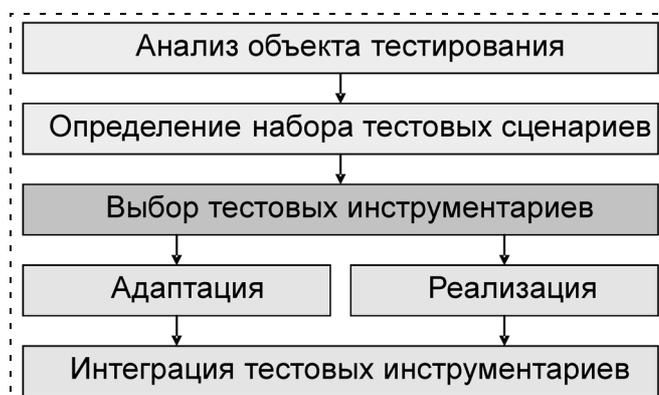


Рис. 5. Схема применения архитектуры тестовой среды

и реализация необходимых инструментариев с последующей интеграцией в унифицированную тестовую систему.

Для апробации рассмотренной универсальной архитектуры тестовой системы в рамках проекта были разработаны демонстраторы в виде тестовых стендов встроенного ПО мехатронных устройств на различных этапах разработки. В результате проведенного анализа на основе рассмотренных функциональных уровней архитектуры тестовой системы в качестве инструментариев были выбраны MoTest (тестовый автомат) и LabVIEW (тестовая среда). Интеграция этих инструментариев в тестовую систему подтверждает верность представленной архитектуры тестовой системы.

Заключение

С помощью введенных функциональных уровней представленная архитектура тестовой системы помогает структурировать тестовые инструментарии, необходимые для проведения функционального тестирования на всех этапах разработки мехатронных устройств. Так, уже реализованная функциональность отдельного инструментария может быть повторно использована в течение процесса тестирования. Сгруппировав такие инструментарии вместе с доступными профессиональными решениями, можно реализовать унифицированную тестовую систему. Таким образом, снижаются затраты и увеличивается эффективность проведения всего процесса тестирования при разработке мехатронных устройств.

Приложение

Функциональное тестирование — тестирование, основанное на анализе спецификации функциональности компонента или системы.

Системные требования — требования, предъявляемые к компоненту или системе, которые должны быть достигнуты для удовлетворения контракту, стандартам, спецификации, техническому заданию или другим формальным документам.

Автоматизация теста — использование ПО в процессе проведения или поддержки тестов (например, для управления тестами, разработки дизайна тестов, выполнения тестов или проверки результатов).

Регрессионное тестирование — тестирование программ, которые уже были протестированы, после модификаций для гарантии, что ошибки не были введены в неизменных и ранее протестированных областях в результате изменений.

Тестовый инструментарий — программный продукт который поддерживает один или несколько аспектов тестирования, такие как планирование и контроль, спецификация, создание начальных файлов и данных, выполнение и анализ тестов.

Процесс тестирования — фундаментальный процесс тестирования, включающий планирование, спецификацию, выполнение, запись и проверку на полноту.

Тестирование методом черного ящика — тестирование, функциональное или нефункциональное, без знания внутренней структуры компонента или системы.

Тестовый сценарий — набор входных значений, предусловия выполнения, ожидаемые результаты и постусловия, разработанные для конкретной цели или тестового условия, такого как выполнение конкретного программного пути или проверки соответствия специфическим требованиям.

Симулятор — устройство, программа или система, используемая в процессе тестирования, которая ведет себя так же, как данная система при одинаковых входных данных.

Взаимодействие процессов — термин, охватывающий все методы передачи данных между программами, исполняющимися на одном компьютере в многозадачной операционной системе, или программами, выполняемыми в сетевой вычислительной среде, включая каналы (pipes), очереди, разделяемую память, Clipboard, DDE и OLE

Отказ — фактическое отклонение компонента или системы от ожидаемого действия, эксплуатации или результата.

Управление тестами — планирование, оценка, мониторинг и контроль активности по тестированию, управляемые менеджером тестов.

Тестовая среда — среда, содержащая аппаратные средства, инструментарии, стимуляторы, программный инструментарий и другие необходимые для проведения теста элементы.

Список литературы

1. Bender K., Dominka S., Koç A., Pöschl M., Russ M., Stützel B. Embedded Systems — qualitätsorientierte Entwicklung. München: Springer, 2005.
2. Bender K., Jack P., Koç A., Péter I., Megyeri G. Qualitätssicherung eingebetteter Software: Methoden und Best-Practices. 1. Auflage. München: Utz, 2001 (Informationstechnik im Maschinenwesen).
3. Bender K., Korotkiy D., Russ M. Testsystem-Architektur für mechatronische Produkte // QZ: Qualität und Zuverlässigkeit. 2007. N 10. S. 80.
4. Gentner T., Beyer H., Spircu C., Grams H., Schuster J. Entwurf einer Ebenenstruktur für die Modellierung einer neuen Testerarchitektur. In: FIEBIG, T. (Hrsg.); GLAUERT, W. (Hrsg.): 15th ITGWorkshop Testmethods and Reliability of Circuits and Systems. Timmendorfer Strand, 23—25. März 2003.
5. Jack P., Koç A., Russ M. Systematisches Testen softwareintensiver mechatronischer Produkte: Methodik u. Fallbeispiel. MSy'02 Embedded Systems in Mechatronics, Winterthur, Schweiz, 3/4. Oktober 2002. S. 207—214.
6. Короткий Д., Русс М., Штютцель Б. Трехуровневая модель процесса разработки мехатронных устройств // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 8. С. 33—36.
7. Van Veenendaal E., Black R., Litz T. et al. Standard glossary of terms used in Software Testing. Version 1.2. International Software Testing Qualification Board, 2006. Online Ressource, Abruf: 2007-02-21.

УДК 621.865.8

Б. А. Миронов, студент,
С. И. Филиппов, канд. техн. наук, проф.,
 Ковровская государственная технологическая
 академия им В. А. Дегтярева

Выбор метода определения надежности программных средств мехатронных систем

Проанализированы различные методы определения надежности программного обеспечения, выбран наиболее удобный метод расчета надежности, который позволяет существенно сократить время тестирования ПО при заданной вероятности безошибочной работы, а следовательно, выбрать наиболее рациональный путь проведения работ по отладке ПО при минимизации затрат на его проведение.

Ключевые слова: мехатроника, надежность, программное обеспечение, надежность программного обеспечения, метод расчета надежности.

Введение

В настоящее время основным трудоемким этапом разработки мехатронных систем является создание программного обеспечения, поэтому с особой актуальностью встает вопрос обеспечения надежности создаваемого программного обеспечения.

Анализ последствий программных отказов показывает, что потеря работоспособности программных средств может нанести пользователям средств вычислительной техники гораздо более серьезный ущерб, чем неоптимальный уровень других характеристик. Вклад надежности в эффективность использования программных средств (ПС) достигает 90 %. Отсутствие методов и средств оценки надежности программной продукции сдерживает развитие производства ПС. Проведение работ по оценке надежности разработанных ПС, выбору рационального объема работ по их тестированию позволяет в условиях ограниченного времени и финансирования при создании ПС выбрать правильную стратегию тестирования. Целью данной статьи является обсуждение выбора метода исследования надежности ПС.

При применении понятия надежности к ПС следует учитывать следующие отличия этих объектов от традиционных технических систем, для которых первоначально разрабатывалась теория надежности:

- не для всех видов программ применимы понятия и методы теории надежности, их можно применять только к ПС, функционирующим в реальном времени и непосредственно взаимодействующим с внешней средой;

- при разработке и оценке качества программных компонентов к ним не применимы понятия надежности функционирования, если при обработке информации они не используют значения реального времени и не взаимодействуют непосредственно с внешней средой;
- доминирующими факторами, определяющими надежность программ, являются дефекты и ошибки проектирования и разработки, и второстепенное значение имеет физическое разрушение программных компонентов при внешних воздействиях.

Выбор характеристик и оценка качества программных средств — лишь одна из задач в области обеспечения качества продукции, выпускаемой компаниями-разработчиками ПС. Комплексное решение задач обеспечения качества ПС предполагает разработку и внедрение той или иной системы управления качеством. В мировой практике наибольшее распространение получила система, основанная на международных стандартах серии ISO 9000, включающей ряд документов, в том числе стандарт, регламентирующий обеспечение качества ПО (ISO 9000/3). Эти стандарты должны служить руководством для специалистов, разрабатывающих ПС.

Анализ методов исследования надежности

Если следовать сложившейся практике, то рассматриваются два компонента ПС: собственно программа (исполняемый код) и программная документация в виде описаний, инструкций и текста программы. Мы сконцентрируемся на рассмотрении проблемы надежности самой программы, поэтому далее термин программа и ПС следует считать синонимами.

Под надежностью ПС понимается его способность при эксплуатации в составе программно-технического комплекса выполнять заданные функции с требуемым уровнем качества в заданных условиях в течение заданного времени. Невыполнение требуемой функции с требуемым качеством в течение требуемого промежутка времени будем называть отказом ПО. ПС не подвержено физическому износу или старению, и его отказы являются следствием дефектов, внесенных в содержание программы в процессе постановки и решения задачи его создания или модификации, а также в результате неполного описания условий применения алгоритмов, реализуемых ПС.

Сложным ПС будем называть ПС, для которого нельзя полностью протестировать все выполняемые им функции на всем множестве входных условий (данных). Причиной невозможности полностью протестировать (обеспечить полное тестовое покрытие) ПС является ограниченность ресурсов, кото-

рые можно выделить для испытаний программы. Надежности ПС посвящено большое число работ [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Если методы решения задачи повышения надежности программы посредством проведения последовательного ряда процедур доработки, верификации и валидации на каждом из этапов жизненного цикла хорошо разработаны, в том числе и в рамках отраслевых и международных стандартов, то количественная оценка достигнутых результатов встречает определенные трудности. В некоторых работах выражено скептическое отношение к самой возможности получения заслуживающих доверие количественных оценок надежности для ПС. В тех же работах, где не отвергается принципиальная возможность получения количественной оценки надежности программы, в основном используется подход, основанный на сборе и последующей статистической обработке данных об отказах программы в целях построения некоторой модели среднего числа проявлений ошибок за время t в версии.

Далее рассмотрим некоторые подходы для оценки надежности ПС.

Методика тестирования

Тестирование — исследование процесса выполнения программы с целью найти ошибки.

Роль тестирования состоит в том, чтобы определить местонахождение немногочисленных ошибок, оставшихся в хорошо спроектированной программе. Попытки достичь надежности в плохо спроектированной программе с помощью тестирования совершенно бесплодны.

Тестирование — проблема в значительной степени экономическая. Поскольку исчерпывающее тестирование нередко невозможно, то каждый тест должен давать максимальную отдачу по сравнению с затратами. Эта отдача измеряется вероятностью того, что тест выявит ранее не обнаруженную ошибку. Затраты измеряются временем и стоимостью подготовки, выполнения и проверки результатов теста.

Тестирование ПС охватывает целый ряд видов деятельности, весьма аналогичное последовательности процессов разработки ПС. Сюда входят постановка задачи для теста, проектирование, написание тестов, выполнение тестов и обработка полученных результатов. Решающую роль играет проектирование теста. Возможно множество подходов к стратегии проектирования тестов (рис. 1).

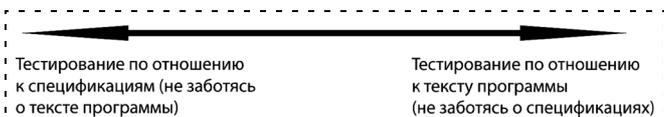


Рис. 1. Подходы к проектированию тестов

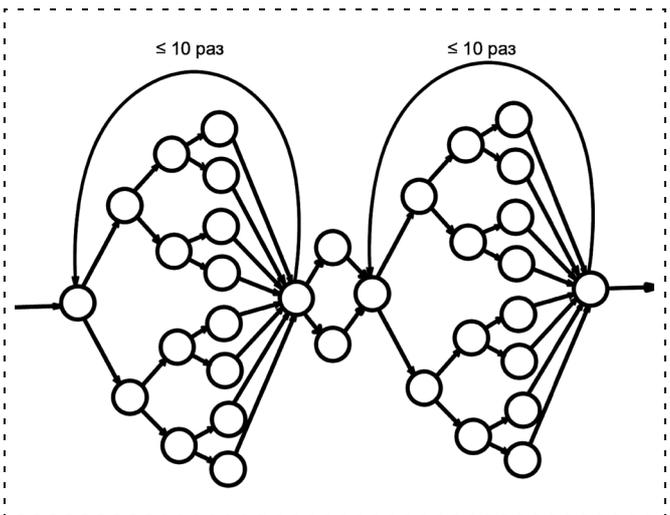


Рис. 2. Возможные пути выполнения небольшой программы

При проектировании тестов, соответствующих левой границе изображенного на рис. 1 спектра подходов к проектированию тестов, программа рассматривается как "ящик". В идеале необходимо проверить все возможные комбинации и значения на входе, что практически неосуществимо. Например, при тестировании тривиальной программы, получающей на входе три числа и вычисляющей их среднее арифметическое, тестирование программы для всех значений входных данных невозможно, поскольку число тестов было бы неограниченным [7].

При проектировании тестов, соответствующих правой границе спектра, целью ставится исследовать все выполнимые пути. Например, для графа, приведенного на рис. 2, можно оценить число различных путей как 10^{18} [7].

Чтобы построить более разумную и более экономичную стратегию, выбирается точка, несколько смещенная к левому концу спектра. Существует несколько методик тестирования:

- восходящее тестирование;
- нисходящее тестирование;
- модифицированное нисходящее тестирование;
- метод большого скачка;
- метод "сандвича";
- модифицированный метод "сандвича".

Поскольку при разработке ПС существуют ограничения как финансовые, так и временные, а разрабатываемая программа является нетривиальной, то применение метода тестирования для всех компонентов программы с точки зрения затрат является нецелесообразным. Поэтому предлагается определять наиболее ненадежный элемент программы с последующим его тестированием, так как показатель надежности всей программы не будет выше показателя самого ненадежного элемента.

Методика лингвистической оценки показателей надежности ПС

В настоящее время делаются попытки моделировать сложность программы, опираясь на свойства ее текста. Салливен [8] предлагает несколько моделей, основанных на предположении, что сложность понимания каждого конкретного участка программы пропорциональна числу понятий, активных на этом участке. Предложено несколько способов измерять эту сложность, опираясь на представление структуры управления и структуры данных программы в виде ориентированного графа.

Рассмотрим случай анализа в рамках теории нечетких множеств [9], когда отсутствует информация о значениях вероятностей и весах вершин графовой модели программы.

Пусть известна только схема программы. Следует определить показатель, характеризующий корректность программы. Предлагаемый метод расчета в условиях подобного "информационного голода" базируется на модели лингвистических показателей надежности. Идею метода покажем на примере расчета лингвистического показателя "корректность" для программного модуля (ПМ), схема которого приведена на рис. 3.

Существует принципиальная возможность получения лингвистических показателей надежности непосредственно по схеме программы. Этот аналитический метод требует задания функций принадлежности терм-множеств лингвистических показателей надежности программ. Основной трудностью, мешающей применению теории нечетких множеств, при исследовании надежности программ является то, что адекватность функций принадлежности не может быть проверена средствами теории нечетких множеств. Подробный расчет приведен в [9].

Логико-лингвистический метод определения вероятности ошибки в программе

Целью метода логико-лингвистической оценки надежности является получение простейшей оценки количества потерянной информации в процессе взаимодействия двух функциональных операторов при ее преобразовании.

Рассмотрим два одноходовых оператора, последовательно преобразующих информацию. На рис. 4, показаны входы и выходы операторов *A* и *B*.

Для наглядности области задания значений входных и выходных переменных будем изображать на плоскости. При этом потеря информации может иметь место за счет несогласования областей выходной переменной Y_A оператора *A* и входной переменной X_B оператора *B*. Здесь можно наблюдать три случая, показанных на рис. 5.

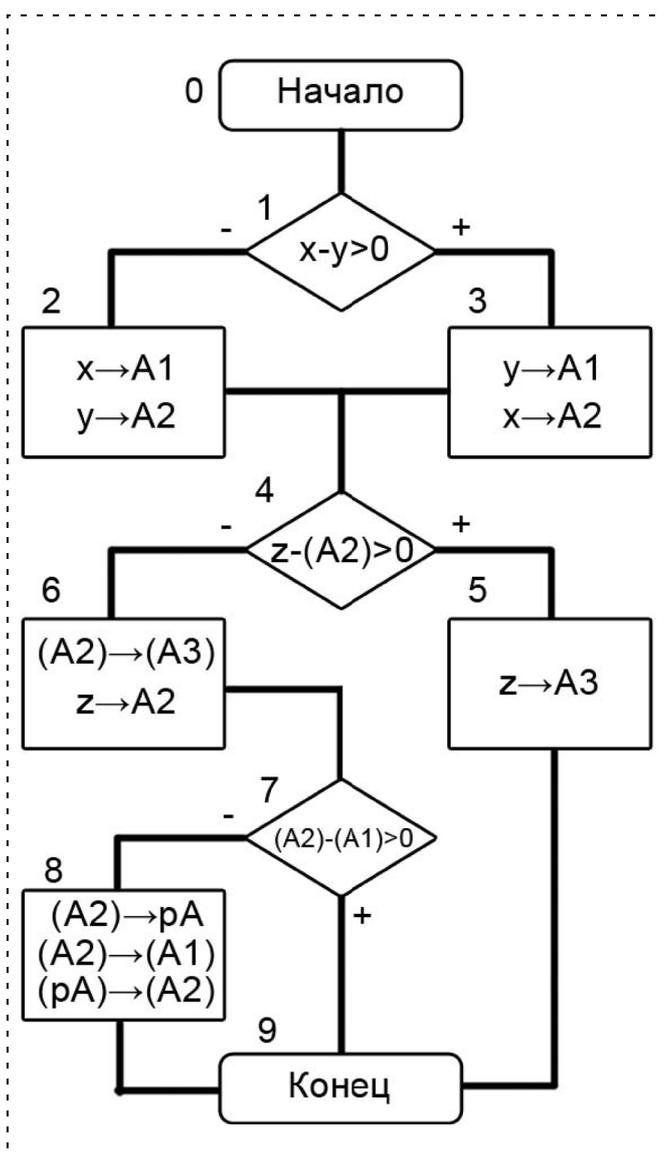


Рис. 3. Схема расчетной программы

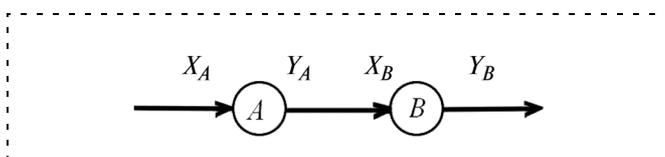


Рис. 4. Последовательность операторов

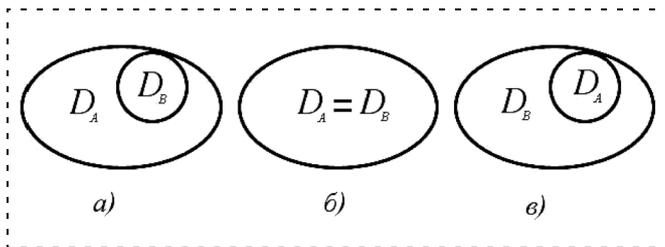


Рис. 5. Отношение весов операторов

Число ошибок V , содержащихся в ПС, как правило, зависит от объема исходного кода ПС, точнее, зависит от числа элементов используемого языка программирования. Поэтому одним из способов оценить вероятность ошибки в программе является применение "метрики затраченных усилий" [4]. Она основана на расчете следующих параметров:

- объема модуля

$$V = N \log_2 n,$$

где $n = n_1 + n_2$; n_1 — число уникальных операндов в коде программы (переменные и константы); n_2 — число уникальных операторов в коде программы;

$$N = N_1 + N_2,$$

где N_1 — число операндов в программе; N_2 — число операторов в программе;

- оценки среднего числа ошибок в коде

$$B = \frac{V}{K_B}, \quad (1)$$

где K_B — эмпирический коэффициент, имеющий значение 3000. Значение коэффициента K_B должно корректироваться для конкретной группы разработчиков, выбранной технологии проектирования и построения программы.

Используя метрику "затраченных усилий", запишем вероятность ошибки в программе

$$p_t = \frac{B}{N}.$$

Исследуем вопрос о том, какова вероятность p_u того, что более одной ошибки содержится в одной строке программы, т. е. операнд или набор операторов в строке содержит одну и более ошибок при условии, что внесение ошибки в элемент программы носит случайный характер. Тогда, согласно (1), $V = B \cdot 3000$, т. е. $V \ll B$. Поскольку для большинства программ, написанных на современных языках программирования, $N \sim 10^{-2} V$, получаем, что $N \ll B$. Используя комбинаторный анализ, легко показать, что

$$p_u = 1 - \frac{(B)_N}{B^N} \sim 0,$$

где $(B)_N = B(B-1)\dots(B-(N+1))$.

В практических приложениях можно исключить из рассмотрения случай, когда в одном локализованном месте программы (допустим, строке) встречается две и более ошибки в элементах программы,

и с некоторой осторожностью можно говорить о "независимости" проявлений ошибок в программе.

Данный метод является более экономичным и обладает достаточной точностью, необходимой для оценки надежности ПС за короткие сроки. Этот метод можно использовать вместе с методом оценки ПС тестированием, тем самым повышая вероятность точного определения надежности ПС.

Методика логико-вероятностного расчета корректности программных модулей

В настоящее время среди многочисленных аналитических методов общей теории надежности существуют логико-вероятностные модели (ЛВМ) расчета [10], которые представляют собой синтез математической логики и теории случайных событий. Разработанные для анализа надежности структур сложных систем ЛВМ позволяют записать условие работоспособности некоторой системы в виде функции алгебры логики (ФАЛ), а затем осуществить формальный переход от ФАЛ к вероятностной функции, определяющей показатель надежности исследуемой системы.

Привлекательность ЛВМ для получения априорных оценок вероятностей заключается в основном в существовании готового инженерного аппарата исследования надежности структуры системы, ориентированного на применение вероятностной логики. Вместе с тем, развивающаяся в настоящее время теория функционального программирования [11, 12] также широко использует методы вероятностной логики. Благодаря этому ЛВМ становится тем аналитическим аппаратом, который наиболее приспособлен к расчету на основе информации о внутренней структуре программы. Кроме того, ЛВМ могут оказаться своеобразным мостом, способным создать основы взаимопонимания между разработчиками технических и программных средств вычислительных систем. Однако непосредственное использование ЛВМ для решения нового класса задач — расчета вероятностей — затруднено из-за ряда характерных особенностей этих задач:

- вероятность отказа технических средств по причине износа или других физико-химических и механических причин превышает на несколько порядков вероятность отказа СВТ вследствие проектных или конструкторских дефектов, устраняемых обычно на сравнительно небольшом по длительности этапе приработки системы. Основным источником отказов ПМ являются именно дефекты программы, возникающие на этапе разработки ПС. Поскольку при исследовании надежности технической системы "проектными" или "конструкторскими" дефектами ее структуры

обычно пренебрегают, существующий аппарат ЛВМ [10] не может быть непосредственно применен для расчета вероятностей;

- программы содержат, как правило, более одного маршрута обработки информации, каждый из которых состоит из индивидуальной последовательности операторов и характеризуется своей вероятностью однократного правильного выполнения. Следовательно, вероятности зависят от распределения потока входных данных, сочетание которых определяет выбор того или иного маршрута. Маршрут работы программы формируется с помощью предикатных операций, передающих управление в одном из двух возможных направлений в зависимости от реализации некоторого условия (предиката), сформулированного по отношению к текущему состоянию вектора обрабатываемой информации [11]. Существующие ЛВМ анализа надежности структур технических систем [10] не рассматривают структуры, в состав которых включены предикатные элементы;
- аппарат ЛВМ, разработанный для анализа надежности структуры сложных технических систем [10], широко использует процедуру сокращения одноименных булевых переменных, встречающихся в ФАЛ и определяющих условия работоспособности системы. Анализируемые классы ПМ предполагают последовательное выполнение операций, поэтому произведения одноименных булевых переменных не могут быть сокращены, если выполнение соответствующих им программных компонентов происходит в различные моменты времени.

Учитывая эти особенности ПМ как объекта применения ЛВМ, модифицируем аналитический аппарат [10], используя результаты, полученные в рамках теории функционального и структурного программирования [11], согласно которым произвольный ПМ можно преобразовать в структурированную программу, составленную из элементов базисного множества (последовательность, развилка, цикл) [11].

Выводы

Проанализировав методы расчета надежности ПС, мы пришли к выводу, что наиболее удобным

является метод "оценки надежности ПС по вероятности ошибки в программе". В то время, как остальные методы сложны в решении и не обладают достаточной точностью, оценка надежности ПС по модулям имеет удовлетворительные и точность, и простоту расчетов. Это позволяет существенно сократить время тестирования ПС при заданной вероятности безошибочной работы, а следовательно, выбрать наиболее рациональный путь проведения работ по отладке ПС при минимизации затрат на его проведение.

Результаты проведенных исследований показывают, что

- наиболее рациональным методом определения надежности ПС является метод оценки по вероятности ошибки в программе;
- данный метод наиболее экономичен и обладает достаточной точностью, необходимой для оценки надежности ПС за короткие сроки;
- для более точного определения надежности ПС логико-лингвистический метод следует применять вместе с тестовыми методами.

Список литературы

1. **Липаев В. В.** Надежность программных средств. М.: Синтег, 1998.
2. **Кабак И. С., Рапопорт Г. Н.** Оценка надежности программного обеспечения по математической модели. Проблемы создания гибких автоматизированных производств / Под ред. И. М. Макарова, К. В. Фролова, П. Н. Белялина. М.: Наука, 1987. С. 236–245.
3. **Кабак И. С., Либов Л. Я.** Имитационное моделирование надежности программного обеспечения // Тр. НИАТ. 1990.
4. **Тейер Т., Липов М., Нельсон Э.** Надежность программного обеспечения: Пер. с англ. М.: Мир, 1981.
5. **Пальчун Б. П., Юсупов Р. М.** Оценка надежности программного обеспечения. СПб.: Наука, 1994.
6. **Лонгботтом Р.** Надежность вычислительных систем: Пер. с англ. / Под ред. П. П. Пархоменко. М.: Энергоатомиздат, 1985.
7. **Майерс Г.** Надежность ПО. М.: Мир, 1981.
8. **Sullivan J. E.** Measuring the complexity of computer software. MTR-2648-V. Mitre corp., Bedford, Mass., 1973.
9. **Карповский Е. Я., Чижов С. А.** Надежность программной продукции. Киев: Техніка, 1990.
10. **Рябинин И. А., Черкасов Г. Н.** Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981. 264 с.
11. **Лингер Р., Миллс Х., Уитт Б.** Теория и практика структурного программирования. М.: Мир, 1982. 402 с.
12. **Чень Ч., Ли Р.** Математическая логика и автоматическое доказательство теорем. М.: Наука, 1983. 360 с.

УДК 535.4:681.7.064.45

Б. Б. Горбатенко, канд. физ.-мат. наук, доц.,
Институт проблем точной механики
и управления РАН, г. Саратов,

Л. А. Максимова, канд. физ.-мат. наук, доц.,

А. Ф. Резчиков, член-корр. РАН, д-р техн. наук, проф.,
Саратовский государственный
технический университет,

В. П. Рябухо, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Саратовский государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского

Восстановление изображения объекта по записи распределения интенсивности дифракционного поля для контроля микроперемещений

Рассматривается способ восстановления изображения рассеивающего объекта по записи интенсивности когерентного спекл-модулированного дифракционного поля без использования опорного когерентного поля. Обсуждаются результаты натурных, численных экспериментов и численного моделирования процессов синтеза голограммно-подобной структуры и процессов восстановления изображения объектов различной формы. Рассматривается возможность автоматизации процессов создания искусственной голограммной структуры и восстановления изображения. Разработанный метод записи и восстановления изображения использован для высокоточного измерения микроперемещения рассеивающего объекта.

Ключевые слова: дифракция, цифровая голография, микроперемещение, спекл-картина

Введение

В связи с развитием нанотехнологий особую важность приобретает необходимость контроля субмикронных перемещений объектов и параметров их микро- и наноструктуры. Создание новых методов измерения субмикронных перемещений и параметров структур открывает широкую перспективу для диагностики и контроля в различных областях науки и техники.

Основная концепция мехатроники заключается в создании устройств, обладающих качественно новыми характеристиками, в частности, путем совместного использования достижений в различных отраслях науки и техники [1]. Краткий и весьма условный перечень таких устройств включает: чувствительные элементы, обеспечивающие сбор ин-

формации; устройства обработки информации; исполнительные системы и механизмы; источники энергии.

Среди устройств сбора и обработки информации следует выделить те, работа которых основана на оптических принципах, поскольку эти устройства отличаются высокой чувствительностью и точностью, быстродействием, большой информативностью, возможностью простого сочетания с электронными вычислительными системами. К этим приборам, в частности, можно отнести оптические интерферометры [2–4], включая голографические и спекл-интерферометры [2,5–7], а также дифракционные оптические элементы, позволяющие как осуществлять предварительную фильтрацию и обработку информации, так и обеспечивать ее преобразование в формат, удобный для ввода в компьютерные системы обработки информации [8, 9].

В отличие от некогерентных оптоэлектронных систем записи и обработки изображений интерференционные и голографические системы позволяют записывать и восстанавливать не только распределение освещенности по поверхности объекта, но и фазовые распределения объектного оптического поля. Эта возможность голографического процесса позволяет получать с субмикронной точностью измерительную информацию об объекте: о его форме и микроструктуре поверхности, о параметрах его движения, деформациях поверхности и об изменениях микроструктуры поверхности [5–7, 10–12]. Голографический процесс позволяет также восстанавливать изображение объекта по записи дифракционного оптического поля без использования изображающей оптики, что исключает необходимость применения систем ручной фокусировки и автофокусировки. Поэтому аналоговые голограммы являются, фактически, дифракционными оптическими элементами, восстанавливающими изображение объекта и фазовые распределения объектного поля.

Основным недостатком голографического и интерференционных методов в их практическом применении является необходимость в использовании когерентного опорного пучка, что существенно усложняет оптическую систему, снижает ее помехозащищенность, требует использования высококогерентных источников оптического излучения, ограничивает расстояние до записываемого объекта. Преодоление этого недостатка голографического процесса связано с разработкой методов восстановления изображения по записи интенсивности оптического поля без использования когерентного опор-

ного пучка. Основные пути решения этой задачи состоят в том, чтобы найти способы восстановления фазовой информации в зарегистрированном распределении интенсивности.

Разработка новых методов записи и восстановления изображений объектов без использования опорного пучка света позволит радикально упростить оптическую систему, перенося основной объем обработки информации из аналоговой области в цифровую, т. е. в область ее компьютерной обработки. Учитывая быстродействие современных компьютерных систем, данный процесс может быть реализован практически в реальном времени. Возможность создания искусственных голограммно-подобных оптических дифракционных элементов, которые могут быть использованы как фильтры, отсекающие заведомо ненужную информацию, позволит повысить производительность последующих каскадов в схемах оптической обработки информации.

В данной статье рассматривается один из возможных методов записи когерентных изображений без использования опорной волны путем регистрации распределения интенсивности света в дифракционном поле и создании виртуального или реального голограммно-подобного дифракционного оптического элемента путем специальной цифровой обработки кадров изображений спекл-модулированного дифракционного поля.

Дифракция оптического излучения на Фурье-голограмме дифракционного поля

При когерентном освещении рассеивающего объекта в дифракционном поле формируется спекл-структура в результате интерференции волн, рассеянных различными точками объектов [13, 14]. В данной статье показано, что в спекл-структуре дальнего поля дифракции содержится информация об изображении поверхности объекта, которую можно восстановить по записи интенсивности дифракционного поля. Для этого нами предложена следующая процедура обработки спеклограммы в целях создания голограммно-подобного дифракционного оптического элемента — реального или виртуального, позволяющего восстанавливать изображение объекта или в результате аналогового процесса дифракции света на реальном дифракционном элементе, или в результате численного преобразования виртуального дифракционного элемента.

При анализе процессов записи и восстановления изображений мы использовали следующие теоретические представления. Восстанавливаемое с голограммы объектное волновое поле представляет собой суперпозицию элементарных волн, дифрагированных на элементарных дифракционных ячейках го-

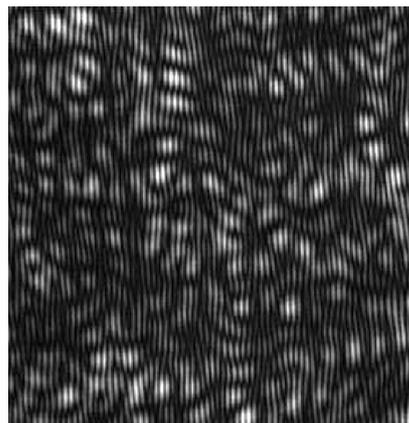


Рис. 1. Фрагмент реальной голограммы рассеивающего объекта

логаммы. Такие элементарные дифракционные решетки четко прослеживаются на рис. 1, на котором представлено сильно увеличенное изображение фрагмента реальной голограммы рассеивающего объекта.

Реальная голограмма представляет собой сложную дифракционную структуру и состоит из множества элементарных дифракционных решеток, служащих наименьшими информационными ячейками голограммы. При этом пространственное положение этих решеток на голограмме полностью определяется спекл-структурой объектного поля. Полное волновое поле, восстановленное с голограммы, формируется в результате суперпозиции всех элементарных волн, дифрагировавших на этих ячейках. Эти особенности дифракционной структуры голограммы определяют способ синтеза голограммы по записи интенсивности объектного дифракционного поля без использования опорного пучка света. По этому способу в каждом спекле записанной структуры необходимо создать несущие полосы с относительным сдвигом, соответствующим фазе поля в этом спекле.

Если в плоскость регистрации спеклограммы направить когерентный опорный пучок, то будем иметь схему записи цифровой Фурье-голограммы [14]. В этом случае для восстановления изображения объекта-транспаранта необходимо выполнить преобразование Фурье от зарегистрированного распределения интенсивности. При использовании когерентного опорного пучка в плоскости регистрации в пределах каждого спекла наблюдаются квазипараллельные несущие полосы с периодом $\Lambda \approx \lambda / \sin \theta$, где θ — угол падения опорного пучка. При переходе от одного спекла к соседнему полосы испытывают поперечное смещение в соответствии с фазовым сдвигом объектного поля в этих спеклах.

Моделирование процессов формирования изображения объекта по цифровой записи интенсивности рассеянного поля

Картина дифракции дальнего поля на спеклограмме не отображает непосредственно форму объекта, а отображает автокорреляцию распределения интенсивности в плоскости объекта [14]. Восстановление изображения объекта по зарегистрированному распределению интенсивности рассеянного им когерентного поля в дифракционной зоне представляет интерес в голографии и дифракционной оптике, в оптических измерениях и диагностике, в методах и устройствах оптической записи и обработки информации, в когерентной микроскопии и т. д. Решение этой задачи сводится к нахождению способа реконструкции фазы дифракционного поля. Известны разные подходы к решению этой проблемы [9, 15–18].

В [19–22] теоретически и экспериментально показано, что для δ -коррелированных рассеивающих объектов с осесимметричным распределением интенсивности разность фаз поля в дальней области дифракции в соседних спеклах с наибольшей вероятностью равна π радиан. Следовательно, пространственный сдвиг интерференционных полос в соседних спеклах интерференционной структуры Фурье-голограммы с наибольшей вероятностью равен половине периода полос Λ . Таким образом, можно реализовать следующий алгоритм для восстановления фазы объектного поля и, следовательно, для восстановления изображения объекта по зарегистрированной интенсивности дальнего дифракционного поля.

Пусть в эксперименте записывается цифровая спеклограмма без использования опорного пучка света. Затем с использованием графических цифровых технологий в этом распределении интенсивности в пределах спеклов наносятся искусственные полосы с произвольным периодом Λ . При этом тем или иным способом обеспечивается сдвиг полос на полпериода Λ при переходе от одного спекла к соседнему. Этим сдвигом полос восстанавливается информация о фазовом пространственном распределении в объектном поле. Фурье-преобразование искусственной голограммы, полученной вышеописанным способом, должно привести к формированию изображения объекта.

На рис. 2, *а* приведен фрагмент спеклограммы объекта эллиптической формы с нанесенной системой несущих полос без сдвига на половину периода между соседними спеклами, а на

рис. 2, *б* приведен пример численного Фурье-преобразования такой структуры, включающей цифровую Фурье-спеклограмму объекта эллиптической формы и систему несущих полос без сдвига на половину периода при переходе между соседними спеклами.

Как видно из рис. 2, *б*, распределения интенсивности в первых порядках дифракции не соответствуют изображениям объекта, а представляют собой автокорреляцию распределения поля по объекту, как и в нулевом порядке дифракции. Именно сдвиг несущих полос на половину периода при переходе от спекла к спеклу обеспечивает формирование изображений объекта в первых порядках дифракции при Фурье-преобразовании спекл-картины с системой несущих полос. Сдвигом полос восстанавливается информация о фазовом пространственном распределении в объектном поле. Фурье-преобразование искусственной голограммы, полученной вышеописанным способом, приводит к формированию изображения объекта. На рис. 3, *а* приведен результат численного Фурье-преобразования цифровой спеклограммы объекта в форме квадрата.

Нами разработан способ аналогового процесса восстановления изображения по цифровой спеклограмме [21, 22]. В этом случае графический файл, получаемый после компьютерной обработки цифровой спеклограммы, с требуемым увеличением распечатывался, а затем с необходимым уменьшением фотографически переносился на фотопластинку. Таким образом, получали голографически подобный дифракционный оптический элемент (ДОЭ). При освещении такого ДОЭ лазерным пучком в дальней зоне дифракции наблюдались изображения записанного объекта. Такие изображения приведены на рис. 3, *б*. Для сравнения на рис. 3, *в* представлены автокорреляционное гало и изображения, восстановленные с реальной Фурье-голограммы.

На качество восстановленных изображений влияет много факторов. Графическая обработка спекло-

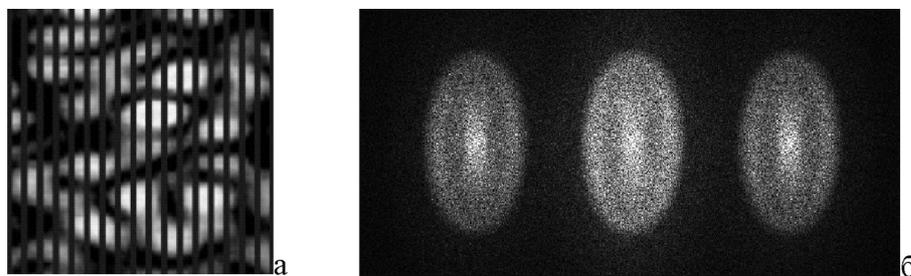


Рис. 2. Фрагмент спеклограммы объекта эллиптической формы с нанесенной системой несущих полос без сдвига на половину периода между соседними спеклами (*а*); картина дифракции дальнего поля, полученная при Фурье-преобразовании спеклограммы объекта эллиптической формы с нанесенной системой несущих полос без сдвига на половину периода между соседними спеклами (*б*)

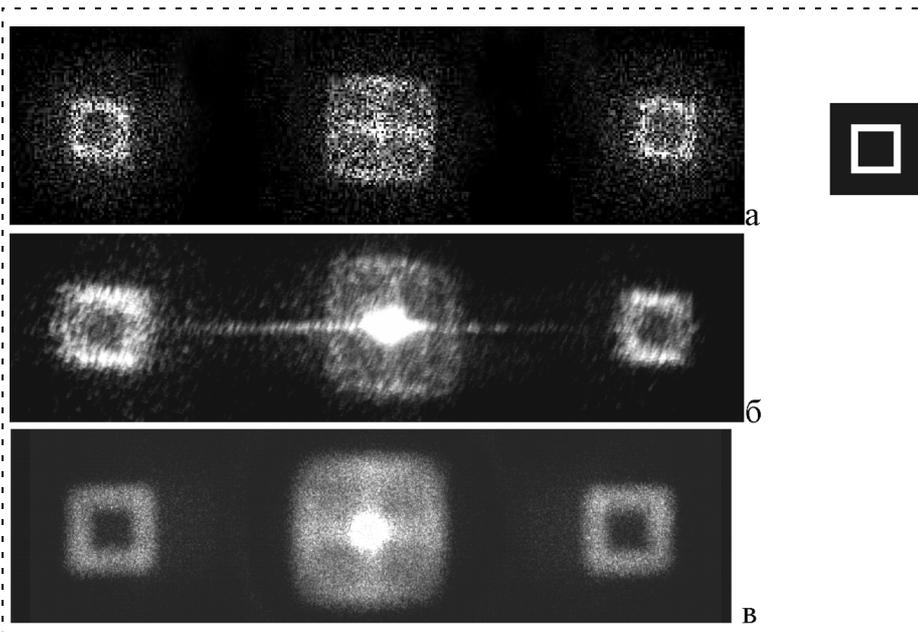


Рис. 3. Картина дифракции дальнего поля, получаемая при численном Фурье-преобразовании безопорной спеклограммы с искусственно нанесенной системой несущих интерференционных полос, и соответствующий объект-транспарант (а); изображения, восстановленные с помощью ДОЭ (б); автокорреляционное гало и изображения, восстановленные с реальной Фурье-голограммы (в)

граммы с применением специальных программных средств сопровождается существенными ошибками при определении соседних областей (соседних спеклов) в спекл-картине. Кроме того, главной причиной сложности определения соседних областей является то, что в условиях реального эксперимента требование δ -коррелированности источника диффузно рассеянного излучения в полной мере не выполняется. Только для таких источников, как показано теоретически [21, 22], реализуется сдвиг фаз соседних спеклов строго на π радиан. Тем не менее, на восстановленных изображениях на рис. 3, а, б в первых порядках дифракции отчетливо видны восстановленные изображения объектов. Таким обра-

зом, показана принципиальная возможность восстановления изображения объекта по спеклограмме его дифракционного поля.

Нами был предложен процесс ручной обработки спекл-картины с переносом полученной в результате такой обработки картины на физический носитель в целях дальнейшего восстановления изображения [19, 20]. Такой процесс оказался очень трудоемким, особенно для процедуры нанесения несущих полос на цифровую спеклограмму. Для быстрой обработки цифровых спеклограмм сначала была создана программа полуавтоматической обработки спекл-структур [21, 22]. В этом случае ручная обработка в пределах каждого спекла заменялась автоматической, но сдвиг полос при переходе к соседнему спеклу задавался пользователем, который определял соседние спеклы.

Это автоматическое нанесение полос в пределах каждого спекла позволило существенно снизить время обработки спеклограмм.

Дальнейшим шагом в исследовании явилась попытка полной автоматизации процесса регистрации, обработки спеклограмм и восстановления изображения. Поскольку сама регистрация спекл-полей — это достаточно трудоемкий процесс, требующий специального оборудования, то его моделирование на компьютере существенно расширяет возможности исследователя. Спекл-структура, смоделированная на компьютере, представлена на рис. 4.

Для обработки спеклограмм в целях создания голограммно-подобных структур с несущими поло-

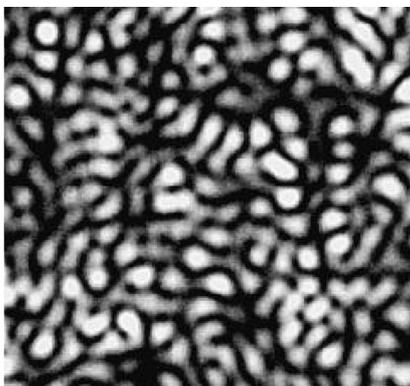


Рис. 4. Спекл-структура, смоделированная на компьютере



Рис. 5. Бинаризация изображения

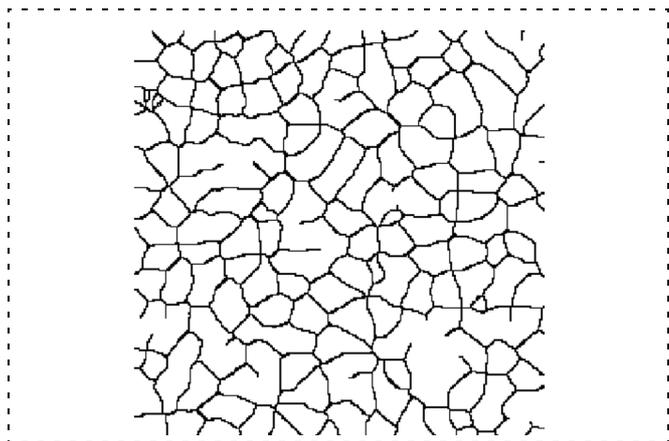


Рис. 6. Области, на которые разделена спекл-картина

сами были использованы компьютерные программы обработки спеклов, позволяющие наносить на спеклограмму систему несущих полос со сдвигом на половину периода при переходе от одного спекла к соседнему. Алгоритм восстановления фазового распределения в спекл-поле состоит в следующем: перевод изображения в массив чисел; определение среднего уровня интенсивности и проведение бинаризации по этому уровню (рис. 5); разделение спекл-картины на соседние области (рис. 6); нанесение на спеклограмму системы несущих полос, сдвинутых на половину периода между соседними спеклами (рис. 7).

Изображения, полученные с помощью Фурье-преобразования спеклограммы с такой системой несущих полос, представлены на рис. 8. Из рис. 8 видно, что восстановленные изображения с достаточно высокой точностью повторяют форму источника.

На рис. 8, а, в представлены восстановленные изображения для случая разделения соседних областей в процессе обработки в автоматическом режиме, на рис. 8, б, г — для случая разделения соседних областей в ручном режиме. Сравнение результатов применения этих режимов обработки спеклограмм показывает несколько более высокое качество восстановления изображений при использовании ручного режима определения соседних спеклов с необходимым сдвигом полос. Для повышения качества восстановления изображений автоматическая программа требует дальнейшей доработки в плане более точного определения областей, представляющих соседние спеклы.

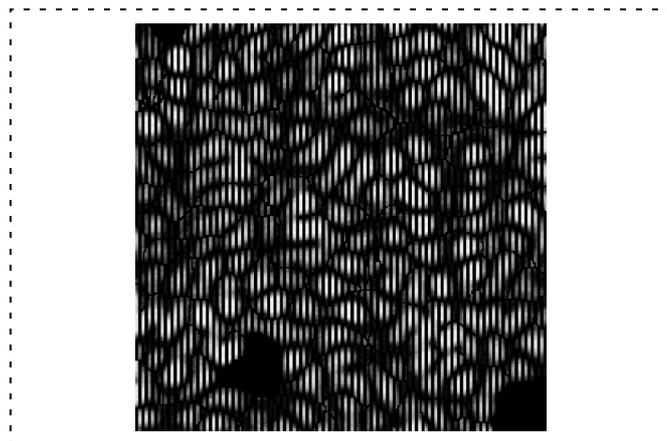


Рис. 7. Спекл-картина с системой несущих полос

Как видно из рис. 8, в целом предложенный алгоритм позволяет восстанавливать изображения объекта. Графическая обработка спеклограммы с применением специальных программных средств является менее трудоемким процессом по сравнению с ручной обработкой, но она сопровождается существенными ошибками при определении границ спеклов и поэтому требует дальнейшей доработки.

Использование метода записи и восстановления изображения для высокоточного измерения микроперемещения рассеивающего объекта

Разработанный метод записи и восстановления изображений может быть использован для высокоточных измерений параметров микроперемещения рассеивающих объектов, подобных голографической

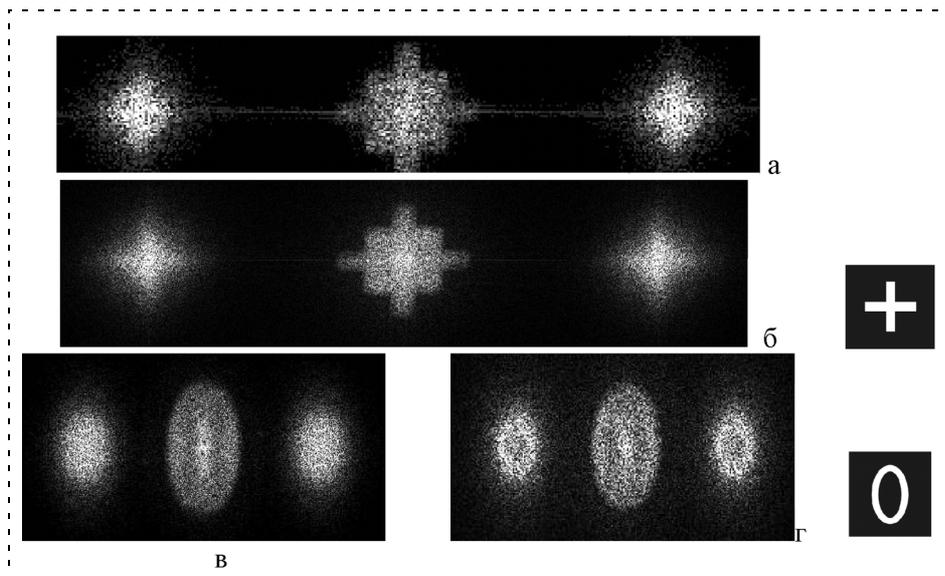


Рис. 8. Восстановленные изображения объектов с четным порядком центральной симметрии: а, б — креста; в, г — эллипса

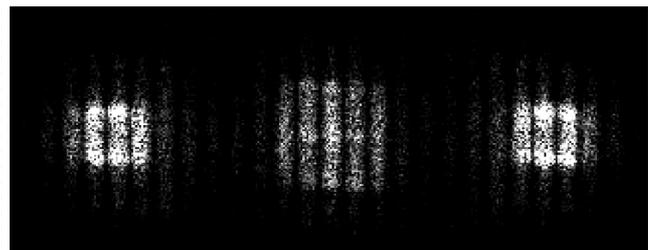


Рис. 9. Восстановленные изображения с системой интерференционных полос, определяющих величину микроперемещения объекта

и спекл-интерферометрии [2—7]. Для этого должна использоваться двукратная запись дифракционного поля — до и после смещения объекта. На рис. 9 представлено цифровое изображение смещения объекта при использовании предложенного в работе метода восстановления изображения по распределению интенсивности дифракционного поля для измерения угла наклона рассеивающего отражающего объекта. Как видно из рис. 9, восстановленные изображения в первых порядках дифракции покрыты интерференционными полосами, период которых характеризует значение угла наклона объекта. В отличие от метода спекл-фотографии, в данном случае происходит восстановление изображения объекта и весьма наглядно можно наблюдать, что объект смещен.

Для реализации данного метода цифровой спекл-интерферометрии была проведена регистрация двух идентичных спекл-картин в дальней области дифракции со смещением $\Delta x \approx 0,15$ мм. Смещенная спекл-картина соответствует повороту объекта на какой-то малый угол α . Эти две идентичные спекл-картины были покрыты системами несущих полос согласно предложенной методике восстановления изображения [19—22]. Затем было проведено Фурье-преобразование от суммы двух полученных голограммных структур. Зная смещение спекл-структуры Δx и расстояние от плоскости объекта до плоскости регистрации $z \approx 1,5$ м, можно определить угол наклона объекта $\alpha \approx \Delta x/z \approx 0,15 \cdot 10^{-3}/1,5 \approx 10^{-4}$ рад $\approx 21''$.

Цифровая обработка кадров спекл-модулированных изображений позволяет получить на восстановленных изображениях систему модулирующих полос, подобных интерференционным полосам, параметры которых, например, пространственный период, определяются микроперемещением объекта. Восстановленному объекту, размер которого $l \approx 1$ см, соответствует примерно три периода интерференционных полос Λ (рис. 9), следовательно, $\Lambda \approx l/3 \approx 3$ мм. Для отражающего объекта угол поворота можно определить согласно формуле [14] $\alpha = l/2\Lambda \approx 0,63 \cdot 10^{-6}/6 \cdot 10^{-3} \approx 10^{-4}$ рад $\approx 21''$.

Полученные значения угла поворота совпадают, что говорит о правильном подходе с использова-

нием предложенной методики восстановления [19—22] в применении к методам голографической спекл-интерферометрии. Получаемая картина полос и на изображениях объекта, и на дифракционном гало позволяет с достаточно высокой точностью определять малые смещения рассеивающих объектов.

Заключение

Предложенный в работе метод восстановления изображения основывается на записи интенсивности дифракционного поля рассеивающего объекта при его когерентном освещении, что обеспечивает спекл-модуляцию дифракционного поля, которая несет часть информации об источнике этого поля — освещенной области на поверхности объекта. Метод восстановления фазового распределения объектного оптического поля обеспечивается созданием в записанной спекл-структуре высокочастотной квазипериодической пространственной модуляции, аналогичной модуляции интерференционными полосами в голографической записи оптического поля. При этом требуемая фазовая модуляция задается сдвигом полос на половину их периода при переходе от одного спекла к соседнему. Показана принципиальная возможность реконструкции фазы спекл-модулированного дифракционного поля плоского симметричного рассеивающего объекта, а также возможность восстановления изображений таких объектов по записи безопорной Фурье-спеклограммы. Работоспособность предложенного метода восстановления изображения подтверждена в натурном и численном экспериментах. Реализован вариант цифровой безопорной Фурье-голограммы на основе разработанной методики восстановления изображения объекта по зарегистрированной интенсивности спекл-модулированного дифракционного поля.

Восстановление амплитуды и фазы дифракционного поля предопределяет возможность восстановления фазового распределения в плоскости изображения объекта, что, в свою очередь, позволяет получать информацию о макро- и микроструктуре поверхности объекта, о микро- и нанопараметрах изменения этих структур с очень высокой точностью. Такие высокоточные измерения, подобные голографической и спекл-интерферометрии, позволяют выполнять технологический контроль качества поверхности объектов, напряженно-деформированного состояния изделий в точном приборостроении, электронной технике, робототехнике, нанотехнологии.

Авторы благодарят В. В. Лычагова, О. А. Перепелыцину за помощь в экспериментальных исследованиях, Д. М. Масленникова и Ю. В. Норова за помощь в создании программ обработки цифровых изображений. Исследования были проведены при поддержке гранта РФФИ № 06-08-00987а и CRDF REC-006.

Список литературы

1. Иси Т., Симома П., Иноэ Х., Хирозэ М., Накадзима Н. Мехатроника / Пер. с япон. С. Л. Масленникова; Под ред. В. В. Василькова. М.: Мир, 1988. 388 с.
2. Оптический производственный контроль: Пер с англ. / Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
3. Коронкевич В. П., Ханов В. А. Современные лазерные интерферометры. Новосибирск: Наука, Сибир. отд., 1985. 182 с.
4. Коломийцов Ю. В. Интерферометры. Основы инженерной теории, применение. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
5. Островский Ю. И., Щепинов В. П., Яковлев В. В. Голографические интерференционные методы измерения деформаций. М.: Наука, 1988. 248 с.
6. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 328 с.
7. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 504 с.
8. Васильев В. Н., Гуров И. П. Компьютерная обработка сигналов в приложении интерферометрическим системам. СПб.: БХВ Санкт-Петербург, 1998. 332 с.
9. Дифракционная компьютерная оптика / Под ред. В. А. Соифера. М.: Физматлит, 2007. 736 с.
10. Гуров И. П., Джабиев А. Н. Интерферометрические системы контроля дистанционного контроля объектов. СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2000. 190 с.
11. Владимиров А. П. Динамическая спекл-интерферометрия деформируемых тел. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 243 с.
12. Малов С. Н. Голографическое вычитание изображений. Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та, 1990. 136 с.

13. Франсон М. Оптика спеклов. Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 171 с.
14. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 688 с.
15. Kotlyar V. V., Serafimovich P. G., Soifer V. A. Regularised iterative algorithm for the phase retrieval // Optik. 1993. V. 94. P. 96—99.
16. Shieh H. M. and Byrne C. L. Image reconstruction from limited Fourier data // J. Opt. Soc. Am. A. 2006. V. 23. P. 2732—2736.
17. Shieh H. M., Byrne C. L., Testorf M. E., Fiddy M. A. Iterative image reconstruction using prior knowledge // J. Opt. Soc. Am. A. 2006. V. 23. P. 1292—1300.
18. Kolenovic E. Correlation between intensity and phase in monochromatic light // JOSA A. 2005. V. 22. I. 5. P. 899—906.
19. Горбатенко Б. Б., Рябухо В. П., Максимова Л. А. Реконструкция пространственного фазового распределения в дифракционном спекл-поле и восстановление изображения объекта по записи интенсивности // Опт. и спектр. 2006. Т. 101. № 5. С. 861—865.
20. Горбатенко Б. Б., Максимова Л. А., Рябухо В. П., Норов Ю. В. Реконструкция изображения по пространственному распределению интенсивности дифракционного спекл-модулированного поля // Компьютерная оптика. 2007. В. 31. № 2. С. 26—33.
21. Горбатенко Б. Б., Рябухо В. П., Максимова Л. А. Метод восстановления изображения предмета по спекл-структуре его дифракционного поля // Письма в ЖТФ. Т. 30. В. 17. 2004. С. 68—75.
22. Горбатенко Б. Б., Рябухо В. П., Максимова Л. А. Статистические свойства разности фаз в спекл-модулированном поле и метод восстановления изображения предмета по спекл-структуре его дифракционного поля // Компьютерная оптика. 2004. В. 26. С. 48—52.

УДК 004.7

С. П. Саханский, канд. техн. наук, доц.,
Сибирский государственный аэрокосмический
университет им. акад. М. Ф. Решетнева, г. Красноярск

Особенности определения формы фронта кристаллизации при выращивании монокристаллов германия

Рассмотрен метод управления скоростью вращения кристалла при контактном методе выращивания монокристаллов, который позволяет проявить стандартным способом травления форму фронта кристаллизации. Данный метод применяется для коррекции прогиба фронта кристаллизации, при серийном выращивании монокристаллов германия кристаллографического направления "100".

Ключевые слова: форма фронта кристаллизации; прогиб фронта кристаллизации; замедление скорости вращения кристалла.

При контактном методе измерения и управления (рис. 1) выращиванием монокристаллов [1—4] во вращающемся вокруг своей оси с частотой вращения W_T тигле с внутренним диаметром D находится жидкий расплавленный металл. Кристалл диаметром d вытягивается из расплава со скоростью вытягивания V_3 и частотой вращения W_3 кристалла. Выращиваемый монокристалл помещен в закрытую тепловую оснастку для обеспечения необходимых низкотемпературных условий роста. Темпера-

тура расплава поддерживается постоянной за счет управления мощностью нагревателя с использованием показаний датчика температуры T_3 боковой

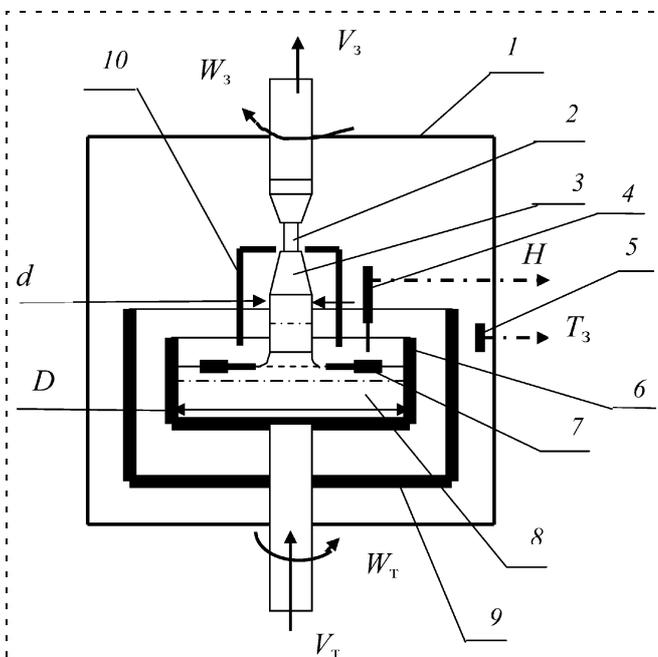


Рис. 1. Схема контактного метода:

1 — камера; 2 — заправка; 3 — кристалл; 4 — контактный датчик уровня; 5 — датчик температуры; 6 — тигель; 7 — электропроводный экран; 8 — расплав металла; 9 — нагреватель; 10 — тепловая оснастка

верхности нагревателя. Это управление осуществляет стандартный управляемый регулятор температуры. На поверхности расплава плавает электропроводный экран, который замыкает и размыкает контактный датчик уровня, подающий в систему управления сигнал об изменении уровня расплава в процессе выращивания кристалла. Система управления вычисляет разностный сигнал управления как функцию отклонения текущей площади кристалла от заданной на основе вычисленных перемещений кристалла и тигля вверх за период цикла оценки сигнала управления и осуществляет на его основе управление выращиванием кристаллов.

В работе [5] подчеркнуто, что кривизна фронта кристаллизации кристалла определяется отношением осевых и радиальных градиентов в выращиваемом кристалле, которые, в свою очередь, зависят для кристалла определенного диаметра от тепловых полей в кристалле и расплаве и скорости вытягивания. С увеличением скорости вытягивания осевые градиенты в кристалле увеличиваются (увеличивается тепловой поток, обусловленный выделением скрытой теплоты кристаллизации) и фронт кристаллизации прогибается вверх. Управление скоростью вытягивания кристаллов германия в закрытой тепловой оснастке позволяет сформировать плоский фронт кристаллизации при выращивании прямого конуса кристалла, его цилиндрической части и обратного конуса кристалла, что необходимо для многих марок кристалла германия и обеспечивает минимум дислокаций в выращенном кристалле. Для германия любое отклонение от плоского фронта кристаллизации приводит к появлению механиче-

ских напряжений при охлаждении кристалла, находящегося в пластическом состоянии, что ведет к образованию дислокаций в готовом кристалле. На основании данных многих исследований [6] формирование условий получения плоского фронта кристаллизации при выращивании кристаллов германия позволяет получать кристаллы с совершенной структурой. Форма фронта кристаллизации при выращивании кристаллов, в свою очередь, может меняться в течение процесса вытягивания из-за различных факторов (старения и изменения тепловых свойств окружающей тепловой оснастки, изменения температуры охлаждающей воды в камере установки и т. д.). Все это ведет к необходимости постоянного контроля и коррекции скорости вытягивания кристалла на основе анализа формы фронта кристаллизации.

Для многих марок монокристаллов германия возникла сложность в проявлении стандартным способом травления формы фронта кристаллизации, в связи с чем при его производстве на ФГУП "Германий" (г. Красноярск) был найден новый метод для проявления формы фронта кристаллизации и последующей коррекции скорости вытягивания кристалла в процессе их серийного выращивания, рассмотренный ниже.

Процесс управления скоростями вращения кристалла $W_3(x)$ и тигля $W_T(x)$ при вытягивании монокристаллов германия показан на рис. 2, при этом программа управления заданием скорости вращения кристалла $W_3(x)$ формируется следующим образом:

- в программе на участках прямого и обратного конуса по координате перемещения кристалла x задаются необходимые координаты определения формы фронта кристаллизации;
- по введенным координатам программа автоматически снижает обороты кристалла W_3 в восемь раз на время, равное 1,5...2 мин;
- выращенный кристалл в данных координатах разрезается на шайбы, с проявлением фронта кристаллизации стандартными травителями;
- по значению прогиба фронта кристалла в исследуемых участках выполняются определение и коррекция введенной скорости вытягивания кристалла для обеспечения необходимой плоской формы фронта кристаллизации.

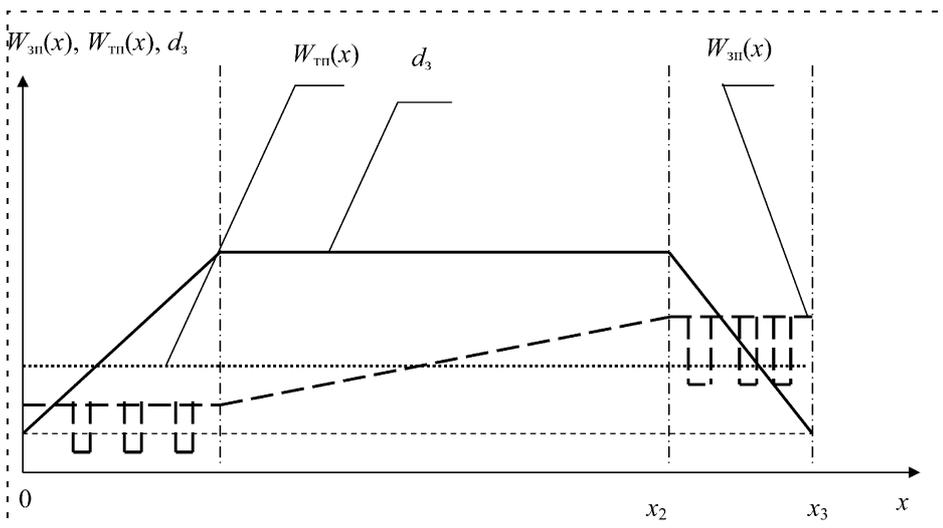


Рис. 2. График задания программируемых параметров процесса выращивания кристаллов: d_3 — задание диаметра выращиваемого кристалла; $W_{Тп}(x)$ — задание скорости вращения тигля; $W_3(x)$ — задание скорости вращения затравки; x — перемещение кристалла; x_1 — координата завершения формирования прямого конуса кристалла, x_2 — координата завершения формирования цилиндрической части кристалла, x_3 — координата завершения формирования обратного конуса кристалла

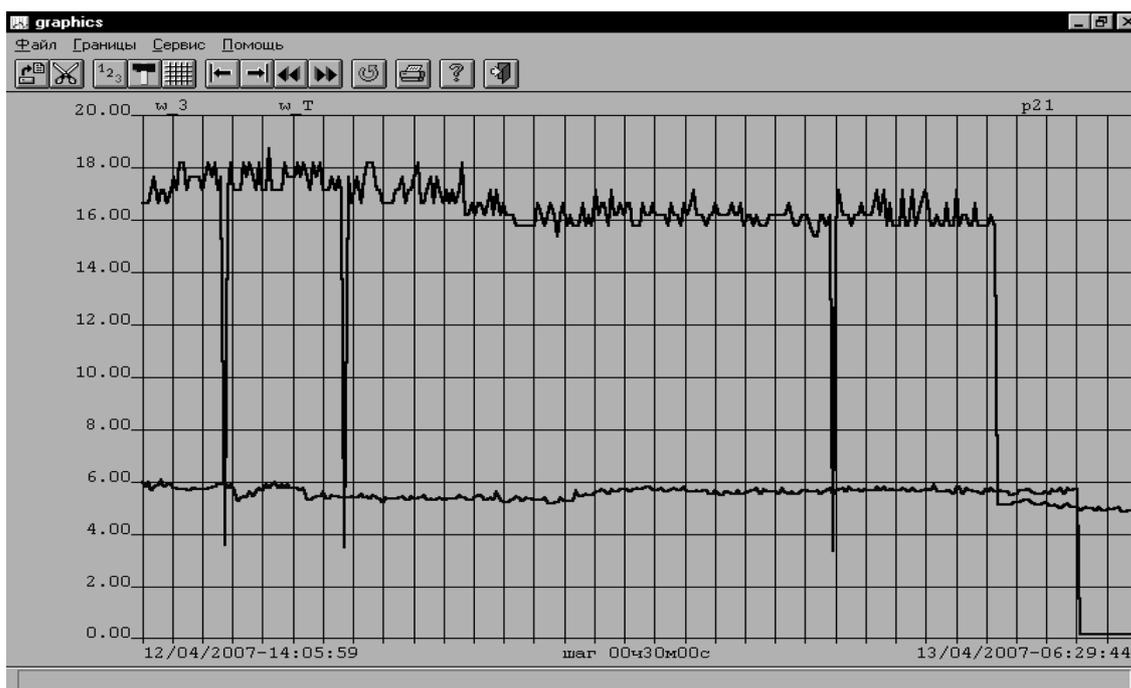


Рис. 3. График изменения скорости вращения кристалла ω_3 и скорости вращения тигля ω_T при выращивании монокристаллов германия на установке вытягивания № 21

При выращивании монокристаллов германия кристаллографического направления "100" на установке вытягивания № 21 (рис. 3) программно вводилось замедление скорости вращения кристалла на трех участках прямого и трех участках обратного конуса. Это позволило при производстве монокристаллов на ФГУП "Германий" вести периодический контроль и коррекцию скорости вытягивания.

Физическая природа данного явления связана с местным изменением (при замедлении скорости вращения кристалла) величины перехода легирующих примесей в твердую часть кристалла, что позволяет проявить фронт кристаллизации на выбранных участках стандартными травителями, за счет изменения сопротивления на данных участках.

Выводы

Разработан метод, позволяющий при выращивании монокристаллов германия кристаллографического направления "100" на установках, основанных на контактном методе измерения и управления диаметром кристалла, за счет изменения скорости вращения кристалла на заданных участках определить и проявить стандартными методами травления

форму фронта кристаллизации материала и по ней скорректировать скорость вытягивания.

Список литературы

1. Патент 2128250 РФ, МПК С30 В15/20, 15/22, 15/26. Способ управления процессом выращивания монокристаллов германия из расплава и устройство для его осуществления / С. П. Саханский, О. И. Подкопаев, В. Ф. Петрик. 1999. № 97101248/25.
2. Патент 2184803 РФ, МПК С30 В15/20, 15/22, 15/12 29/08. Способ управления процессом выращивания монокристаллов германия из расплава и устройство для его осуществления / С. П. Саханский, О. И. Подкопаев, В. Ф. Петрик, В. Д. Лаптевик. 2002. № 99123739/12.
3. Саханский С. П. Основные математические соотношения контактного метода управления выращиванием монокристаллов по способу Чохральского / Под ред. проф. Г. П. Белякова. // Вестн. Сибирск. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. 2005. Вып. 7. С. 85—88.
4. Саханский С. П. Выращивание монокристаллов в закрытой тепловой оснастке по способу Чохральского на основе контактного метода управления диаметром кристалла // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 1. С. 38—41.
5. Туровский Б. М., Сахаров Б. А. Некоторые особенности тепловых условий выращивания кристаллов по методу Чохральского // Науч. тр. Гиредмета. 1969. Т. 25. С. 94—103.
6. Лоусон У. Д., Нильсен С. С., Херл Д. Т. Процессы роста и выращивание монокристаллов / Пер. с англ. под ред. Н. Н. Шефтеля. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 401 с.

УДК 004.896

И. Л. Ермолов, канд. техн. наук, доц.,
Московский государственный
технологический университет "СТАНКИН"

Иерархическое комплексирование данных в мобильной робототехнике

Обсуждается комплексирование данных в мобильных роботах — одна из ключевых технологий современной робототехники. Рассматривается само явление комплексирования данных и его приложение в мобильной робототехнике. Рассмотрено иерархическое комплексирование данных, разработка которого осуществлена на кафедре робототехники и мехатроники МГТУ "СТАНКИН".

Ключевые слова: комплексирование данных, многосенсорность, мобильная робототехника, автономность роботов, интеллектуальные системы.

Актуальность исследования

В [2] обсуждалась необходимость обеспечения автономности мобильных роботов (МР), обусловленная увеличением числа применяемых МР и расширением областей их применения.

Там же рассматривались направления исследований по обеспечению автономности МР. Среди них наиболее насущным признано повышение интеллектуальной и информационной автономности МР.

Оба эти направления связаны с обработкой данных, поступающих с датчиков, установленных на МР и в окружающей среде.

С учетом вида применяемых датчиков и характера данных, получаемых от них, становится актуальным осуществление комплексной обработки этих данных.

Важность технологии комплексной обработки данных (англ.: data fusion) подчеркивается во многих трудах, посвященных перспективному развитию робототехники, и, в первую очередь, мобильной.

Эта технология указывается в качестве одного из ключевых направлений исследований в программе исследований робототехники Европейского союза на 2007—2014 г.

Актуальность данного направления поддерживают и другие ведущие в области робототехники страны.

С середины 1990-х гг. IEEE проводит ежегодную конференцию, посвященную вопросу комплексирования данных, поступающих с датчиков интел-

лектуальных систем (прежде всего, роботов), — International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems.

Комплексирование данных

Само явление комплексирования данных не ново. Наиболее совершенное творение — человек — активно использует комплексирование информации, поступающей от пяти органов чувств.

В технике комплексирование массово начало применяться в XX в. В 70—80-х гг. комплексирование данных наиболее активно использовалось в геологоразведке. Так, в 1977 г. вышла книга "Принципы комплексирования геофизических методов", а в 1982 г. — первый в СССР учебник "Комплексирование геофизических методов".

В геологоразведке метод комплексирования данных состоял в интегрированном анализе данных геологоразведки, полученных различными техническими методами, комплексный анализ которых позволял обнаружить наличие полезных ископаемых.

В системах навигации комплексирование первоначально развивалось в области так называемой макронавигации. Работы, прежде всего, посвящены комплексированию навигационных данных, поступающих от систем навигации "Глонасс" и "Навстар", а также инерциальных навигационных устройств [4].

Эффективность технологии комплексирования была очень быстро оценена при создании сложных интеллектуальных систем.

Так, например, в модернизированных многоцелевых Су-27СМК комплексирование радиолокационной и навигационной информации позволило реализовать два режима бомбометания неуправляемых авиабомб с точностью до 30...40 м — навигационный и с прицеливанием по РЛС. При использовании режима комплексирования с данными спутниковой навигации обеспечивается повышение точности бомбометания до 10 м и соответствующее сокращение расхода неуправляемых боеприпасов.

Говоря о самом явлении комплексирования, можно предложить следующее определение: *комплексирование данных — процесс обобщения информации на основе анализа более чем одного источника данных.*

Это определение позволяет трактовать комплексирование данных достаточно широко, что соответственно расширяет сферу его применения.

Говоря о причинах введения технологии комплексирования данных в технике, можно выделить основные:

- удешевление программной обработки информации по сравнению с установкой новых дополнительных датчиков;
- минимизация энергозатрат всего МР в целом, поскольку, как правило, энергозатраты на программную обработку информации меньше, чем на обеспечение функционирования самих датчиков;
- минимизация и миниатюризация компонентов, установленных на МР, поскольку, как правило, введение дополнительного алгоритма обработки данных требует меньших изменений в структуре робота, по сравнению с установкой новых датчиков. Это особенно критично для роботов, предназначенных для работы в агрессивной среде и имеющих защищенные объемы для оборудования;
- уменьшение числа внешних интерфейсов между СУ МР и датчиками и, как следствие, рост надежности МР;
- уменьшение взаимовлияния между компонентами МР путем минимизации их числа и эффективного разнесения их в пространстве;
- возможность применения более дешевых датчиков при обеспечении того же уровня качества предоставления информации;
- ограниченность разрешающей способности и зоны покрытия многих видов современных датчиков;
- перенос части нагрузки по аналитической обработке информации с человека-оператора МР на систему управления МР;
- повышение универсальности путем применения одного и того же набора датчиков для решения мобильным роботом различных функциональных задач.

Комплексирование данных в мобильной робототехнике

На современном этапе развития комплексирования данных можно говорить о различных типах комплексирования данных. Автор предлагает выделить следующие виды комплексирования данных, которые наиболее часто встречаются в мобильной робототехнике:

- ♦ **комплексирование данных по времени**, при котором, базируясь на тенденции изменения одного параметра субъекта, можно получить информацию о других параметрах субъекта (имеются в виду временные преобразования информации). Как правило, такой вид комплексирования применяется при отсутствии источников, позволяющих получить информацию о требуемых пара-

метрах непосредственно или же с целью минимизировать число источников информации, установленных на роботе, прежде всего датчиков.

Другим случаем комплексирования данных по времени является применение истории значений данных в качестве вспомогательного источника информации для оценки текущих значений параметров. Это делается для того, чтобы снизить влияние ошибочных чтений показаний приборов или шума в информационных системах. На базе этого подхода работают различные фильтры данных (например, фильтр Калмана, фильтр частиц и другие). Подробнее об этом написано в [4];

- ♦ **комплексирование данных по надежности**, при котором используются показания нескольких источников информации, за счет чего повышается надежность распознавания информации, передаваемой этими источниками. Например, в системах обеспечения безопасности (в первую очередь, безопасности человека) в робототехнических системах принято устанавливать параллельно два или более датчиков.

Этот подход применяется потому, что всякий источник информации (как и любой материальный объект) может не сработать, т. е. может произойти сбой. В ситуациях, когда такой сбой работы источника информации недопустим, устанавливают в одном и том же месте несколько одинаковых источников информации.

К этому же случаю можно отнести применение комплексирования данных от нескольких датчиков с низкой точностью. Получаемая при этом информация является более точной, чем показания только одного из датчиков. Как правило, такие комплекты датчиков низкой точности дешевле одного высокоточного датчика;

- ♦ **комплексирование данных по расположению** подразумевает использование информации от нескольких источников с ограниченной зоной действия (например, датчиков) или функционально ограниченных для воссоздания более полной картины мира (рис. 1, см. третью сторону обложки);

- ♦ **комплексирование данных по принципу действия датчика** применяется в случае, если не существует источника информации, достаточно надежно определяющего факт какого-либо явления. Если же имеется несколько источников различной природы, определяющих факт явления с недостаточной надежностью (рис. 1, см. третью сторону обложки), то их суммирование может обеспечить требуемый уровень надежности [4], [9].

Аппаратно такие датчики нередко реализуются в едином блоке. Примером может выступить класс бесплатформенных инерциальных навигационных

систем, объединяющих в своем составе несколько датчиков различных типов (как правило, акселерометры, датчики угловых скоростей, датчики спутниковой навигации, магнитометры и пр.). Пример такого устройства приведен на рис. 2 (см. третью сторону обложки).

♦ **комплексирование данных по типу (природе) данных** применяется в случае, когда один вид информации может быть недостаточен для распознавания ситуации или явления. Как правило, это особенно актуально для операций распознавания объекта. В таких случаях оценивается сразу несколько различных параметров, что позволяет более уверенно определить тип объекта.

Фактически все частные случаи комплексирования данных в мобильной робототехнике могут описываться вышеперечисленными типами комплексирования данных или их комбинациями.

Применяемые архитектуры комплексирования данных

Современные мобильные роботы представляют собой сложнейшую интеллектуальную систему с большим числом информационных потоков [6]. Для анализа такого количества данных путем комплексирования требуется упорядочить информационные потоки, чтобы иметь возможность легко программировать мобильные роботы.

Одним из первых предложений в этой области явилась архитектура (US Joint Directors of Laboratories — JDL), которая была разработана в 1985 г. под эгидой Департамента обороны США.

Модель JDL включает пять уровней обработки данных и базу данных, объединенных единой шиной. Предложенные пять уровней обработки не строго последовательны и могут выполняться параллельно. Модель JDL представлена на рис. 3.

Данная модель является достаточно популярной в системах комплексирования (например, [5]). Несмотря на свое военное происхождение она с успехом применялась и в некоторых коммерческих приложениях.

Однако данная модель имеет следующие недостатки [8]:

- модель всякий раз компонуется вокруг специфической информации или данных. По этой причине сложно переконфигурировать систему, построенную на основе данной модели, для использования с другими приложениями;
- модель является очень абстрактной, что делает сложной интерпретацию отдельных ее частей и последующее приложение к решению специфических задач;
- модель в общем случае легко понимаема, но не показывает пользователю, какие методы должны использоваться для ее реализации, т. е. не помогает в формировании архитектуры реальной системы.

В [5] представлен модифицированный вариант архитектуры JDL. Работа интересна тем, что является отечественной (Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН) разработкой в данной области.

Оборонное ведомство Великобритании предложило так называемую модель "Водопад" (*Waterfall model*), которая фактически концентрируется на ком-

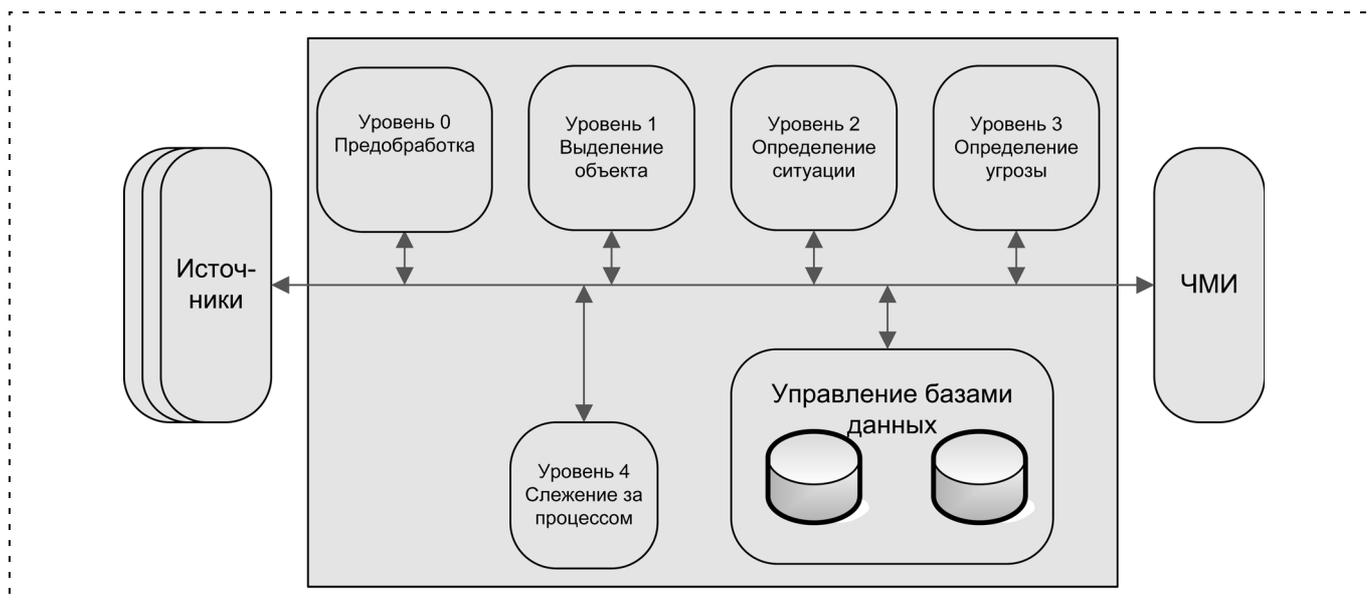


Рис. 3. Архитектура комплексирования по модели JDL

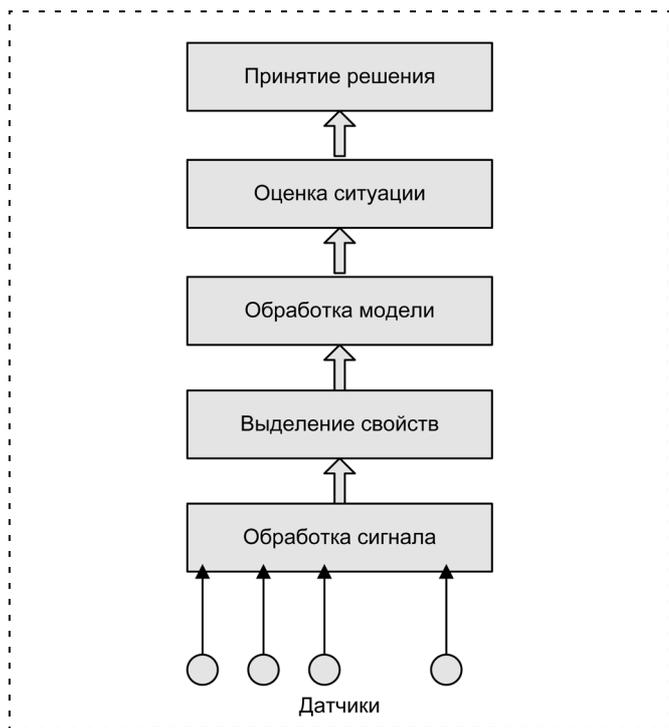


Рис. 4. Архитектура комплексирования по модели Водопад

плексировании данных нижних уровней. Ее архитектура представлена на рис. 4.

Помимо этого широко распространенными являются:

- *модель Бойда* (предложена Бойдом, Boyd), которая представляет собой цикл, составленный из четырех этапов. Фактически, он базируется на классическом механизме принятия решений в военных операциях и составляет так называемую цепь НОРД (OODA);
- *архитектура ЛААС* (LAAS — Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systemes), представляющая собой интегрированную архитектуру для проектирования и создания мобильных роботов с учетом необходимости функционирования в режиме реального времени, а также повторного использования кодов;
- архитектурная модель "Сборник" (The Omnibus Model), представленная в 1999 г. Бедвортом и О'Бриеном (Bedworth и O'Brien). В отличие от модели JDL модель "Сборник" определяет порядок процессов и реализует полную цикличность. Структура цикла напоминает аналогичную в модели Бойда, однако более точно описывает структурирование уровней;
- другие структуры [1].

Подводя итог рассмотрению представленных наиболее популярных архитектур комплексирования данных и проанализировав их достоинства и недостатки, а также особенности применения дан-

ных моделей в мобильной робототехнике, можно сформулировать критерии, которые предъявляются к методу комплексирования данных в составе мобильных роботов:

- метод комплексирования данных должен обладать иерархической структурой. Современные мобильные роботы являются сложными системами, состоящими из сотен и более компонентов. Именно иерархическая структура позволяет управлять такими сложными системами;
- метод комплексирования данных должен наглядно отражать иерархию процессов, происходящих в структуре мобильных роботов, поскольку именно такая четкая и наглядная структура позволит инженеру корректно описать все закономерности такой сложной системы, как современный робот, и его взаимодействие с окружающей и технологической средой;
- метод комплексирования данных должен обладать способностью к введению обратных связей в структуру системы, поскольку именно обратные связи позволяют значительно повысить интеллектуальность технических систем;
- метод комплексирования данных должен наряду с наличием иерархии обладать возможностью сквозной передачи данных от одних уровней к другим, при необходимости минуя промежуточные уровни.

Иерархическое комплексирование данных

Элементы иерархии присутствуют и в некоторых из существующих моделей комплексирования данных, описанных выше. Однако, как уже отмечалось, они не обладают достаточно четким разграничением задач иерархии.

Для осуществления комплексирования данных на базе *иерархического комплексирования данных* предлагается следующая архитектура, изображенная на рис. 5.

При рассмотрении структуры иерархического комплексирования данных используются следующие термины:

- *параметр* (робота или среды) — понятие, характеризующее, как правило, количественное значение свойств отдельного компонента (или группы компонентов) робота или среды, которые могут изменяться во времени;
- *состояние* (робота или среды) — обобщенное понятие, характеризующее количественное или качественное значение свойств робота в целом или среды, которые могут изменяться во времени;
- *тип объекта* — обобщенная классификация объекта, позволяющая определить его типовые ха-

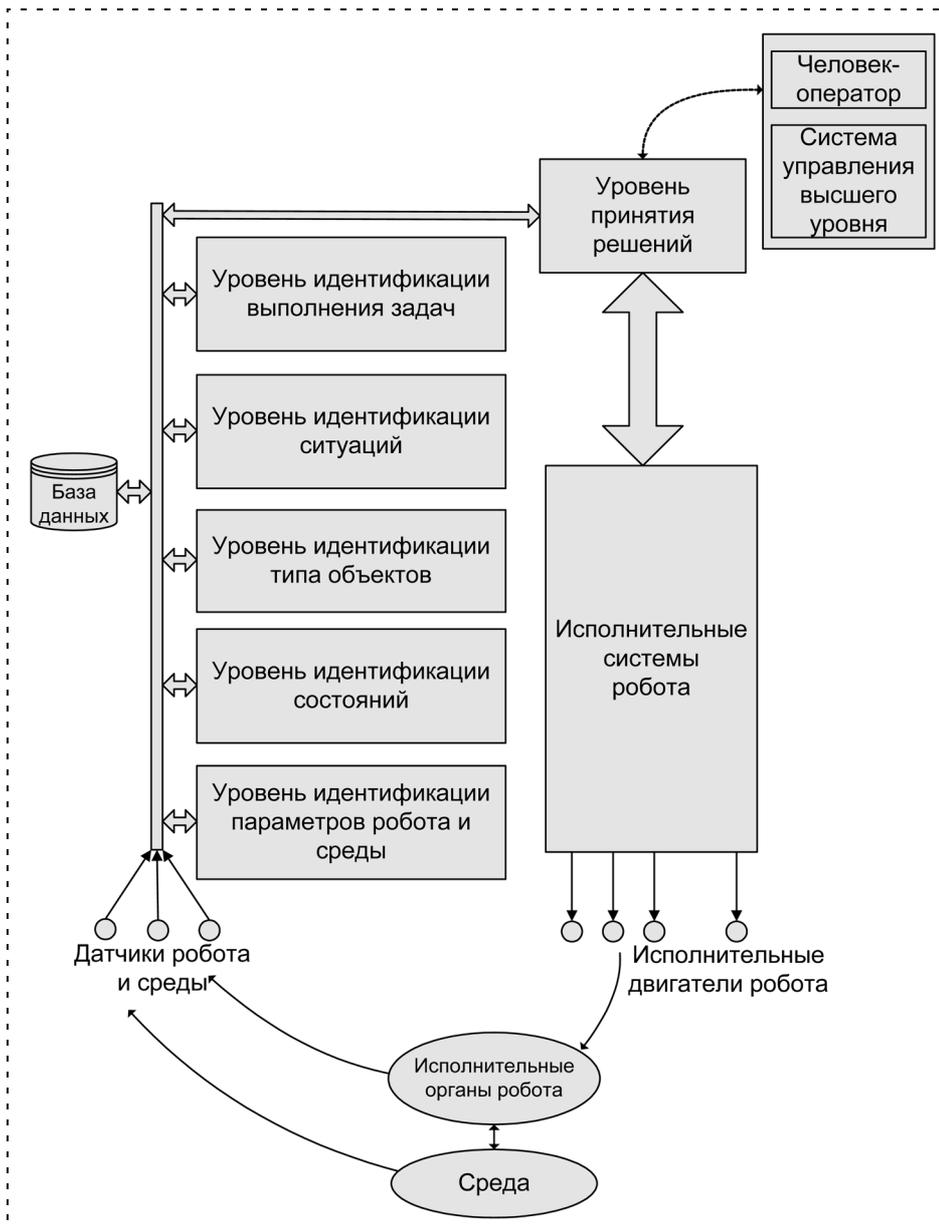


Рис. 5. Структура иерархического комплексирования данных

рактеристики и возможные виды его взаимодействия с роботом;

- *ситуация* — обобщенное понятие, описывающее (как правило, качественно) комплекс взаимодействий между роботом и средой, которые могут изменяться во времени;
- *задачи* — набор последовательно-параллельных ситуаций, которые робот должен обеспечить в своем взаимодействии со средой;
- *задание* — обобщенное понятие, включающее в себя комплекс задач (в систему может включаться дополнительно уровень идентификации выполнения задания).

нях иерархии, равно как и использовать эту информацию в информационных потоках управления самого робота.

Данные последовательно комплексировуются на всех уровнях иерархии. Очевидно, что в более простых системах может присутствовать меньшее число уровней иерархии комплексирования данных. Также это характерно для систем с меньшим уровнем автономности.

Системы более совершенные будут осуществлять комплексирование по всем уровням.

При необходимости системой может запрашиваться дополнительная информация из базы данных.

Рассмотрим данную структуру в контексте функционирования мобильного робота.

Данные от различных сенсоров поступают на общую шину, причем (в этом важное преимущество данной схемы) данные могут поступать как с датчиков, установленных на самом роботе, так и с датчиков, установленных удаленно. При этом датчики передают данные о состоянии как компоненте самого робота, так и о состоянии окружающей среды.

Применение общей шины является достаточно важным фактором, поскольку позволяет использовать информацию, полученную на различных этапах комплексирования, различными уровнями иерархии. Как правило, высшие уровни иерархии используют данные низших уровней иерархии. Такой обмен данными может осуществляться не обязательно строго последовательно, т. е. комплексирование на одном уровне иерархии может использовать информацию, полученную как на предыдущем уровне иерархии, так и на еще более низких уровнях иерархии.

Это также позволяет при необходимости эффективно передавать человеку-оператору (или же вышестоящей системе управления) информацию, полученную на различных уров-

Конечным звеном системы является уровень принятия решения, который передает команду о дальнейшем функционировании управляющим элементам системы управления робота.

Можно выделить следующие преимущества иерархического комплексирования данных:

- адекватность иерархической структуре современных мобильных роботов и их систем управления;
- наглядное отражение иерархии процессов, происходящих в информационной структуре мобильных роботов, поскольку именно такая четкая и наглядная структура позволит оператору корректно описать и проследить все закономерности сложной системы;
- способность к широкому введению обратных связей в структуру системы, так как именно обратные связи позволяют значительно повысить интеллектуальность технических систем;
- возможность сквозной передачи данных от одних уровней к другим, при необходимости минуя промежуточные уровни;
- ряд преимуществ по сравнению с зарубежными аналогами — JDL и Водопад.

Пример построения потоков данных мобильного робота по архитектуре иерархического комплексирования данных представлен на рис. 6 (см. третью сторону обложки). В данном примере роботу-заправщику поставлены две задачи: обнаружить трактор и приблизиться к нему и избегать столкновения с автомобилем.

Программная реализация иерархического комплексирования данных требует применения интеллектуальных методов управления [1], таких как не-

четкая логика, нейронные сети, экспертные системы, нечеткие когнитивные карты.

В настоящее время часть разработок, представленных в этой статье, проходят испытания в рамках НИР, выполняемой кафедрой робототехники и мехатроники МГТУ "СТАНКИН" "Система идентификации корпусов судов для автономных морских роботов" (заказчик: Европейская комиссия, Европейский Союз) [7].

Список литературы

1. **Интеллектуальные системы автоматического управления** / Под ред. И. М. Макарова, В. М. Лохина. М.: Физматлит, 2001.
2. **Ермолов И. Л.** Автономность мобильных роботов, ее сравнительные меры и пути повышения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 6. С. 23—28.
3. **Сосновский А. А.** Авиационная радионавигация. Справ. М.: Транспорт, 1990.
4. **Фомичев А. А., Успенский В. Б., Счастливец К. Ю., Брославец Ю. Ю., Колчев А. Б.** Комплексирование информации в интегрированной навигационной системе с лазерными гироскопами на основе обобщенного фильтра Калмана // Тр. X Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам 26—28 мая 2003 г., Санкт-Петербург, Россия.
5. **Городецкий В. И., Карсаев О. В., Самойлов В. В.** Обработка информации в системах анализа и понимания сложных ситуаций. Тр. III Всерос. науч.-практ. конф. "Перспективные системы и задачи управления". п. Домбай, 2008.
6. **Подураев Ю. В.** Мехатроника: основы, методы, применение: Учеб. пособие для студентов вузов. М.: Машиностроение, 2006.
7. www.hismar.eu
8. **Elmenreich Wilfried.** Sensor Fusion in Time-Triggered Systems. Technischen Universitat Wien, Wien, im Oktober 2002.
9. **Зенкевич С. Л., Минин А. А.** Построение карты мобильным роботом, оснащенным лазерным дальномером, методом рекуррентной фильтрации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 8.

УДК 004.89 + 004.65: 004.896

И. М. Макаров, акад. РАН, зав. каф., **В. М. Лохин**, д-р техн. наук, проф., зам. зав. каф.,
С. В. Манько, д-р техн. наук, проф., **М. В. Кадочников**, аспирант,
Г. С. Востриков, аспирант,
 МИРЭА (ТУ), Москва

Использование генетических алгоритмов в задачах автоматического обучения и самоорганизации интеллектуальных робототехнических систем

Обсуждаются проблемы разработки интеллектуальных робототехнических систем, обладающих способностью к самообучению и самоорганизации. Рассматриваются особенности применения генетических алгоритмов для автоматического формирования программ управления движением автономных реконфигурируемых мехатронно-модульных роботов.

Ключевые слова: генетические алгоритмы, интеллектуальная система, самообучение, реконфигурируемый робот.

Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу

УДК 519.95

Н. Н. Пашков, канд. техн. наук, доц., зав. каф.,
Иркутский государственный университет путей сообщения

Аналитический синтез оптимальных траекторий программного движения многозвенного манипулятора

Рассматривается алгоритм аналитического синтеза оптимального по быстрдействию программного управления системой взаимосвязанных исполнительных приводов многозвенного упругого манипулятора.

Ключевые слова: оптимальная по быстрдействию траектория, программное управление, взаимосвязанные исполнительные приводы, упругий многозвенный механизм.

Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу

УДК 621.865.8

В. Ф. Филаретов, д-р техн. наук, проф., зав. лаб, **А. А. Кацурин**, канд. техн. наук, науч. сотр.
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

Метод полуавтоматического позиционного управления манипулятором с помощью телекамеры, изменяющей пространственную ориентацию своей оптической оси

Рассматривается метод полуавтоматического позиционного телеуправления многостепенным манипулятором с помощью задающего устройства, кинематическая схема которого отличается от кинематической схемы манипулятора. При этом телекамера, формирующая изображение на телемониторе оператора, в процессе выполнения рабочих операций может менять свою пространственную ориентацию. Предложен и исследован алгоритм работы вычислительной системы, формирующей задающие воздействия на приводы всех степеней подвижности манипулятора.

Ключевые слова: манипулятор, мобильная телекамера, полуавтоматическое управление.

Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу

CONTENTS

Filimonov N. B., Demenkov M. N. *Discrete Look-Ahead Control by Linear Dynamic Objects with Parametric Polyhedral Indeterminacy* 2

The method of control by discrete linear dynamic objects with parametric polyhedral indeterminacy is discussed. The heart of the method is the ideology of discrete control with multistep prediction and optimization of control on sliding interval. Algorithmization of the method amounts to the construction of polyhedral fields of controllability and decision of linear inequalities systems by programming.

Keywords: linear objects of control; polyhedral parametric perturbations, discrete robust control, polyhedral strategy.

Slita O. V., Ushakov A. V. *Modal Control: Two Ways of Realization on Similarity Concept* 7

Two ways of realization of similarity concept when solving modal control task are considered: forward modal control and feedback modal control. Methods of control costs estimation and system sensitivity analysis using forward modal control and design algorithm of systems with prescribed quality coefficients using feedback modal control are proposed.

Keywords: vector-matrix similarity, forward modal control, estimation of control costs, sensitivity analysis, feedback modal control, prescribed quality coefficients.

Asanov A. Z., Karimov V. S. Application the Embedding Technology in the Design Problem of the Automatic Control System for the Multivariable Controlled Plant With Time Delays on the State Vector 13

Design of the automatic control system for the multivariable controlled plant with time delays on the state vector was considered using the system embedding technology. Problem algorithms of design are offered. On a numerical example efficiency of application of the embedding technology is shown at design of the automatic control system with time delays.
Keywords: system embedding technology, multivariable controlled plant, time delays on the state vector, design of the automatic control system, algorithms of the design.

Alpatov B. A., Balashov O. E., Stepashkin A. I. Increase of Videocomputer Objects Tracking Systems Accuracy with Biaxial Gimbal Suspension 20

Algorithm of control biaxial gimbal suspension drives of videocomputer objects tracking systems are consider. Tracking systems are dispose on mobile foundation.
Keywords: automatic target tracking, biaxial gimbal suspension, prediction of course to object.

Shendrik D. A., Frantsuzova G. A. The Approach to Complex Modelling of Controlled an Optical Line-of-Sight Stabilization System 24

Application of modern computer process engineerings in which basis applied software packages lay, has allowed to change qualitatively and essentially to improve a technique of designing and research of controlled an optical line-of-sight stabilization system. The offered approach to complex modelling, gives the chance to translate a research technique in the virtual reality, to realise necessary researches by means of qualitative and quantitative responses.
Keyword: optical line-of-sight stabilization system, optical LOS, two-mass system, complex model, PID control.

Korotkiy D. A., Ustimenko A. B., Renzhin D. V. Universal Test System Archjctecture for the Functional Tests of Embedded Software in the Mechatronic 29

This paper presents a universal test system architecture to realize a harmonious integration of today's existing heterogeneous test tools along the mechatronic development process. The test system architecture improves the classic partition of test system – test automat and test bed – with five functional levels and supports the reuse of the existing test components like test cases, test tools and test environments.
Keywords: mechatronics, embedded software, functional test, test tool systematization.

Mironov B. A., Filippov S. I. Choosing of the Method for Definition of Reliability for Software of Mechatronic Systems 34

In that article were analysed different methods of definition the reliability, for software. Was chosen the most convenient method for calculation of reliability, which allow to reduce the time for testing of software, with given probability of the faultless work of application. Therefore, The most rational path of work on software debugging has been selected.
Keywords: mechatronic, mechatronic systems, reliability of software, method of calculation of reliability definition of reliability.

Gorbatenko B. B., Maksimova L. A., Rezchikov A. F., Ryabukho V. P. Reconstruction of Object Image from Record of Intensity Distributipn of Diffraction Field for the Control of Microdisplacement 39

Method of scattering object image reconstruction bay recording of intensity of coherent speckle-modulated diffraction field without use of reference coherent field is considered. Results of natural, numerical experiments and numerical modeling of processes of hologram structure synthesis and processes of reconstruction of various form object image are discussed. Possibility of automation of processes of artificial hologram structure creation and image reconstruction is considered. The developed method of recording and reconstruction of image is used for precision measurement of microdisplacement of scattering object.
Keywords: image formation, diffraction, digital holography, speckle-pattern, Fourier transform, microdisplacement testing.

Sakhanski S. P. Peculiarities of Determination of Solidifying Interface Form at Germanium Monocrystal Growing . . 45

Mode of monitoring of crystal rotation speed in the contact method of monocrystal growing by Czochralski method was examined which allows to display solidifying interface form by standard etching mode. This mode is used to correct solidifying interface sagging at batch growing of germanium monocrystals in 100 orientation due to change crystal rotation speed rate input in computer control program at a given area.
Keywords: crystal-melt front shape; crystal front inflection; crystal rotation rate inhibition.

Ermolov I. L. *Data Fusion in Unmanned Systems. Hierarchical Data Fusion Architecture* 48

This paper is devoted to data fusion in unmanned systems. This area of research is considered to be one of critical technologies in modern robotics. The data fusion is discussed as well as its application in unmanned systems. Author presents a new data fusion architecture – hierarchical data fusion. The final goal of this research is increase of autonomy of unmanned system. This work has been performed in Department of Robotics and Mechatronics of Moscow State Technological University "STANKIN".

Keywords: data fusion, sensor fusion, mobile robotics, robot autonomy, intelligent systems.

Makarov I. M., Lohin V. M., Manko S. V., Kadochnikov M. V., Vostrikov G. S. *Genetic Algorithms Use in Intelligent Robotic Systems Automatic Education and Self-Organizing Problems* 53

The article deals with the investigation of self-instructing and self-organizing intelligent robotic systems' development problems.

The particularities of genetic algorithms' application to the automatic formation of control movement programs for autonomous reconfigurable mechatronic modular robots are considered.

Keywords: genetic algorithms, intelligence system, self-training, reconfigurable robot.

Pashkov N. N. *Analytical Synthesis of Optimum Trajectories of Movement of Ladder Elastic Mechanisms* 54

The article deals with the analytical synthesis algorithm of optimum fast programmed control of interconnected running drives trajectories movements of flat ladder elastic mechanisms.

Keywords: optimum fast trajectory, programmed control, interconnected running drive, the ladder elastic mechanism.

Filaretov V. F., Katsurin A. A. *Method of Semiautomatic Position Control by Manipulator with Help of Television Camera, which Changes Orientation of its Optical Axis* 54

In the paper it is described the method of semiautomatic position telecontrol by multi-link manipulator with help of setting devices, which kinematic scheme is differed from kinematic scheme of manipulator. In this case the television camera which forms the image on the operator telemonitor can change its spatial orientation during performance of working operations. The algorithm of work of computing system which forms setting signals on drives of manipulator is represented and researched.

Keywords: manipulator, mobile telecamera, semiautomatic control.

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4/1

Телефон редакции журнала: **(495) 269-5397**, тел./факс: **(495) 269-5510**

Дизайнер *Т.Н. Погорелова*. Художник *В.Н. Погорелов*.
Технический редактор *О.А. Ефремова*. Корректор *Е.Г. Волкова*.

Сдано в набор 01.07.2008. Подписано в печать 12.08.2008. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,87. Заказ 895. 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