

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 8 (89)

август

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

- Афанасьева К. Е., Ширяев В. И.** Адаптивное оценивание и прогнозирование в динамических системах на основе гарантированного подхода 2
- Цыкунов А. М.** Алгоритм робастного управления линейными динамическими объектами по выходу 7

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

- Анисимов А. А., Тарарыкин С. В.** Автоматическая настройка полиномиальных регуляторов электромеханических систем с использованием искусственной нейронной сети 13
- Бурлаченко Т. Б., Морозова Т. Ю.** Нейросетевая оптимизация абдуктивных выводов в задачах диагностики технических систем 19

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Кулаков Ф. М., Чернакова С. Э.** Информационная технология обучения роботов показом движений. Ч. II. Алгоритмы и реализация модели формы движения 24
- Петухов С. В.** Методы автономной навигации при попятном движении робота по запомненным ориентирам на пройденной траектории 30

ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ

- Лазичев А. А., Самулеева Ю. А.** Система автоматизированной настройки манометров с помощью нанесения шкал 35
- Седов А. В., Тришечкин Е. В.** Формула для вычисления спектра дискретного сигнала при варьировании частоты следования отсчетов в системах контроля и управления 39
- Саханский С. П.** Измерение площади монокристалла в системе автоматического управления выращиванием германия 44

СУДОВАЯ АВТОМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ И РЕЧНОМ ФЛОТЕ

- Кислицын А. В., Буйневич М. В., Метелицин В. В.** О повышении безопасности мореплавания путем интеграции систем наблюдения различных ведомств, занимающихся морской деятельностью 49
- Борейко А. А., Мун С. А., Щербатюк А. Ф.** Определение движения подводного аппарата на основе обработки видеоизображений 53
- Тювин А. В., Афонин А. А., Черноморский А. И.** Оценка потенциальной точности морских векторных гравиметрических измерений 53
- Дорожко В. М.** Оценка информационного признака начального этапа поворота морского судна 54
- Королев В. В., Жадобин Н. Е., Заставный С. В.** Многоканальная система контроля напряженного состояния корпуса судна 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 519.8

К. Е. Афанасьева, аспирант,

В. И. Ширяев, д-р техн. наук, проф.,

Южно-Уральский государственный университет

Адаптивное оценивание и прогнозирование в динамических системах на основе гарантированного подхода

Предложены алгоритмы оценивания и прогнозирования динамических систем, описывающих эволюцию объекта, с использованием информации о "родственных" объектах в случае, когда информация о возмущениях в системе и помехах (ошибках) в измерениях известна с точностью до некоторых допустимых областей их изменения. В случае обнаружения отклонения поведения объекта от заданной траектории выбираются объекты-"родственники" и по их траекториям формируется траектория движения рассматриваемого объекта. Применение алгоритмов иллюстрируется на данных о числе абонентов сотовой связи в регионах.

Ключевые слова: адаптивное гарантированное оценивание, прогнозирование, неопределенность, "родственные" объекты, параллельная обработка фильтрами (банк фильтров).

Введение

Во многих прикладных задачах движение объекта по одной траектории сменяется движением по другой траектории из рассматриваемого множества типов траекторий. В задачах навигации и сопровождения летательных аппаратов [1, 2] изменение типа траектории может классифицироваться как "маневр". В терминах социально-экономических объектов изменение внешних или внутренних условий может повлечь за собой изменение развития объекта, которое проявится в виде изменения типа траектории объекта. В случае если имеется множество аналогичных объектов, движение которых происходит сходным образом, представляется возможным в момент изменения характера движения объекта (разладки) выделить объект (объекты), траектория движения которого близка к рассматриваемой. Далее можно определить параметры модели, опираясь на известную траекторию движения схожего ("родственного") объекта. Оценка вектора дальнейшего состояния объекта может быть вычислена как "усредненная" оценка на основе параллельной работы фильтров, соответствующих одной из моделей "родственных" объектов на основе применения, например, калмановской фильтрации [3].

В данной работе оценка состояния объекта также вычисляется на основе параллельной работы фильтров, но в предположении либо отсутствия информации о законах распределения ошибок в измерениях и возмущениях, действующих на объект, либо при условии, что ошибки не подчиняются аксиоматике вероятностного подхода [4]. Поэтому применяется гарантированный подход с использованием минимаксных фильтров [5, 6], где оценка состояния объекта вычисляется как пересечение множеств, полученных от нескольких фильтров.

Если при обработке радиолокационной информации при сопровождении целей радиотехнические помехи можно считать случайными, то для социально-экономических объектов такой вывод не всегда оправдан [7]. По словам Калмана Р. Е. [4], "для того чтобы моделировать неопределенность при помощи вероятностного механизма, необходимо чересчур много информации, которая не может быть извлечена... в большой массе практических задач".

Таким образом, преимуществом гарантированного подхода к задачам оценивания в условиях неопределенности является минимум априорной информации об объекте, что более адекватно реальности в случае, когда объект мало изучен. Работа продолжает исследования [2, 8] и развивает подход [5, 6, 9, 10].

Постановка задачи

Известно множество объектов $J = \{1, 2, \dots, m\}$, движение которых описывается линейными моделями с известными или не полностью известными параметрами. Предполагается, что истинная модель объекта неизвестна, поэтому вектор состояния объекта оценивается путем обработки нескольких моделей, описывающих движение q "родственных" объектов, где $q < m$. Полагаем, что истинная модель объекта может как совпадать с одной из q моделей, так и быть близкой, т. е. движение объекта наиболее похоже на движение одного из объектов множества J . Движение объектов описывается линейными моделями вида

$$\mathbf{x}_{ik+1} = \mathbf{A}_{ik}\mathbf{x}_{ik} + \mathbf{B}_{ik}\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_{ik}, \\ k = 0, 1, \dots, N-1, i = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

где m — число моделей, k — дискретные моменты времени. На каждом шаге поступают измерения о каждом из объектов

$$\mathbf{y}_{ik+1} = \mathbf{G}\mathbf{x}_{ik+1} + \mathbf{v}_{ik+1}, k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (2)$$

Информация о векторах x_{i0} , w_{ik} , v_{ik+1} , u_k ограничивается заданием включений

$$x_{i0} \in X_0, v_{ik+1} \in V_i, w_{ik} \in W_i, u_k \in U, \quad (3)$$

где X_0 , V_i , W_i , U — известные выпуклые компакты евклидовых пространств R^n , R^r , R^p и R^n соответственно. Матрицы A_{ik} , B_{ik} , G считаются известными.

Используя минимаксный подход, можно получить оценку текущего состояния следующим образом. В момент обнаружения изменения (разладки) определяются "родственные" объекты, соответственно, имеем несколько моделей вида (1). Разладка (или обнаруживаемое изменение) проявляется в расхождении между тем, что наблюдается, и тем, что прогнозируется моделями "родственных" объектов. При необходимости по данным "родственных" объектов определяются неизвестные параметры моделей (1). Тогда в дальнейшем оценка вектора состояния объекта вычисляется согласно алгоритму адаптивного оценивания.

Алгоритм адаптивного гарантированного оценивания

Если известна одна модель вида (1) и поступают измерения об объекте в соответствии с уравнением (2) и условием (3), то решение задачи оценивания вектора состояния (1)–(3) на $(k+1)$ -м шаге дается известными уравнениями минимаксного фильтра [5, 6]

$$X_{k+1} = X_{k+1/k} \cap X[y_{k+1}], \quad k = 0, \dots, \quad (4)$$

где X_{k+1} — информационное множество и $x_{k+1} \in X_{k+1}$; $X_{k+1/k} = A_k X_k + B_k U + W$ — априорное множество прогнозов; $X[y_{k+1}] = \{x | Gx + v = y_{k+1}, v \in V\}$ — множество, совместимое с результатами измерения. (6)

Для осуществления фильтрации при поступлении измерения y_k необходимо построение информационного множества X_k , что приводит к необходимости согласно (4)–(6) выполнения над множествами и векторами в темпе реального времени операции пересечения множеств, суммы множеств и векторов, умножения множества на матрицу.

Под знаком "+" в (5) понимается сумма множеств в смысле Минковского, т. е. если V_1 , V_2 — заданные множества, то $V_1 + V_2 = \{x = x_1 + x_2 | x_1 \in V_1, x_2 \in V_2\}$ (рис. 1).

Если одно из слагаемых — множество, а другое — вектор, то под знаком "+" понимается сдвиг множества на вектор, т. е. если V — множество, а z — вектор, то $V + z = \{x = v + z | v \in V\}$. Под знаком "∩" понимается операция пересечения множеств.

Операция AX представляет собой умножение множества на матрицу и определяется следующим образом: если A — $m \times n$ -мерная матрица, а V — заданное множество, то $AV = \{x = Av | v \in V\}$.

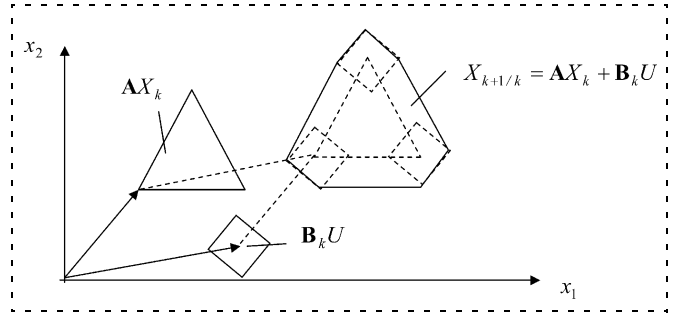


Рис. 1. Сумма двух многогранников (двухмерный случай)

Пусть теперь возникла ситуация, когда неизвестна истинная модель для объекта, а имеется множество из q моделей вида (1), каждой из которых может принадлежать движение объекта, известны наблюдения об объекте y_{k+1} , которые являются неточными и подчиняются уравнению (2). Необходимо получить оценку в виде информационного множества объекта на $(k+1)$ -м шаге. Создается банк из q минимаксных фильтров вида (4)–(6):

$$X_{ik+1} = (A_{ik} X_k + B_{ik} U + W_i) \cap X[y_{k+1}], \quad k = 0, \dots, i = 1, \dots, q, \quad (7)$$

где $X[y_{k+1}]$ вычисляется в соответствии с (6). Обозначим через $L_{k+1} = \{1, 2, \dots, q\}$ — множество моделей вида (1) на шаге $k+1$. Если при $l_1 \in L_{k+1}$ $X_{l_1 k+1} = \emptyset$, тогда $L_{k+1} = L_{k+1} \setminus l_1$. Если при $l_1, l_2 \in L_{k+1}$ $X_{l_1 k+1} = \emptyset$ и $X_{l_2 k+1} = \emptyset$, тогда $L_{k+1} = L_{k+1} \setminus \{l_1, l_2\}$ и так далее. Тогда результирующее информационное множество получим как пересечение

$$X_{k+1} = \bigcap_{i \in L_{k+1}} X_{ik+1}. \quad (8)$$

Таким образом, множества X_{k+1} для всех $k+1 \geq 1$ удовлетворяют рекуррентным соотношениям (7), (8). Для $q = 1$ X_{k+1} совпадает с оценкой информационного множества для минимаксного фильтра [5]. Двухмерный случай (для $q = 2$) иллюстрирует рис. 2.

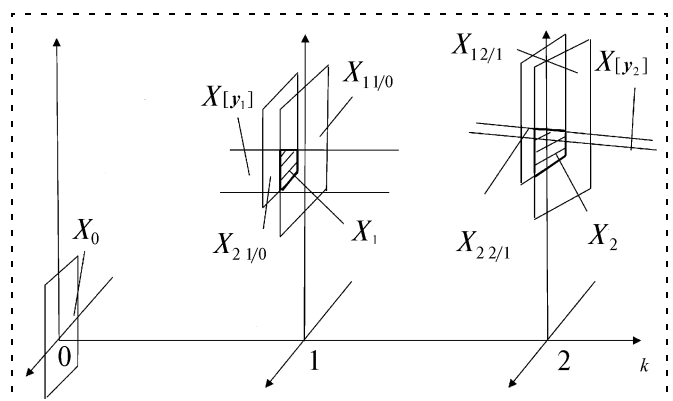


Рис. 2. Операция (8) для $q = 2$ (двухмерный случай)

Определение. "Ближайшей" моделью к истинной модели движения объекта для момента времени k будем называть i -ю модель вида (1), для которой расстояние между чебышевским центром $\mathbf{x}_{ik}^*$ информационного множества X_{ik} , полученного в результате (7), и чебышевским центром $\mathbf{y}_k^*$ множества $X[\mathbf{y}_k]$ минимально:

$$d_k = \min_i d_{ik}, \quad d_{ik} = \|\mathbf{x}_{ik}^* - \mathbf{y}_k^*\|, \quad (9)$$

здесь $\|\cdot\|$ понимается как евклидова норма.

Таким образом, в результате оценивания с помощью нескольких параллельно работающих минимаксных фильтров можно следить с использованием величин d_{ik} , какой из моделей соответствует движение объекта. Расстояния d_{ik} в данном случае можно рассматривать как аналог апостериорных вероятностей, которые рассчитываются в алгоритме адаптивного оценивания с помощью калмановской фильтрации [3, 11].

В случае если в результате выполнения операции пересечения (8) $X_{ik+1} = \emptyset$ для $\forall i = \overline{1, q}$, то делается вывод о разладке. Для определения новых q моделей вида (1) привлекается информация о развитии схожих на данном этапе объектов за счет выбора траекторий "родственных" объектов по критерию

$$\sum_{k=p}^{p+\Delta} (\mathbf{y}_k - \mathbf{y}_{k \pm \tau^j}^j)' \mathbf{Q}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{y}_{k \pm \tau^j}^j) \rightarrow \min_{\tau^j, j \in J}, \quad (10)$$

где $J = \{1, 2, \dots, m\}$ — множество аналогичных объектов, $m > q$; τ^j — сдвиг по оси времени для наложения траектории j -го объекта на траекторию объекта, для которого ищутся "родственники"; Δ — интервал минимизации, т. е. наилучшего совпадения траекторий; $\mathbf{y}_{k \pm \tau^j}^j$ — вектор измерений в момент времени $k \pm \tau^j$ для j -го аналогичного объекта; $\mathbf{y}_k$ — вектор измерений интересующего объекта; $p + \Delta$ — момент времени, в который необходимо выбрать "родственные" объекты; $\mathbf{Q}_k$ — положительно определенные, симметричные матрицы.

Если в результате операции пересечения (8) возникло пустое множество по l моделям, где $l < q$, то каждая из l -х моделей заменяется на новую путем выбора l новых "родственников" согласно (10). В случае если не удастся найти все l новых "родственников" или часть из них, то число моделей уменьшается, вплоть до $q = 1$. Последовательность действий алгоритма адаптивного оценивания представлена ниже.

Шаг 1. Найти информационное множество по уравнениям (3)—(5). Если $X_{k+1} = \emptyset$, то перейти к шагу 2.

Шаг 2. Определить "родственные" объекты согласно (10), взять их модели вида (1) для дальнейшей оценки вектора состояния объекта. Перейти к шагу 3.

Шаг 3. Найти X_{ik+1} по уравнению (7). Если для $\forall i = \overline{1, q}$ $X_{ik+1} = \emptyset$, то вывод — разладка в момент времени $k + 1$, перейти к шагу 7, иначе шаг 4.

Шаг 4. Если для l множеств $X_{lk+1} = \emptyset$, где $l < q$, то соответствующие l моделей заменить на новые модели (1) путем определения "родственников", множества X_{lk+1} скорректировать. Перейти к шагу 5. Если не удастся найти часть l' или все l "родственников", тогда положить $q = q - l'$ или $q = q - l$ и перейти к шагу 5.

Шаг 5. Вычислить d_{ik} согласно (9). Перейти к шагу 6.

Шаг 6. Вычислить информационное множество X_{k+1} согласно (8), положить $k = k + 1$. Перейти к шагу 3. Если $X_{k+1} = \emptyset$, то положить $X_{k+1} = X[\mathbf{y}_{k+1}]$, $k = k + 1$, перейти к шагу 7.

Шаг 7. Заменить все q моделей, выбрав "родственные" объекты и взяв их модели вида (1) за новые. Положить $X_{k+1} = X[\mathbf{y}_{k+1}]$, $k = k + 1$, перейти к шагу 3. Если не удастся найти часть l' "родственников", тогда положить $q = q - l'$ и перейти к шагу 3.

Прогнозирование

Пусть задана последовательность измерений $\mathbf{y}_j(\cdot) = \{\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_j\}$. Если оценка вектора состояния объекта вычисляется по q известным моделям, то, очевидно, прогноз может быть получен как объединение прогнозов по всем q моделям. Но также очевидно, что в некоторых случаях множество прогнозов окажется велико, что снижает ценность прогнозов. Поэтому предлагается строить прогноз следующим образом. При определении "ближайшей" модели (9) величины d_{ik} можно упорядочить в порядке возрастания, тогда можно выделить первую "ближайшую" модель, у которой d_{ik} минимально, затем вторую "ближайшую" модель и т. д. Введем счетчики g_{ik} , которые будут подсчитывать число моментов времени, в которые i -я модель являлась первой, второй, ..., p -й "ближайшей" моделью ($p < q$). Выбор числа "ближайших" моделей обусловлен спецификой задачи и точностью требуемых прогнозов. Таким образом, если i -я модель на шаге k являлась первой или второй, ..., p -й "ближайшей" моделью, то $g_{ik} = 1$, если нет, то $g_{ik} = 0$. Например, пусть из четырех моделей ведется контроль для двух "ближайших" моделей (см. таблицу). Тогда индексы модели со значением

Измерение величины g_{ik}

$i \backslash k$	1	2	3	4	5	$\sum_{k=2}^5 g_{ik}$
1	0	1	1	1	1	4
2	1	0	0	1	0	1
3	0	1	1	0	1	3
4	1	0	0	0	0	0

$\sum_{k=j-1}^j g_{ik} \geq l$ будут искомыми индексами прогнозных моделей.

По результатам таблицы первая и третья модели — прогнозные, так как выполнено условие $\sum_{k=2}^5 g_{ik} \geq 3$, и соответствующие модели выбираются в качестве прогнозных.

Прогноз для произвольного фиксированного $N > j$ имеет вид

$$X_{k+1/j} = \bigcup_{i \in I^*} X_{ik+1/j}, \quad (11)$$

где $X_{k+1/j} = A_{ik}X_{k/j} + W_i$, $k = j, j+1, \dots$; $X_{j/j} = X_j$; $I^* = \{i_1^*, \dots, i_q^*\}$, $q^* < q$. В множество I^* включены номера тех моделей, для которых выполняется

$\sum_{k=j-1}^j g_{ik} \geq l$. Число $l+1$ означает, что за $l+1$ предыдущих шагов до начала прогноза i -я модель была "ближайшей".

При минимаксном прогнозировании за начальное информационное множество X_k^* принимается то, которое получено в результате решения задачи фильтрации для момента времени $N = k$.

Применение алгоритмов к задаче о региональных рынках

На примере задачи о развитии сотовой связи в регионах покажем, что предложенный алгоритм адаптивного гарантированного оценивания, изложенный выше, не ограничивается задачами для линейных моделей, он также может быть справедлив и для

множества объектов, движение которых описывается нелинейными зависимостями, при требовании определенных свойств функции — монотонности и липшецевости.

Рассматривается множество регионов, где для каждого региона известны данные о числе абонентов сотовой связи (рис. 3). Под % проникновения понимается число абонентов в регионе, деленное на численность населения региона. Анализируется совокупность всего рынка в регионе без детализации по компаниям-операторам. Развитие рынка может быть описано логистической кривой, но в результате выходов новых конкурентов в регион, рекламных акций операторов и других событий происходит искажение "гладкой" кривой. Эти особенности будут в модели учитываться как возмущения неопределенного характера ω_k , известные с точностью до некоторого множества W .

Изменение числа абонентов в регионе описывается в виде

$$x_{k+1} = \varphi(x_k) + \omega_k, \quad y_{k+1} = x_{k+1} + v_{k+1}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (12)$$

где $x_k \in R^1$, $\omega_k \in [-\mu, \mu] = W$, $v_{k+1} \in [-v, v] = V$, $x_0 \in [-l_0, l_0] = X_0$, здесь $\varphi(x_k) = x_k + (\alpha + \beta x_k)(N - x_k)$, числа $\mu \geq 0$, $v \geq 0$, $l_0 \geq 0$ заданы. Параметры α и β характеризуют информационное воздействие на потенциальных абонентов (влияние рекламы и степень общения покупателей между собой соответственно), N — потенциальная емкость рынка. Тогда оценка состояния рынка (12) имеет вид

$$X_{k+1} = X_{k+1/k} \cap X[y_{k+1}], \quad (13)$$

где $X_{k+1/k} = \check{X}_k + W$ — априорное множество прогнозов, $\check{X}_k = \{\varphi(x_k) | x_k \in X_k\}$; $X[y_{k+1}] = \{x | x + v = y_{k+1}\}$,

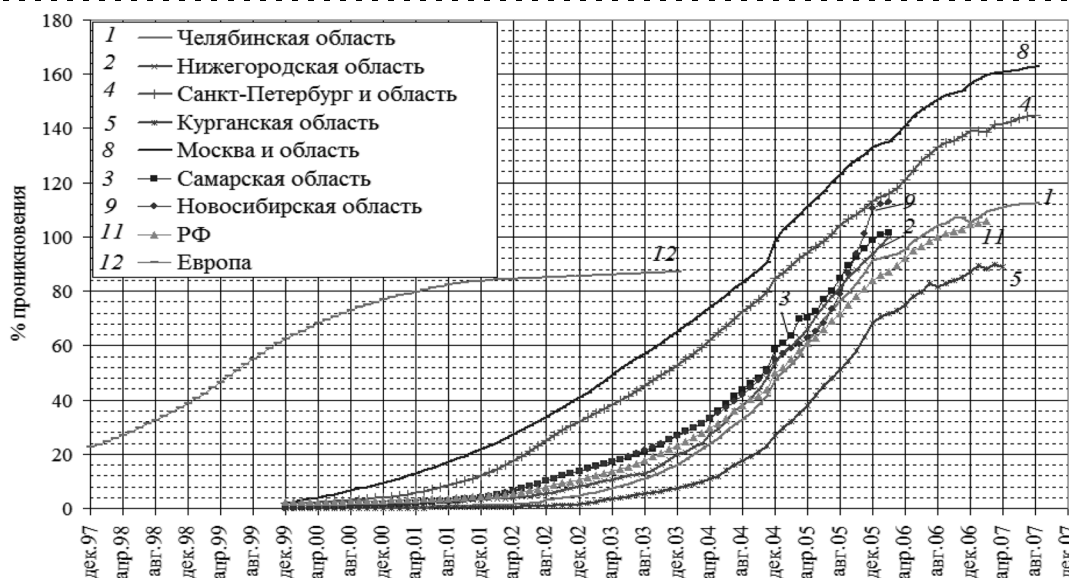


Рис. 3. Траектории изменения абонентской базы в различных регионах

$v \in V$ — множество, совместимое с результатами измерений. Точечная оценка x_k^* — чебышевский центр множества X_{k+1} — представляет собой в одномерном случае центр отрезка.

В случае обнаружения изменений привлекается информация об изменении числа абонентов в других регионах путем нахождения ближайших ("родственных") регионов в данный момент времени [8]. Для каждого из "родственных" регионов могут быть выписаны уравнения (12). Следовательно, получаем множество моделей для описания развития рынка рассматриваемого региона. Далее применяется алгоритм адаптивного оценивания с использованием двух "родственников", описанный выше, для которого уравнение (8) не изменится, а (7) будет иметь вид

$$X_{ik+1} = (\check{X}_{ik} + W_i) \cap X[y_{k+1}] \quad (14)$$

— информационные множества, полученные в результате процедуры оценивания с использованием двух моделей вида (12).

Случай возникновения пустого пересечения в (14) или выхода фактических данных за границы отрезка X_k означает, что данная модель "родственного" региона перестала корректно описывать развитие событий и необходимо заменить его другим "родственным" регионом. После смены одного или одновременно двух "родственников" процедура оценивания продолжается.

Результаты работы алгоритма на примере Челябинской области представлены на рис. 4. Прогноз вычислен в соответствии с (12). Гарантированная оценка рассчитывалась в течение 48 месяцев, и разладка в этом случае была обнаружена в моменты времени $k = 33$ и $k = 46$. До момента времени $k = 25$ работал один фильтр, оценки параметров $\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}$, $\hat{N}_i$ для первоначальной модели были определены по 10 известным точкам методом наименьших квадратов. Далее "родственниками" для определения параметров являлись: Нижегородская область, Москва и Московская область, Республика Татарстан, Новосибирская область, Самарская область, Санкт-Петербург и Ленинградская область.

Изменение параметра "емкость рынка" представлено на рис. 5, при подборе параметров накладывались ограничения $0 \leq \alpha \leq \bar{\alpha}$, $0 \leq \beta \leq \bar{\beta}$ и $\hat{N}_i \leq N_i \leq \bar{N}$, где $\hat{N}_i$ — оценка емкости рынка на предыдущем периоде, т. е. параметр "емкость рынка" для модели с индексом i должен быть не меньше емкости рынка для этой модели на предыдущем периоде.

В общем случае при размерности задачи 2 и выше множества X_{k+1} могут оказаться невыпуклыми и несвязанными [12] в результате операции пересечения (12), однако, если $\varphi(x_k) = Ax_k$ (см. уравнение (1)) — линейное отображение и $x_k \in R^n$, трудностей не возникает.

Рис. 4. Гарантированная оценка состояния регионального рынка

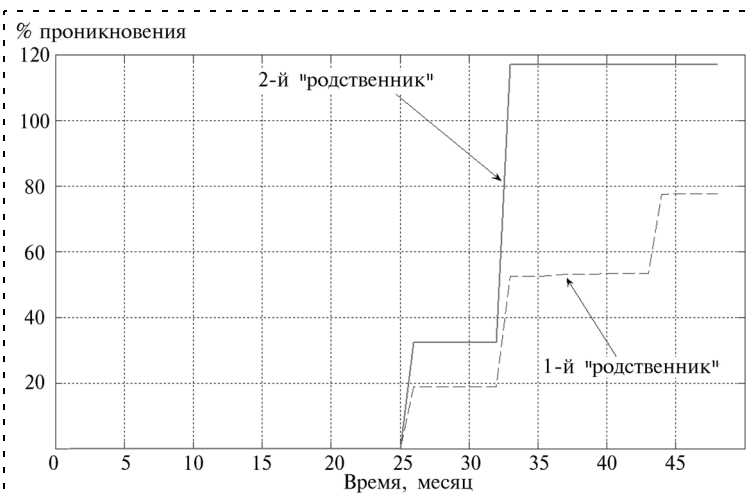


Рис. 5. Изменение параметра "емкость N_i " для "родственников", $i = 2$



Разработан алгоритм адаптивного оценивания с использованием информации о траекториях "родственных" объектов на основе гарантированного подхода. В случае обнаружения разладок в модели, которые могут быть обусловлены изменением движения объектов в результате целенаправленного или непредусмотренного воздействия на объект, формируется банк фильтров по нескольким моделям и оценка вектора состояния уточняется путем пересечения оценок информационных множеств всех фильтров. Эффективность предложенного подхода продемонстрирована на данных о региональных рынках. По результатам моделирования было установлено, что ошибка оценивания в среднем составляет не более 8 %. Для Челябинской области на протяжении 4 лет "родственниками" являлись шесть регионов из 12,

которые постоянно друг друга сменяли. Ошибка прогноза на период до 3...5 месяцев не превышает 10...12 % в зависимости от момента времени и региона, а также при условии отсутствия разладки. Другие варианты применения гарантированного подхода можно найти в работах [1, 13, 14].

Список литературы

1. **Фарина А., Студер Ф.** Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
2. **Антонов М. О., Афанасьева К. Е., Коблов А. И., Ширяев В. И.** Алгоритмы оценивания и управления беспилотным летательным аппаратом на этапе посадки // Изв. АН. Теория и системы управления. 2005. № 2. С. 166—173.
3. **Афанасьева К. Е., Ширяев В. И.** Идентификация состояния и прогнозирование регионального рынка // Проблемы управления. 2007. № 3. С. 63—65.
4. **Калман Р. Е.** Идентификация систем с шумами // Успехи мат. наук. 1985. Т. 40. Вып. 4 (244). С. 27—41.
5. **Кац И. Я., Куржанский А. Б.** Минимаксная многошаговая фильтрация в статистически неопределенных ситуациях // Автоматика и телемеханика. 1978. № 11. С. 79—87.
6. **Ширяев В. И.** Синтез управления линейными системами при неполной информации // Изв. РАН. Техн. кибернетика. 1994. № 3. С. 229—237.

7. **Гольц Г. А.** Опыт высокоточного моделирования социально-экономических процессов на массивных статистических материалах // Экономика и математические методы. 2008. Т. 44. № 1. С. 124—125.
8. **Афанасьева К. Е., Ширяев В. И.** Прогнозирование региональных рынков сотовой связи // Проблемы прогнозирования. 2007. № 5. С. 97—105.
9. **Красовский Н. Н., Куржанский А. Б., Кибзун А. И.** Современные проблемы оптимизации и устойчивости неопределенных и стохастических систем // Автоматика и телемеханика. 2007. № 10. С. 3—4.
10. **Кунцевич В. М.** Восстановление вектора состояния нелинейных динамических систем // Проблемы управления и информатики. 2007. № 5. С. 5—19.
11. **Лайниотис Д. Г.** Разделение — единый метод построения адаптивных систем. I. Оценивание // Тр. института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (ТИИЭР). 1976. Т. 64. № 8. С. 8—27.
12. **Кощев А. С., Куржанский А. Б.** Адаптивное оценивание эволюции многошаговых систем в условиях неопределенности // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1983. № 2. С. 72—93.
13. **Ширяев В. И., Ширяев Е. В., Головин И. Я., Смолин В. В.** Теория и алгоритмы для идентификации, адаптации и управления фирмой в условиях изменения ситуации на рынке // Информационные технологии. Приложение. 2002. № 4. С. 2—24.
14. **Антонов М. О., Афанасьева К. Е., Коблов А. И., Ширяев В. И.** Алгоритмы оценивания и управления беспилотным летательным аппаратом на этапе посадки // Изв. АН. Теория и системы управления. 2005. № 2. С. 166—173.

УДК 62-50

А. М. Цыкунов, д-р техн. наук, проф.,
Астраханский государственный
технический университет

Алгоритм робастного управления линейными динамическими объектами по выходу

Решается задача построения робастной системы управления для стационарных и нестационарных объектов с запаздыванием по состоянию и без запаздывания, которая позволяет скомпенсировать параметрические и внешние возмущения с заданной точностью. Получен алгоритм управления, применимый для всех перечисленных типов объектов. Приводится численный пример и результат моделирования.

Ключевые слова: неизвестные параметры, относительная степень, робастное управление, внешнее возмущение, наблюдатель, измеряемый выход.

Введение

В настоящее время опубликовано большое число работ, в которых разработаны различные подходы и методы к синтезу робастных алгоритмов регулирования. В отечественной литературе теория робастного управления достаточно полно изложена в работах [1, 2], где имеется обширная библиография. В работе [3] дана классификация различных типов возмущений и выделены два основных подхода к их компенсации. Первый — это построение инвариант-

ных систем, в которых качество функционирования или регулируемые параметры малочувствительны или вообще не зависят от возмущений. Второй подход состоит в динамической компенсации внутренних и внешних возмущений, когда регулирующее устройство формирует сигнал управления так, чтобы скомпенсировать влияние возмущений на тот или иной параметр системы, например на ошибку регулирования. В [3] дается также общая характеристика проблемы и предлагается несколько подходов к построению инвариантных систем, основанных на алгебраической структуре математических моделей объектов управления.

Кроме того, в [3—5] используется внутренняя модель возмущений. В [6, 7] используются методы теории робастных и адаптивных систем. В [8] предложен новый подход, основанный на использовании инвариантных эллипсоидов. В [9] излагается подход к синтезу статических робастных регуляторов для линейных систем на основе решения линейно-квадратичной задачи, основанной на параметризации уравнения Лурье—Риккати. Робастные системы с компенсацией возмущений, построенные на базе их оценок, исследованы в работах [10, 11].

В данной статье предлагается простой алгоритм управления для различных типов объектов управления. Показано, что он компенсирует параметрические и внешние воздействия с заданной точностью. При этом замкнутая система функционирует как неявно заданная эталонная модель, параметры ко-

торой используются в законе управления. Для иллюстрации работоспособности предложенного алгоритма приведен численный пример.

Постановка задачи

Рассмотрим объект управления, динамические процессы в котором описываются уравнением

$$Q(P, t)y(t) + G(P, t)y(t - h(t)) = k(t)R(P, t)u(t) + f(t). \quad (1)$$

Здесь $P = d/dt$ — оператор дифференцирования; $Q(P, t) = P^n + q_1(t)P^{n-1} + \dots + q_n(t)$; $G(P, t) = g_0(t)P^k + g_1(t)P^{k-1} + \dots + g_k(t)$; $R(P, t) = P^m + r_1(t)P^{m-1} + \dots + r_m(t)$; $h(t)$ — время запаздывания; $y(t)$, $u(t)$ — скалярные регулируемый параметр и управляющее воздействие; $f(t)$ — внешнее возмущение.

Формулируется традиционная задача слежения за эталонным сигналом. Требуется спроектировать систему управления, обеспечивающую слежение за эталонным сигналом $y_m(t)$, чтобы было выполнено целевое условие

$$|y(t) - y_m(t)| < \delta \text{ при } t \geq T, \quad (2)$$

где δ — заданная точность для динамической ошибки $e(t) = y(t) - y_m(t)$; T — время, по истечении которого динамическая ошибка не должна превышать заданного значения δ после начала работы системы.

Будем решать сформулированную задачу при следующих ограничениях.

Предположения

1. Коэффициенты дифференциальных операторов $Q(P, t)$, $G(P, t)$ и $k(t)R(P, t)$ — ограниченные функции с известными диапазонами изменения. При этом $k(t) > 0$, $r_i(t) > 0$, $i = 1, \dots, m$.

2. Оператор $R(P, t)$ устойчив, т. е. тривиальное решение уравнения $R(P, t)u(t) = 0$ асимптотически устойчиво. Кроме того, для любого фиксированного значения t_1 полином $R(\lambda, t_1)$ — гурвицев, где λ — комплексная переменная в преобразовании Лапласа.

3. Известны порядки операторов n , m , k , $n > m$, $n \geq k$. Если $k = n$, то должно выполняться условие $|g_0(t)| < 1$.

4. Эталонный сигнал $y_m(t)$ и γ его производных — ограниченные функции, $\gamma = n - m$.

5. Внешнее возмущающее воздействие $f(t)$ является ограниченной функцией времени с известным диапазоном изменения. В общем случае оно может зависеть от параметров или входных и выходных величин объекта управления.

6. В алгоритме управления не должны присутствовать производные входных $y_m(t)$, $u(t)$ и выходного $y(t)$ сигналов.

7. $h(t)$ — неизвестное время запаздывания, удовлетворяющее условиям: $\frac{dh(t)}{dt} < 1$, $h(t) \geq 0$.

Метод решения

Основным результатом данной работы является следующее утверждение.

Утверждение. Если выполнены условия предположений, то существуют числа $\mu_0 > 0$, $T_0 > 0$ такие, что при $\mu \leq \mu_0$, $T \geq T_0$ алгоритм управления

$$((\mu P + 1)^\gamma - 1)u(t) = -\alpha Q_m(P)e(t) \quad (3)$$

обеспечивает выполнение целевого условия (2). Здесь $\alpha > 0$; $Q_m(P) = P^\gamma + q_{m1}P^{\gamma-1} + \dots + q_{m\gamma}$; полином $Q_m(\lambda)$ является характеристическим уравнением невязной эталонной модели.

Следует отметить, что приведенный алгоритм управления в некотором роде является универсальным, так как он не изменяется, если в (1) отсутствует запаздывание или их несколько, а также в случае, когда объект (1) является стационарным с неизвестными параметрами, которые принимают значения из некоторого известного ограниченного множества.

Рассмотрим процесс получения алгоритма (3) и обоснуем его работоспособность. Разложим операторы $Q(P, t)$ и $k(t)R(P, t)$ на две составляющие:

$$Q(P, t) = Q_0(P) + \Delta Q(P, t); \\ k(t)R(P, t) = kR_0(P) + \Delta R(P, t),$$

где $\deg Q_0(P) = n$, $\deg \Delta Q(P, t) = n - 1$, $\deg R_0(P) = m$, $\deg \Delta R(P, t) = m$. Выберем нормированные гурвицевы операторы $Q_0(P)$ и $R_0(P)$ таким образом, чтобы выполнялось условие

$$Q_0(P) = Q_m(P)R_0(P). \quad (4)$$

Зная диапазон изменения коэффициентов операторов $Q(P, t)$, $k(t)R(P, t)$, легко рассчитать граничные значения операторов $\Delta Q(P, t)$, $\Delta R(P, t)$.

Преобразуем уравнение (1), принимая во внимание (4):

$$Q_m(P)y(t) = ku(t) + \frac{1}{R_0(P)}[\Delta R(P, t)u(t)] - \frac{1}{R_0(P)} \times \\ \times [\Delta Q(P, t)y(t)] + \frac{1}{R_0(P)}[f(t) - G(P, t)y(t - h(t))].$$

Составим уравнение для ошибки $e(t) = y(t) - y_m(t)$:

$$Q_m(P)e(t) = v(t) + \varphi(t); u(t) = \alpha v(t), \alpha > 0; \quad (5)$$

$$\varphi(t) = \frac{1}{R_0(P)}[\Delta R(P, t)u(t)] - \frac{1}{R_0(P)}[\Delta Q(P, t)y(t) + \\ + G(P, t)y(t - h(t))] + \frac{1}{R_0(P)}[f(t)] - Q_m(P)y_m(t) + \\ + (k\alpha - 1)v(t),$$

где $v(t)$ — новый сигнал управления. В сигнале $\varphi(t)$ сконцентрированы все составляющие, действие которых на ошибку желательно было бы скомпенсировать. Для этого его надо как-то выделить.

Введем вспомогательный контур

$$Q_m(P)\bar{e}(t) = v(t) \quad (6)$$

и составим уравнение относительно сигнала рас-
согласования $\varsigma(t) = e(t) - \bar{e}(t)$:

$$Q_m(P)\varsigma(t) = \varphi(t).$$

Если бы измерялись γ производных сигналов $y(t)$ и $y_m(t)$, то, задав управление $v(t)$ в виде

$$v(t) = -Q_m(P)\varsigma(t) = -\varphi(t), \quad (7)$$

из (5) получили бы уравнение для замкнутой систе-
мы по ошибке

$$Q_m(P)e(t) = 0. \quad (8)$$

Покажем, что все сигналы в замкнутой системе ограничены. Это нам потребуется для обоснования работоспособности алгоритма (3). Из (8) имеем, что сигнал $y(t)$ и γ его производных ограничены в силу *предположения 6*. Тогда из условий 3, 5 и 6 *предположений*: $\deg \Delta Q(P, t) = n - 1$, $\deg G(P, t) < n$ и гурвицевости полинома $R_0(\lambda)$ степени m получаем, что составляющая

$$\begin{aligned} \psi(t) = & \frac{1}{R_0(P)} [f(t) - G(P, t)y(t - h(t)) - \\ & - \Delta Q(P, t)y(t)] - Q_m(P)y_m(t) \end{aligned}$$

есть величина ограниченная.

Подставим значение $\varphi(t)$ в (7) и разрешим по-
лученное уравнение относительно $v(t)$:

$$v(t) = -\frac{1}{k\alpha} \left(\psi(t) + \frac{1}{R_0(P)} [\Delta R(P, t)u(t)] \right). \quad (9)$$

Подставим это значение во второе уравнение (5) и разрешим его относительно $u(t)$, принимая во вни-
мание равенство $kR_0(P) + \Delta R(P, t) = k(t)R(P, t)$:

$$k(t)R(P, t)u(t) = -\psi(t).$$

Тогда из условия 2 *предположений* и ограничен-
ности $\psi(t)$ следует ограниченность управляющего
воздействия.

Так как производные сигналов $y(t)$ и $y_m(t)$ не-
доступны измерению, зададим закон изменения
управляющего воздействия $v(t)$ в виде

$$v(t) = -g_m^T \eta(t), \quad (10)$$

где $g_m^T = [g_{m,\gamma}, g_{m,\gamma-1}, \dots, g_{m,1}, 1]$; $\eta(t) = [z_{11}(t), z_{21}(t), \dots, z_{\gamma-1,1}(t), z_{\gamma 1}(t)]$; $z_{i1}(t)$ — оценки произ-
водных $P^i \varsigma$, получаемых с фильтров

$$\dot{z}_i(t) = \frac{1}{\mu} F z_i(t) + \frac{1}{\mu} b P^i \varsigma(t); z_{i1}(t) = L z_i(t), i = 1, \dots, \gamma, \quad (11)$$

где $z_i \in R^\gamma$; z_{i1} — первая компонента вектора z_i ;

$$L = [1, 0, \dots, 0]; b_i^T = [0, \dots, 0, 1]; F = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -1 & 1 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

Тогда уравнение ошибки (5) примет вид

$$Q_m(P)e(t) = g_{m1}^T \xi(t), \quad (12)$$

где $g_m^T = [g_{m,\gamma-1}, \dots, g_{m,1}, 1]$; $\xi^T(t) = [\sigma_{11}(t), \dots, \sigma_{\gamma 1}(t)]$;
 $\sigma_{i1}(t) = z_{i1}(t) - P^i \varsigma(t)$.

Если записать в преобразованиях Лапласа выра-
жения (10) и (11), то получим

$$v(\lambda) = -\frac{Q_m(\lambda)}{(\mu\lambda + 1)^\gamma} \varsigma(\lambda).$$

Принимая во внимание (6) и соотношение
 $\varsigma(t) = e(t) - \bar{e}(t)$, получаем

$$v(\lambda) = -\frac{Q_m(\lambda)}{(\mu\lambda + 1)^\gamma - 1} e(\lambda).$$

Подставим это значение во второе уравнение (5) и, переходя к оригиналу от преобразования Лапласа, получим алгоритм управления (3).

Доказательство утверждения. Введем векторы
ошибки оценки производных $P^i \varsigma(t)$

$$\sigma_i(t) = z_i(t) + F^{-1} b P^i \varsigma(t), i = 1, \dots, \gamma.$$

Здесь вектор $F^{-1} b = h$ имеет первую компоненту,
равную -1 . Значит, если показать, что величина
 $|\sigma_i(t)|$ мала, то из условия $|z_{i1}(t) - P^i \varsigma(t)| < |\sigma_i(t)|$ будет
следовать, что оценка $z_{i1}(t)$ близка к $P^i \varsigma(t)$. Из (11)
получим уравнения динамики для векторов $\sigma_i(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_i(t) &= \frac{1}{\mu} F \sigma_i(t) + h P^{i+1} \varsigma(t); \\ \sigma_{i1}(t) &= L \sigma_i(t), i = 1, \dots, \gamma. \end{aligned}$$

Преобразуем уравнение (12) в векторно-матричную
форму, в результате будем иметь следующую систе-
му уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}(t) = A_m \varepsilon(t) + b g_m^T \xi(t); e(t) = L \varepsilon(t); \\ \mu_1 \dot{\sigma}_i(t) = F \sigma_i(t) + \mu_2 h P^{i+1} \varsigma(t); \\ \sigma_{i1}(t) = L_i \sigma_i(t), i = 1, \dots, \gamma, \end{cases} \quad (13)$$

где $\mu_1 = \mu_2 = \mu$.

Получили сингулярно возмущенную систему,
так как μ — достаточно малое число.

Лемма [12]. Если система описывается уравнени-
ем $\dot{x} = f(x, \mu_1, \mu_2)$, $x \in R^m$, где $f(x, \mu_1, \mu_2)$ — непре-
рывная функция, липшицева по x , и при $\mu_2 = 0$ имеет
ограниченную замкнутую область диссипативности

$\Omega_1 = \{x | F(x) < C\}$, где $F(x)$ — положительно определенная, непрерывная, кусочно-гладкая функция, то существует $\mu_0 > 0$ такое, что при $\mu_1 \leq \mu_0$ и $\mu_2 \leq \mu_0$ исходная система имеет ту же область диссипативности Ω_1 , если для некоторых чисел C_1 и $\bar{\mu}_1$ при $\mu_2 = 0$ выполнено условие

$$\sup_{|\mu_1| \leq \bar{\mu}_1} \left(\left(\frac{\partial F(x)}{\partial x} \right)^T f(x, \mu_1, 0) \right) \leq -C_1 \text{ при } F(x) = C. \quad (14)$$

В данном случае при $\mu_2 = 0$ в (13) имеем асимптотически устойчивую систему по переменным $\varepsilon(t)$ и $\sigma_i(t)$, поскольку матрицы A_m , F — гурвицевы. Получили ситуацию, которая имела место при измерении производных, т. е. $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$. Было показано, что при этом условии все сигналы в системе ограничены. Следовательно, существует некоторая область

$$\Omega = \{\varepsilon(t), \sigma_i(t), \zeta(t) : |P^{i+1} \zeta(t)| < \delta_i, |\varepsilon(t)| < \delta_1, |\sigma_i(t)| < \chi_i, F(\varepsilon, \sigma_i) < C_1\}, i = 1, \dots, \gamma,$$

где сигналы $\zeta(t)$, $\varepsilon(t)$, $\sigma_i(t)$ не выходят за ее пределы при некоторых начальных условиях из области Ω_0 . Очевидно, что условие (14) выполнено, если в качестве функции F взять функцию Ляпунова

$$V(\varepsilon(t), \sigma(t)) = \varepsilon^T(t) H_0 \varepsilon(t) + \sigma^T(t) K \sigma(t), \quad (15)$$

где положительно определенные матрицы H_0 , K определяются из уравнений

$$H_0 A_m + A_m^T H_0 = -2\rho_1 I; K F_0 + F_0^T K = -2\rho_0 I, \quad (16)$$

где I — единичная матрица соответствующего порядка; $\rho > 0$, $\rho_0 > 0$; $\sigma(t) = \text{col}(\sigma_1, \dots, \sigma_\gamma)$; $F_0 = \text{diag}[F, \dots, F]$ — блочно-диагональная матрица с γ диагональными блоками F . Однако сохранение области диссипативности при $\mu_1 \leq \mu_0$ и $\mu_2 \leq \mu_0$ не гарантирует выполнение целевого условия (2).

Введем блочно-диагональные матрицы $B = \text{diag}[h, \dots, h]$, $C = \text{diag}[L, \dots, L]$ и вектор $\bar{\zeta}^T(t) = [P^2 \zeta(t), \dots, P^{\gamma+1} \zeta(t)]$. Тогда уравнения (13) примут вид

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}(t) = A_m \varepsilon(t) + b g_m^T \xi(t); e(t) = L \varepsilon(t); \\ \mu_1 \dot{\sigma}(t) = F_0 \sigma(t) + \mu_2 B \bar{\zeta}(t), \xi(t) = C \sigma(t). \end{cases} \quad (17)$$

Вычислим полную производную от функции (15) на траекториях системы (17), принимая во внимание уравнения (16) и положив $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\varepsilon(t), \sigma(t)) = & -2\rho_1 |\varepsilon(t)|^2 + 2\varepsilon^T(t) H_0 b g_m^T \xi(t) - \\ & - \frac{2\rho_2}{\mu_0} |\sigma(t)|^2 + 2\sigma^T(t) K B \bar{\zeta}(t). \end{aligned} \quad (18)$$

Воспользуемся оценками

$$\begin{aligned} 2\varepsilon^T(t) H_0 b g_m^T \xi(t) & \leq |\varepsilon(t)|^2 + \rho_3 |\sigma(t)|^2; \\ 2\sigma^T(t) K B \bar{\zeta}(t) & \leq \frac{1}{\mu_0} |\sigma(t)|^2 + \mu_0 \rho_4, \end{aligned}$$

где $\rho_3 = \|H_0 b g_m^T C\|^2$, $\rho_4 = \|KB\|^2 \sum_{i=1}^{2\gamma} \delta_i^2$. Подставив

эти оценки в (18), получим

$$\begin{aligned} \dot{V}(\varepsilon(t), \sigma(t)) & \leq -(\rho_1 - 1) |\varepsilon(t)|^2 - \\ & - \frac{\rho_2}{\mu_0} |\sigma(t)|^2 - \left(\frac{\rho_2}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_0} - \rho_3 \right) |\sigma(t)|^2 + \mu_0 \rho_4. \end{aligned}$$

Если выбрать числа ρ_0 , ρ_1 и ρ_2 из условий:

$$\begin{aligned} \rho_0 &= \min \left\{ \frac{\rho_1}{\lambda_{\max}(H_0)}, \frac{\rho_2}{\lambda_{\max}(K)} \right\}, \\ \rho - 1 &> 0, \frac{\rho_2}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_0} - \rho_3 > 0, \end{aligned}$$

то получим

$$\dot{V}(\varepsilon(t), \sigma(t)) \leq -\rho_0 V(0) + \mu_0 \rho_4,$$

где $\lambda_{\max}(\cdot)$ — максимальное собственное число соответствующей матрицы.

Решим полученное неравенство

$$V(\varepsilon(t), \sigma(t)) \leq V(0) e^{-\rho_0 t} + \frac{\mu_0 \rho_4}{\rho_0},$$

откуда видно, что, выбирая μ_0 достаточно малым числом, получим область притяжения

$$\Omega_n = \left\{ \varepsilon(t), \sigma(t) : V(\varepsilon(t), \sigma(t)) \leq \frac{\mu_0 \rho_4}{\rho_0} \right\}.$$

Подставив в правую часть требуемое значение T_0 из условия (2) и учитывая неравенства

$$|e(t)|^2 \leq |\varepsilon(t)|^2 \leq \frac{V(0) e^{-\rho_0 t}}{\lambda_{\min}(H_0)} + \frac{\mu_0 \rho_4}{\rho_0 \lambda_{\min}(H_0)},$$

получим оценку величины δ в целевом условии (2):

$$\delta \leq \sqrt{\frac{1}{\lambda_{\min}(H_0)} \left(V(0) e^{-\rho_0 T_0} + \frac{\mu_0 \rho_4}{\rho_0} \right)},$$

которая показывает, что существуют числа μ_0 и T_0 , обеспечивающие выполнение целевого условия (2).

В результате получили систему, представленную на рис. 1.

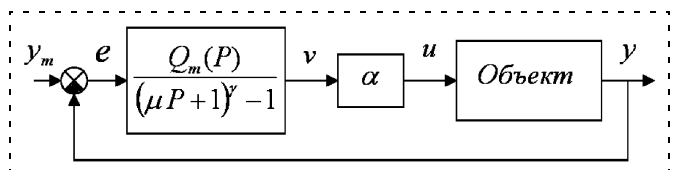


Рис. 1. Структурная схема робастной системы управления

К недостаткам предлагаемого алгоритма следует отнести отсутствие аналитически обоснованного выбора параметров μ и α . Однако они легко подбираются на этапе проектирования при моделировании. На модели объекта (1) выставляются минимально возможные коэффициенты операторов $Q(P, t)$, $G(P, t)$, $k(t)R(P, t)$ и на вход подаются максимально возможные значения $f(t)$, $y_m(t)$. Постоянные составляющие не играют никакой роли. Значение h любое. Подбираются числа μ и α , обеспечивающие заданную динамическую ошибку. Число μ обычно колеблется в пределах 0,005...0,05. При других значениях параметров и внешних воздействий из заданного класса неопределенности, который задается известными диапазонами изменения, ошибка не будет превышать заданного значения.

Пример

Пусть объект управления описывается уравнением

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + D(t)x(t-h) + B(t)u(t) + \Gamma f(t);$$

$$y(t) = Lx(t),$$

где $x \in R^4$, $L = [1, 0, 0, 0]$, $\Gamma^T = [0, 0, 2, 2]$, $A(t) =$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_4(t) & a_3(t) & a_2(t) & a_1(t) \end{bmatrix}; D(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_4(t) & d_3(t) & d_2(t) & d_1(t) \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_1(t) \\ b_2(t) \end{bmatrix}; a_4(t) = a_{40} + \Delta a_4 \sin t; a_3(t) = a_{30} + \Delta a_3 \sin 0,7t;$$

$$a_2(t) = a_{20} + \Delta a_2 \sin 0,5t; a_1(t) = a_{10} + \Delta a_1 \sin 0,3t;$$

$$d_1(t) = d_{10} + \Delta d_1 \sin 0,5t; d_2(t) = d_{20} + \Delta d_2 \sin 0,2t;$$

$$d_3(t) = d_{30} + \Delta d_3 \sin 0,1t; d_4(t) = d_{40} + \Delta d_4 \sin 0,3t;$$

$$b_1(t) = b_{10} + \Delta b_1 \sin 0,1t; b_2(t) = b_{20} + \Delta b_2 \sin 0,5t; f(t) \leq 5.$$

Класс неопределенности задан неравенствами

$$|a_{i0}| \leq 3; |d_{i0}| \leq 3; |\Delta a_i| \leq 3; |\Delta d_i| \leq 3; i = 1, \dots, 4;$$

$$2 \leq b_{10} \leq 3; |\Delta b_1| \leq 0,5; 20 \leq b_{20} \leq 30; |\Delta b_2| \leq 5.$$

Значение запаздывания $1 \leq h \leq 10$. Если преобразовать уравнение объекта относительно регулируемой переменной $y(t)$, то получим

$$(P^4 - a_1(t)P^3 - a_2(t)P^2 - a_3(t)P - a_4(t))y(t) -$$

$$- (d_1(t)P^3 + d_2(t)P^2 + d_3(t)P + d_4(t))y(t-h) =$$

$$= (b_1(t)P + b_2(t) - a_1(t)b_1(t) +$$

$$+ \dot{b}_1(t))u(t) - d_1(t)b_1(t)u(t-h) -$$

$$- (2P - 2a_1(t) + 2)f(t) - 2d_1(t)f(t-h).$$

В данном случае $\gamma = n - m = 3$.

Управляющим устройством (3) являются три последовательно соединенных звена с передаточными функциями

$$W_1(\lambda) = \mu + \frac{\mu}{\lambda}, W_2(\lambda) = W_3(\lambda) = \frac{\lambda + 1}{\mu\lambda + 1}$$

и усилитель с коэффициентом усиления α .

Зададим величину δ в целевом условии (2) $\delta = 0,01$. Для выбора параметров управляющего устройства установим на модели следующие значения:

$$a_{i0} = d_{i0} = 3, \Delta a_i = \Delta d_i = 3, b_{10} = 2, b_{20} = 20,$$

$$\Delta b_1 = 0,5, \Delta b_2 = 5, f(t) = 3 + 2 \sin 1,3t, h = 10c$$

для максимально возможного эталонного сигнала, для которого главное значение имеет амплитуда изменения, а постоянная составляющая может быть любой. Подберем $\mu = 0,01$, $\alpha = 0,4$, которые обеспечивают заданную динамическую точность.

На рис. 2 приведены графики переходного процесса по ошибке и эталонный сигнал при нулевых начальных условиях. При других значениях параметров из заданного класса неопределенности динамическая ошибка не увеличивается.

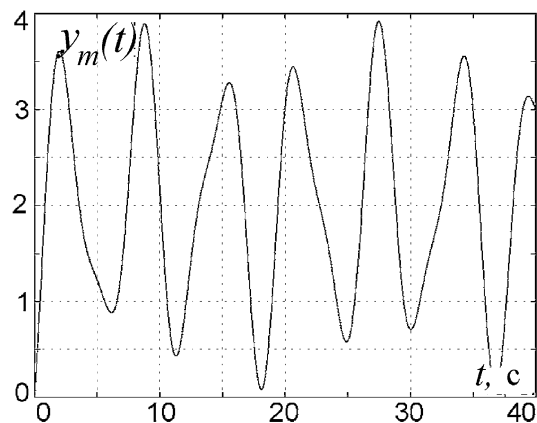
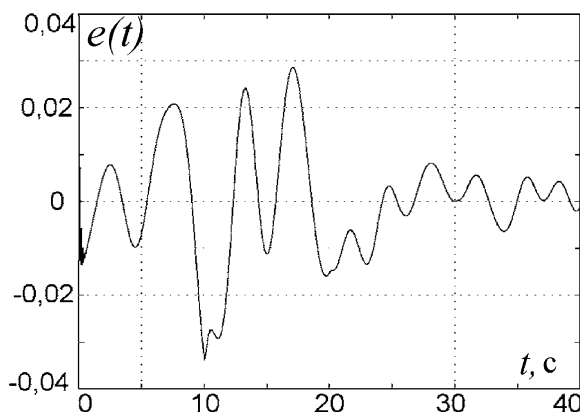


Рис. 2. Переходный процесс по ошибке и эталонный сигнал

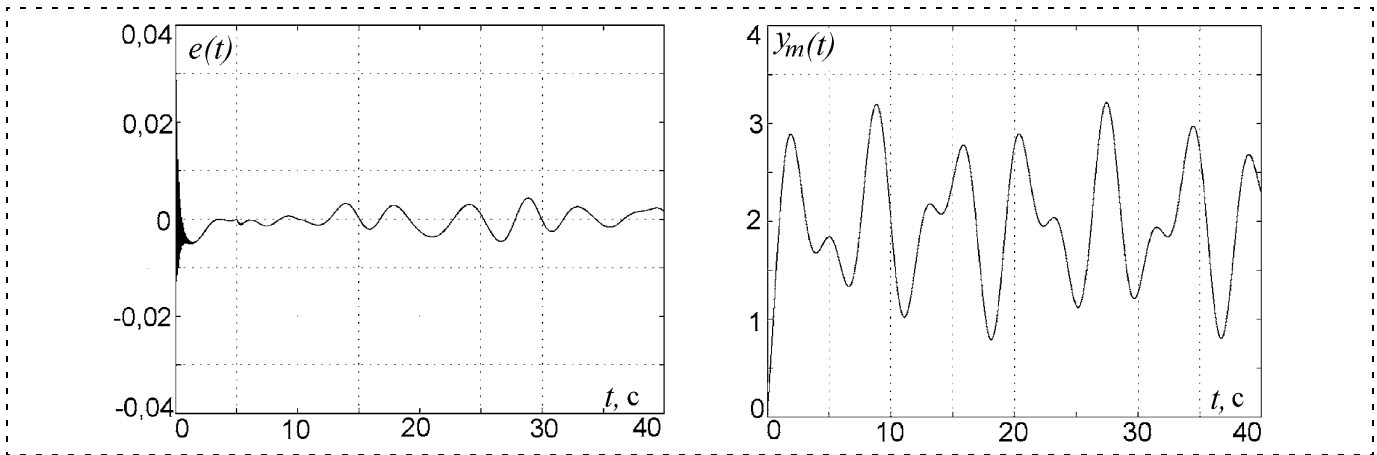


Рис. 3. Переходный процесс по ошибке и эталонный сигнал (результаты моделирования)

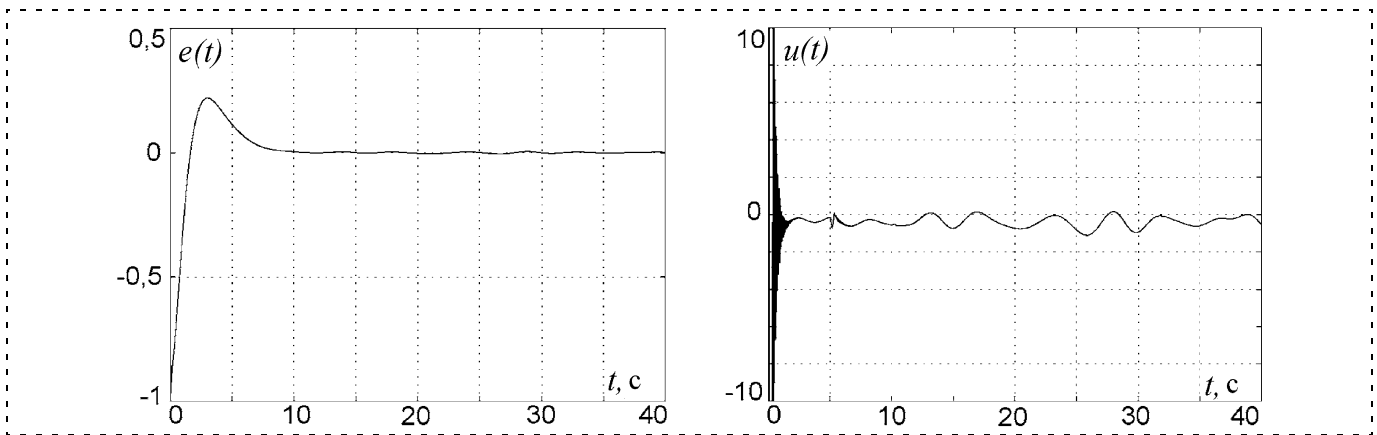


Рис. 4. Переходный процесс по ошибке и управлению (при ограничении на управляющее воздействие)

Для примера на рис. 3 приведены результаты моделирования при следующих изменениях:

$$\Delta a_i = \Delta d_i = 2, a_{20} = a_{40} = 3, a_{10} = a_{30} = -3, \\ b_{10} = 3, b_{20} = 25, h = 5c.$$

Остальные параметры остались прежними. На рис. 4 приведены результаты при ограничении на управляющее воздействие $|u(t)| \leq 10$ и начальных условиях $x^T(0) = [1, 1, 1, 1]$. Динамическая ошибка не превышает 0,005.

Заклучение

Предложен простой алгоритм робастного управления, который можно использовать для стационарных и нестационарных, с запаздыванием по состоянию и без запаздывания линейных объектов. Такая универсальность, естественно, является его достоинством. Показано, что в системе регулирования происходит компенсация параметрических и внешних возмущений с заданной точностью. При этом замкнутая система функционирует как неявно заданная эталонная модель, параметры которой присутствуют в алгоритме управления. К недостаткам следует отнести отсутствие аналитически обоснованного алгоритма выбора параметров регулятора.

Список литературы

1. Поляк Б. Т., Шербаков П. С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002.
2. Никифоров В. О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. С.-Петербург: Наука. 2003.
3. Буков В. Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. Изд-во научной лит-ры Н. Ф. Бочкаревой, 2006.
4. Никифоров В. О. Наблюдатели внешних возмущений. 1. Объекты с известными параметрами // А и Т. 2004. № 10. С. 13–24.
5. Никифоров В. О. Наблюдатели внешних возмущений. 2. Объекты с неизвестными параметрами // А и Т. 2004. № 11. С. 40–48.
6. Никифоров В. О. Нелинейная система управления с компенсацией внешних детерминированных возмущений // Изв. РАН Теория и системы управления. 1997. № 4. С. 69–73.
7. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. С.-Петербург: Наука. 2000.
8. Назин С. А., Поляк Б. Т., Топунов М. В. Подавление ограниченных внешних возмущений с помощью метода инвариантных эллипсоидов // А и Т. 2007. № 3. С. 106–125.
9. Буков В. Н., Сельвесюк Н. И. Аналитический синтез робастных регуляторов на основе параметрических уравнений Лурье–Риккати // А и Т. 2007. № 2. С. 6–16.
10. Бобцов А. А. Алгоритм робастного управления линейным объектом по выходу с компенсацией неизвестного детерминированного возмущения // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2003. № 2. С. 93–97.
11. Бобцов А. А. Алгоритм робастного управления неопределенным объектом без измерения производных регулируемой переменной // А и Т. 2003. № 8. С. 82–96.
12. Брусин В. А. Об одном классе сингулярно-возмущенных адаптивных систем // А и Т. 1995. № 4. С. 119–127.

УДК 62-50-83

А. А. Анисимов, канд. техн. наук, доц.,

С. В. Тарарыкин, д-р техн. наук, проф.,

Ивановский государственный
энергетический университет им. В. И. Ленина

Автоматическая настройка полиномиальных регуляторов электрохимических систем с использованием искусственной нейронной сети

Рассматривается проблема автоматической настройки цифровых полиномиальных регуляторов электрохимических систем. Предлагаемый подход, основанный на идентификации объекта управления с помощью радиальной искусственной нейронной сети с последующим расчетом параметров регулятора методом модального управления, позволяет существенно сократить длительность настройки системы.

Ключевые слова: электрохимическая система, полиномиальный регулятор, автоматическая настройка, радиальная нейронная сеть, обучение нейронной сети.

Проблема автоматической настройки полиномиальных регуляторов электрохимических систем

Одним из путей повышения качества управления сложными электрохимическими системами (ЭМС) является применение управляющих устройств повышенного порядка, эффективность которых обусловлена увеличением числа степеней свободы, т. е. числа настраиваемых параметров. К таким устройствам относятся полиномиальные регуляторы (ПР), формирующие управляющее воздействие на основе информации о выходной координате объекта и ее производных [1, 2].

Следует отметить, что высокие потенциальные возможности ПР могут быть реализованы только при наличии средств параметрической оптимизации и автоматической настройки. Актуальность настройки реальной системы обусловлена, главным образом, погрешностями идентификации объекта управления, а также необходимостью корректировки параметров регулятора в процессе эксплуатации. Кроме того, относительно большое число параметров ПР практически исключает возможность решения этих задач в ручном режиме.

Автоматическая настройка ПР на объекте управления обычно проводится в режиме реального вре-

мени, что предъявляет повышенные требования к сходимости и быстродействию применяемых алгоритмов. Вместе с тем, применение численных методов параметрической оптимизации системы, как правило, требует значительного числа итераций и не гарантирует успешного завершения процесса настройки.

В целях минимизации числа опытов по настройке ранее [3] было предложено использовать эталонную модель системы с ПР, а также априорную информацию об объекте управления. Применение эталонной модели дает возможность избежать влияния локальных экстремумов целевой функции и обеспечить сходимость итерационных алгоритмов настройки. Формирование такой модели осуществляется путем решения задачи оптимизации параметров системы управления на ЭВМ в лабораторных условиях.

Введение в алгоритм настройки априорной информации, т. е. структуры и известных параметров объекта управления, позволяет снизить размерность задачи оптимизации. При этом на каждом шаге настройки уточняются оценки двух—трех неизвестных параметров объекта и выполняется процедура синтеза ПР методом модального управления. В результате число опытов в реальной системе удается уменьшить до 15...20 при использовании классических методов оптимизации, градиентных или поисковых.

Принципы применения искусственных нейронных сетей в системах автоматической настройки цифровых регуляторов

Для дальнейшего снижения времени настройки (в пределе — до минимально возможного значения, равного длительности переходного процесса в системе с ПР) предлагается использовать искусственную нейронную сеть (ИНС), содержащую информацию о динамических характеристиках объекта управления. По результатам единственного эксперимента ИНС способна провести идентификацию системы и дать оценку вектора параметров объекта управления. На основе этих данных программа настройки выполняет расчет оптимальных параметров ПР методом модального управления.

Структурная схема системы управления с контуром автоматической настройки ПР нейросетевым методом приведена на рис. 1. На вход замкнутой системы воздействует ступенчатый тестовый сигнал, затем по полученной переходной характеристике ИНС проводит идентификацию параметров

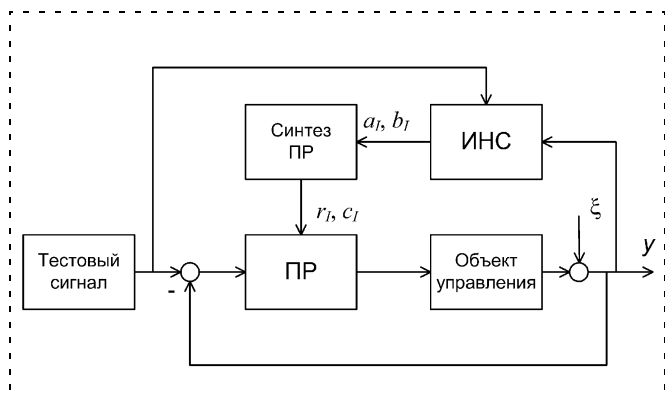


Рис. 1. Структурная схема системы управления с автоматической настройкой нейросетевым методом

линейной модели объекта управления, заданной в виде передаточной функции

$$H_{Oy}(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0 + b_1 s + \dots + b_m s^m}{a_0 + a_1 s + \dots + a_n s^n}, \quad (1)$$

где $n = \deg A(s)$, $m = \deg B(s)$ — степени полиномов знаменателя и числителя передаточной функции (ПФ); s — комплексная переменная преобразования Лапласа. Блок настройки выполняет расчет оптимальных параметров аналогового прототипа ПР с заданной структурой

$$H_{ПР}(s) = \frac{R(s)}{C(s)} = \frac{r_0 + r_1 s + \dots + r_{n-1+\nu} s^{n-1+\nu}}{c_0 + c_1 s + \dots + c_{m+l} s^{m+l}}, \quad (2)$$

где ν — заданная степень астатизма; l — степень, определяющая фильтрующие свойства ПР.

В соответствии с принципами модального управления [1, 2] применяемый алгоритм расчета параметров аналогового прототипа ПР основывается на решении уравнения синтеза

$$A(s)C(s) + B(s)R(s) = A_{\text{ж}}(s), \quad (3)$$

где $A_{\text{ж}}(s)$ — желаемый характеристический полином системы. Формирование $A_{\text{ж}}(s)$ проводится с использованием полиномов Ньютона, Бесселя, Баттерворта, Чебышева или других с учетом требований к системе управления.

Переход от аналогового прототипа к цифровому ПР осуществляется путем замены производных ПФ (2) конечными разностями того же порядка, что соответствует подстановке

$$H_{ПР}(z) = H_{ПР}(s) \Big|_{s = \frac{z-1}{zT_0}}, \quad (4)$$

где z — комплексная переменная дискретного преобразования Лапласа; T_0 — шаг квантования времени.

Поскольку в процессе настройки решается задача коррекции исходных параметров ПР, которые известны точно, идентификация объекта осуществляется по переходной характеристике замкнутой системы управления. Отклонение полученной характеристики от эталонной модели обусловлено вариациями параметров объекта управления, что позволяет получать адекватные оценки этих параметров с помощью ИНС. Такой подход, как правило, дает возможность снизить длительность эксперимента по идентификации в условиях большой инерционности объекта управления.

Выбор структуры и метода обучения искусственной нейронной сети для решения задачи идентификации системы управления

Задача идентификации в данной постановке сводится к восстановлению вектора параметров непрерывной гладкой функции времени $F(a, b, t)$ по ряду значений этой функции в дискретные моменты времени $F(t_1), F(t_2), \dots, F(t_n)$. Доказано, что нейронные сети прямого распространения позволяют успешно решать подобные задачи [4, 5].

Как показывает анализ, для решения задачи идентификации целесообразно использовать радиальную ИНС, позволяющую наиболее эффективно проводить классификацию полученных данных. В радиальной ИНС каждый нейрон реагирует на определенный вид динамической характеристики объекта, что облегчает формирование оптимальной структуры сети.

Обобщенная структура радиальной ИНС прямого распространения типа HRBF приведена на рис. 2 [4, 5]. Радиальная ИНС состоит из двух слоев — первого (скрытого слоя) и второго (внешнего слоя). Нейроны первого слоя реализуют радиальные базисные функции (RBF), в данном случае функции Гаусса

$$\varphi_i(\mathbf{x}) = \exp[-(\mathbf{x} - \mathbf{C}_i)^T \mathbf{Q}_i^T \mathbf{Q}_i (\mathbf{x} - \mathbf{C}_i)], \quad (5)$$

где $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ — вектор входного сигнала; $\mathbf{C}_i$ — вектор центров i -го нейрона; $\mathbf{Q}_i$ — диагональная матрица коэффициентов дисперсии. Каждому нейрону RBF соответствует множество значений $\mathbf{x}$, образующее кластер. Центр кластера определяется вектором $\mathbf{C}_i$, а его размеры — матрицей $\mathbf{Q}_i$. Нейроны второго слоя являются линейными и вычисляют взвешенную сумму входных сигналов

$$y_m = w_0 + \sum_{i=1}^K w_i \varphi_i(\mathbf{x}), \quad (6)$$

где K — число нейронов первого слоя (базисных функций); $\mathbf{w} = (w_0, w_1, \dots, w_K)$ — вектор весовых коэффициентов.

Для обучения радиальной ИНС используется адаптивный алгоритм `newrb()`, входящий в состав программного комплекса MatLab 7.1, позволяющий оптимизировать число нейронов первого слоя и координаты их центров C_i .

На *первом* шаге алгоритма проводится моделирование сети для каждого вектора $\mathbf{x}$, входящего в обучающую выборку.

На *втором* шаге определяется вектор $\mathbf{x}_j$, для которого ошибка аппроксимации ε максимальна. Если ошибка меньше заданной величины, то обучение прекращается.

На *третьем* шаге добавляется нейрон 1-го слоя RBF, для которого вектор центров $C_i = x_j$.

На *четвертом* шаге методом наименьших квадратов определяются весовые коэффициенты w нейронов второго слоя, затем выполняется переход к *первому* шагу алгоритма.

Обучающая выборка представляет собой массив переходных характеристик системы, полученных путем вариации параметров объекта управления при неизменных параметрах ПР. Для успешного обучения ИНС необходимо варьировать все линейно-независимые параметры модели (1) методом Монте-Карло, предварительно определив диапазон их возможного изменения на основе априорной информации об объекте управления.

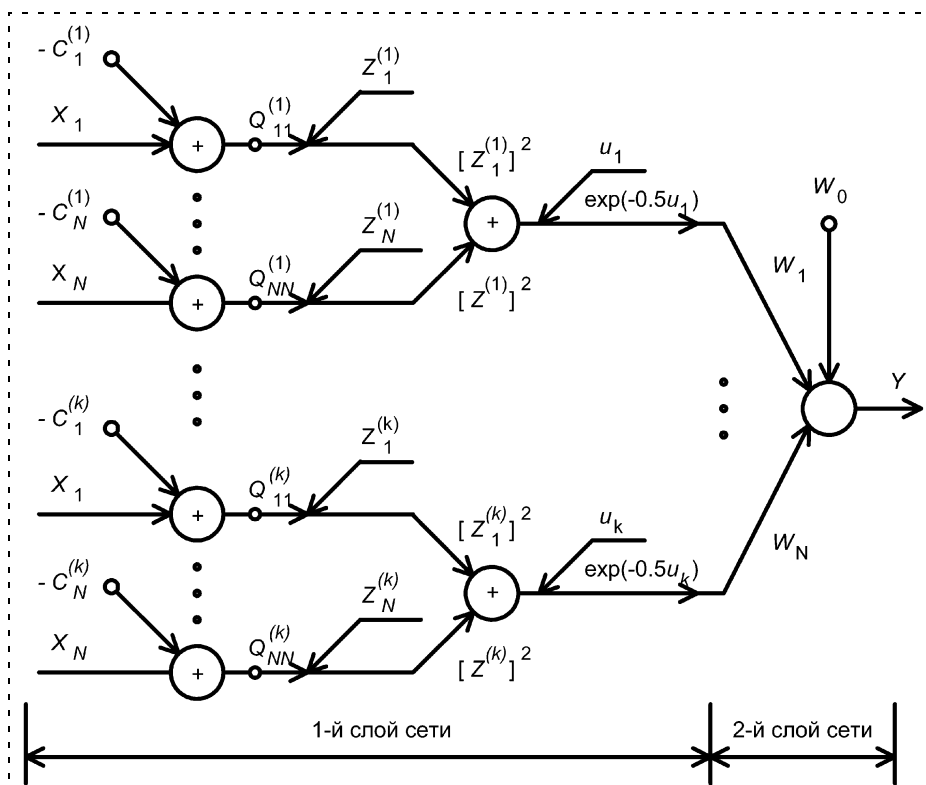


Рис. 2. Структура радиальной искусственной нейронной сети

Разработка нейросетевого метода настройки полиномиальных регуляторов электромеханических систем

Исследование эффективности предложенного метода автоматической настройки с использованием радиальной ИНС проводили на примере типичной двухмассовой электромеханической системы с цифровым ПР, линейная модель которой приведена на рис. 3 [6]. Для конкретности были приняты значения основных параметров ЭМС, соответствующие параметрам экспериментального стенда (см. таблицу).

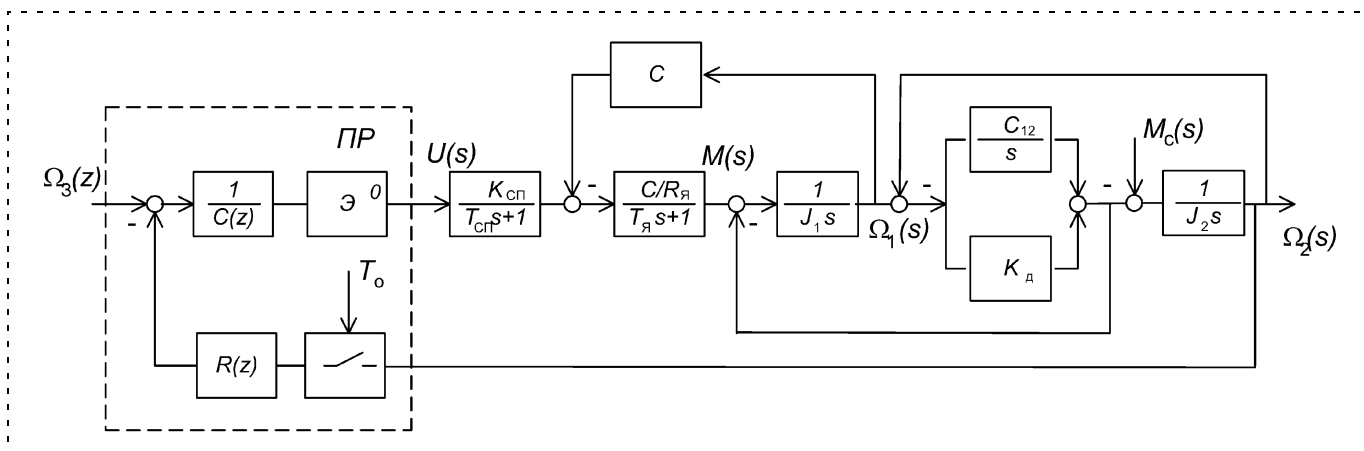


Рис. 3. Структурная схема линейризованной модели двухмассовой ЭМС с цифровым ПР

$K_{СП}$	$T_{СП}, c$	$R_{я}, Ом$	$T_{я}, c$	$C, Вб$	$J_1, кг \cdot м^2$	$J_2, кг \cdot м^2$	$C_{12}, Н \cdot м$	$K_D, Н \cdot м$
7	0,01	3,15	0,05	0,16	0,015	0,05	0,65	0,01

Пренебрегая влиянием малой постоянной времени $T_{СП}$ для улучшения робастных свойств системы в соответствии с рекомендациями [7], можно записать ПФ от входа к выходу объекта управления в виде

$$H(s) = \frac{\Omega_2(s)}{U(s)} = \frac{b_0}{s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (7)$$

где числовые значения параметров $a_0 = 139$, $a_1 = 1126$, $a_2 = 67$, $a_3 = 20$, $b_0 = 6153$. Процедура формирования желаемого характеристического полинома для рас-
пределения Бесселя 5-го порядка [7]

$$A_{ж}(s) = s^5 + v_4 s^4 + v_3 s^3 + v_2 s^2 + v_1 s + v_0, \quad (8)$$

где $v_4 = 3,8\Omega_0$, $v_3 = 6,76\Omega_0^2$, $v_2 = 6,87\Omega_0^3$, $v_1 = 3,94\Omega_0^4$, $v_0 = \Omega_0^5$, позволяет определить оптимальное значение среднегеометрического корня $\Omega_0 = 8,56$ рад/с.

Расчет параметров ПР 3/1 ($\deg R(s) = 3$, $\deg C(s) = 1$) путем решения уравнения синтеза (2) дает следующие исходные полиномы ПФ регулятора:

$$\begin{aligned} R(s) &= r_3 s^3 + r_2 s^2 + r_1 s + r_0, \\ C(s) &= c_0 + s, \end{aligned} \quad (9)$$

где $r_3 = 0,026$, $r_2 = 0,356$, $r_1 = 0,776$, $r_0 = 7,145$, $c_0 = 13,73$. Реализация цифрового ПР осуществляется путем замены производных конечными разностями $\nabla^n(z)$, шаг квантования времени T_0 в соответствии с требованиями теоремы В. А. Котельникова принят равным 0,01 с:

$$\begin{aligned} R(z) &= \nabla^3(z) \frac{r_3}{T_0^3} + \nabla^2(z) \frac{r_2}{T_0^2} + \nabla^1(z) \frac{r_1}{T_0} + r_0, \\ C(z) &= c_0 + \nabla^{-1}(z) \frac{1}{T_0}, \end{aligned}$$

где $\nabla^3 = 1 - 3z^{-1} + 3z^{-2} - z^{-3}$, $\nabla^2 = 1 - 2z^{-1} + z^{-2}$, $\nabla^1 = 1 - z^{-1}$.

Для формирования обучающей выборки использовали линеаризованную модель системы с ПФ объекта управления (7) и цифровым ПР 3/1, синтезированным по аналоговому прототипу (9), реализованную в среде Simulink комплекса MatLab 7.1. Выборку формировали путем вариации коэффициентов знаменателя ПФ объекта управления (a_0 , a_1 , a_2 , a_3) в диапазоне ± 50 % от базовых значений.

Объем выборки составлял 200 реализаций переходной характеристики системы управления.

Структура радиальной ИНС для решения задачи идентификации формируется следующим образом. Число нейронов в первом слое K определяется в процессе обучения, число нейронов во втором слое $M = 4$ соответствует числу определяемых параметров. Размерность векторов C_i для базисных функций нейронов первого слоя $N = 20$ соответствует числу отсчетов переходной характеристики системы, матрица коэффициентов Q_i имеет диагональную форму

$$Q_i^T Q_i = I \frac{1}{2\sigma_i^2},$$

где I — единичная матрица; σ_i^2 — дисперсия базисной функции. Дисперсия, позволяющая минимизировать число нейронов первого слоя при заданной точности обучения, определяется методом регулярного сканирования. В результате для ошибки аппроксимации $\varepsilon \leq 0,001$ было получено оптимальное значение $\sigma_i^2 = 1, 2$, при котором число $K = 50$.

Для тестирования обученной радиальной ИНС на первом этапе использовали выборку, аналогичную обучающей. Адекватность идентификации определяли путем регрессионного анализа зависимости оценок, полученных с помощью ИНС, от действительных значений параметров ПФ, результаты которого приведены на рис. 4, а. Линейный характер зависимости для каждого элемента вектора (a_0 , a_1 , a_2 , a_3) позволяет сделать вывод, что сеть дает адекватные оценки ПФ объекта управления, причем среднеквадратическая погрешность оценивания не превышает 0,5 % базового значения параметра.

На втором этапе тестирование радиальной ИНС проводили при воздействии помехи ξ , представляющей собой белый шум со спектральной плотностью $S = N$ в полосе частот $|f| \leq 100$ Гц, для которого СКО $\sigma_\xi = \sqrt{N\Delta f} = 0,08$ рад/с (рис. 4, б). Несмотря на возрастание среднеквадратической погрешности оценивания до 0,8...1,2 % сохраняется линейный характер зависимости оценок от действительных значений параметров ПФ объекта управления, что говорит о возможности проведения идентификации в условиях действия помех.

Как показывает анализ экспериментальных данных, включение шума в обучающую выборку в данном случае нецелесообразно, поскольку это приво-

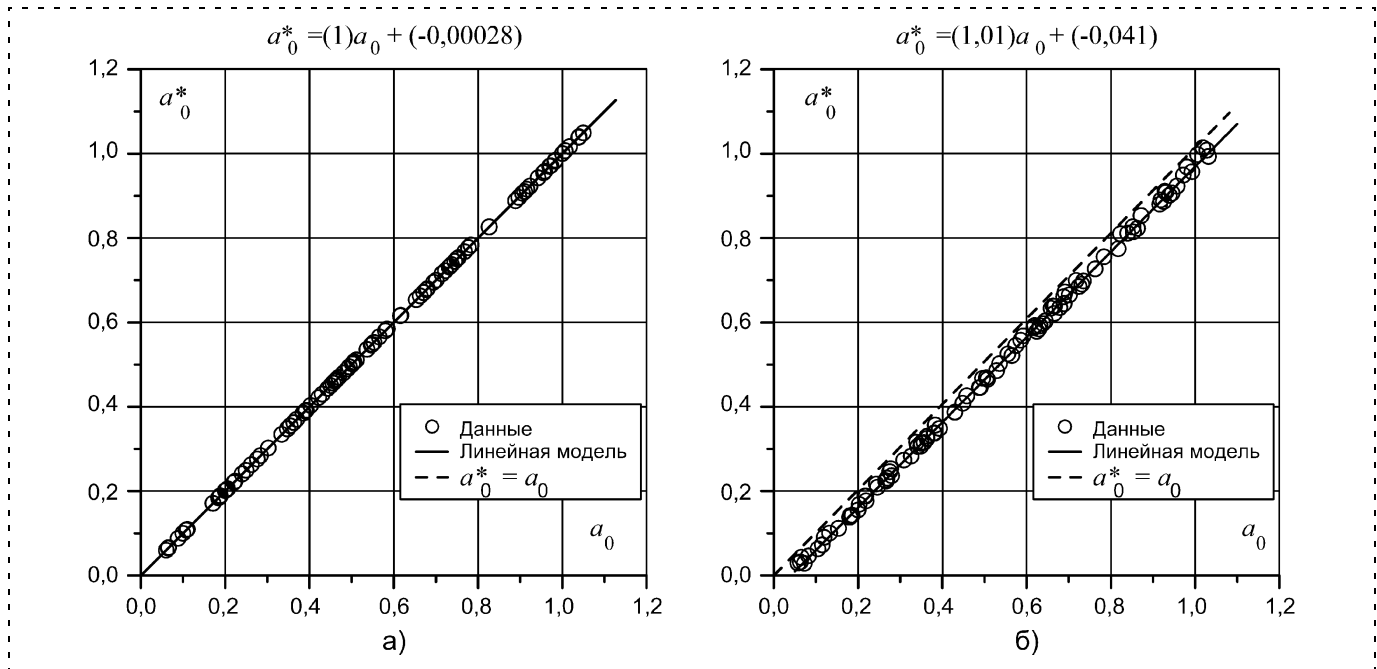


Рис. 4. Результаты регрессионного анализа оценок параметра a_0 на выходе ИНС при отсутствии (а) и при воздействии (б) помех

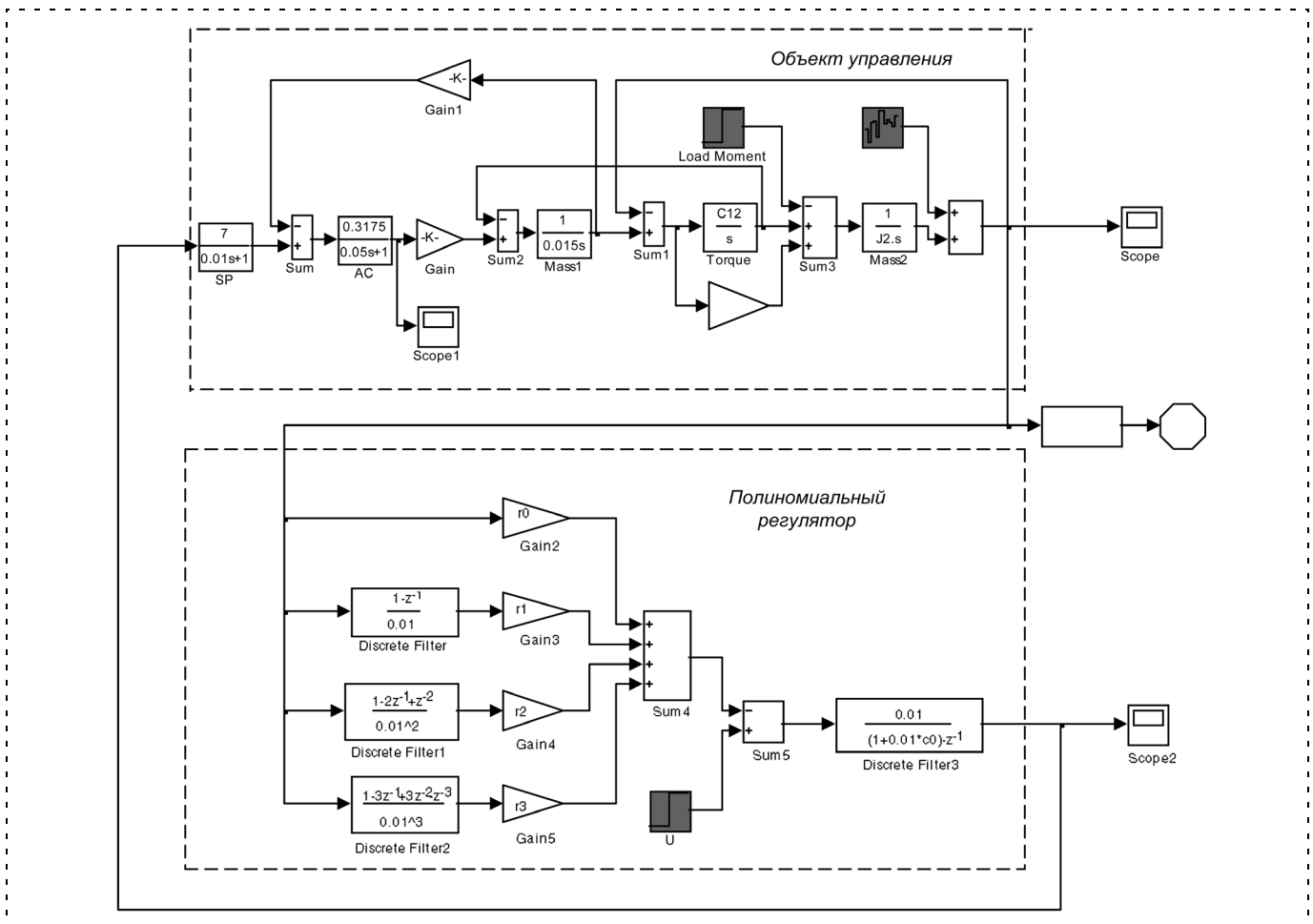


Рис. 5. Структура модели двухмассовой ЭМС с цифровым ПР в среде Simulink комплекса MatLab 7.1

дит к "переобучению" радиальной ИНС. Эффект "переобучения" заключается в том, что сформированная сеть эффективно работает только при воздействии шумов заданного типа. В случае отсутствия помехи или изменения ее статистических характеристик погрешность идентификации параметров объекта резко возрастает.

Предлагаемый метод настройки системы с ПР был реализован в виде программы на языке сценариев комплекса MatLab 7.1. Для исследования эффективности радиальной ИНС применяли детализированную модель двухмассовой ЭМС с цифровым ПР в среде Simulink, учитывающую эффекты вязкого трения и квантования сигналов по времени (рис. 5).

Программа настройки передает в среду Simulink вектор исходных параметров ПР и запускает процесс моделирования ЭМС. Полученный в результате моделирования вектор отсчетов переходной характеристики ЭМС поступает на вход радиальной ИНС, которая выдает оценку вектора параметров объекта управления (a_0, a_1, a_2, a_3). Затем программа рассчитывает оптимальные параметры ПР путем решения системы линейных уравнений, полученных в результате подстановки полиномов (7), (8) и (9) в уравнение (3):

$$\mathbf{G}\mathbf{r} = \mathbf{v} - \mathbf{g},$$

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_3 & b_0 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & 0 & b_0 & 0 & 0 \\ a_1 & 0 & 0 & b_0 & 0 \\ a_0 & 0 & 0 & 0 & b_0 \end{bmatrix}; \mathbf{r} = \begin{bmatrix} c_0 \\ r_3 \\ r_2 \\ r_1 \\ r_0 \end{bmatrix}; \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_4 \\ v_3 \\ v_2 \\ v_1 \\ v_0 \end{bmatrix},$$

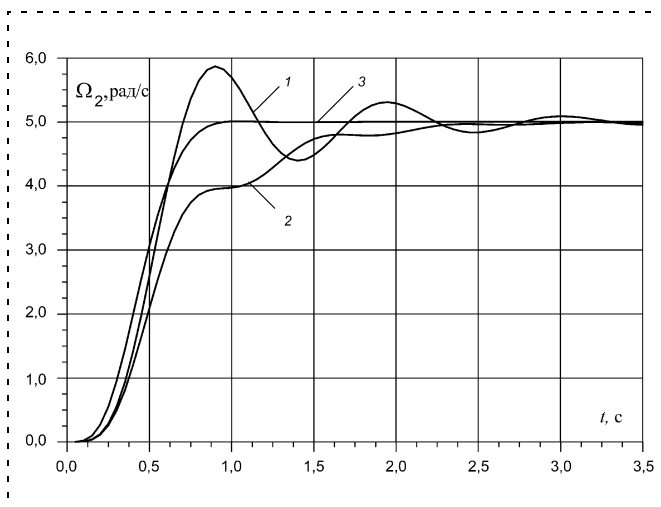


Рис. 6. Переходные характеристики двухмассовой ЭМС с цифровым ПР: исходные параметры $J_2 = 0,05$, $C_{12} = 0,35$ (1), $J_2 = 0,1$, $C_{12} = 0,65$ (2); настройка с помощью радиальной ИНС (3)

где $\mathbf{G}$, $\mathbf{g}$ — матрица и вектор коэффициентов ПФ двухмассовой ЭМС; $\mathbf{r}$, $\mathbf{v}$ — векторы коэффициентов ПР и желаемого характеристического полинома $A_{\text{ж}}(s)$ соответственно. Полученные параметры ПР передаются в среду Simulink, затем проводится повторное моделирование системы и расчет показателей качества управления.

Результаты исследования нейросетевого алгоритма настройки для двухмассовой ЭМС с цифровым ПР приведены на рис. 6. Отклонение параметров объекта управления C_{12} и J_2 от расчетных значений составляет 50 %, что приводит к существенному ухудшению динамики системы (кривые 1, 2). После идентификации параметров объекта управления с помощью радиальной ИНС и расчета оптимальных параметров ПР переходная характеристика (кривая 3) практически совпадает с эталонной.

Таким образом, предложенный подход, основанный на идентификации объекта управления с помощью радиальной ИНС с последующим расчетом оптимальных параметров регулятора, позволяет значительно сократить длительность настройки системы с ПР в условиях реального времени.

Ограничением при использовании данного метода является наличие таких нелинейностей, при которых система не может быть адекватно представлена линеаризованной моделью. Кроме того, при воздействии интенсивных помех погрешность идентификации параметров объекта управления возрастает, что может приводить к снижению качества настройки системы.

Рассмотренный нейросетевой метод может применяться для настройки линейных или линеаризованных систем с управляющими устройствами, синтезированными методами модального управления, — полиномиальными регуляторами, регуляторами состояний, в том числе с наблюдателями состояний.

Список литературы

1. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Линейные модели. М.: Наука, 1987. 304 с.
2. Остром К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ. М.: Мир, 1987. 480 с.
3. Анисимов А. А., Тарарыкин С. В. Исследование и разработка методов параметрической оптимизации полиномиальных регуляторов электромеханических систем // Электричество. 2008. № 3. С. 33—39.
4. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учеб. в 3 т. Т. 3: Методы современной теории автоматического управления / Под ред. Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 748 с.
5. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
6. Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. Управление электроприводами: Учеб. пособ. Л.: Энергоиздат, 1982. 392 с.
7. Методика проектирования цифровых полиномиальных регуляторов электромеханических систем / С. В. Тарарыкин и др. // Электричество. 2000. № 12. С. 33—39.

УДК 004.838.5

Т. Б. Бурлаченко, аспирант,
Т. Ю. Морозова, канд. физ.-мат. наук., доц.,
 Московский государственный университет
 приборостроения и информатики

Нейросетевая оптимизация абдуктивных выводов в задачах диагностики технических систем

Для решения задачи диагностирования предлагается использовать абдуктивный вывод. Поставлена задача оптимизации абдукции. Для ее решения используется нейронная сеть Хопфилда.

Ключевые слова: диагностика, абдукция, абдуктивный вывод, оптимизация, нейронная сеть Хопфилда.

Хорошо известно, что одной из главных проблем предупреждения всех технических аварий, равно как и колоссальных потерь от природных катастроф, является отсутствие необходимого уровня развития методов и средств измерений, испытаний, неразрушающего контроля, диагностики и сертификации продукции [5].

Техническая диагностика представляет собой теорию, методы и средства обнаружения и поиска дефектов объектов технической природы. Основное назначение технической диагностики состоит в повышении надежности объектов на этапе их производства, эксплуатации и хранения. Для условий эксплуатации важным является понятие *работоспособного технического состояния объекта*, когда он может выполнить все заданные функции с сохранением значений параметров (признаков) в требуемых пределах.

Причины *неисправного и неработоспособного технического состояния объекта* могут быть детализированы путем указания соответствующих дефектов, нарушающих исправность, работоспособность или правильность функционирования и относящихся к одной или нескольким составным частям объекта либо к объекту в целом.

Обнаружение и поиск дефектов являются процессами *определения технического состояния* объекта и объединяются общим термином *"диагностирование"*.

Диагностирование технического состояния любого объекта осуществляется аппаратными или программными *средствами диагностирования*. Средства и объект диагностирования, взаимодействующие между собой, образуют *систему диагностирования*. При разработке данных систем должны решаться задачи изучения объекта, его возможных дефектов и их признаков проявления.

В настоящей статье для решения этих задач предложено использовать в качестве программного средства диагностирования логический вывод.

При решении задачи технической диагностики могут возникнуть ситуации, связанные с неполной информацией, например, когда знаний системы диагностирования недостаточно для того, чтобы однозначно определить причину неисправного состояния объекта, т. е. выявить дефект. Другими словами, это ситуация, когда система диагностирования может построить объяснение и/или доказательство некоторого наблюдаемого факта (определить дефекты, ставшие причиной неработоспособного состояния объекта). В этом случае решением задачи становятся выявление и установление причинно-следственных связей. Применение обычных логических выводов, таких как индуктивные, дедуктивные и выводы по аналогии, в таком случае невозможно, поскольку для доказательства они требуют наличия всей информации об объекте. Поэтому в данном случае следует использовать абдуктивный вывод.

В работах В. Н. Вагина, Е. Ю. Головиной, Р. А. Ашинянца [2, 3, 1] введено понятие "абдукция" — процесс вывода причины из следствия или построение объяснений для наблюдаемых явлений.

В условиях технической диагностики задачу абдукции можно применять в целях изучения объекта и выявления причины его неисправного состояния, т. е. выявления дефекта.

Постановка и особенности задачи абдукции

База знаний при абдуктивном выводе может быть представлена следующим образом.

1. $A \supset B$ — правило (главная посылка).
2. A — причина (второстепенная посылка).
3. B — следствие (вывод).

Отличие абдукции от обычной логики состоит в том, что в дедуктивном выводе из имеющихся посылок 1 и 2 выводится следствие 3. При абдукции же из следствия 3 и главной посылки 1 выводится второстепенная посылка 2, которая называется *абдукцентом*.

Пусть $D = \{d_i | i = 1, \dots, N\}$ — конечное множество входных данных (эффекты, факты, и т. д.); $H = \{h_j | j = 1, \dots, M\}$ — конечное множество элементарных (причинных) гипотез. Разобьем множества D и H на конечное число подмножеств, из которых D_0 ($D_0 \subseteq D$) является подмножеством D , состоящим из n наблюдаемых явлений и имеющихся фактов, а H_c ($H_c \subseteq H$) — подмножеством H , являющееся лучшим объяснением данных D_0 . q является отображением подмножеств H в подмножество D ; $q(h_j) = D_j$, где $h_j \in H$ и $D_j \subseteq D$, интерпретируется как *объяснительное покрытие* h_j , т. е. гипотеза h_j является объяснением как одного, так и всех элементов D_j .

Тогда абдуктивная задача обработки информации в общем случае характеризуется кортежем $\langle D, H, q, D_0, H_c \rangle$.

Здесь и далее будем считать, что подмножество H_c может состоять как из одной гипотезы h_c , образуя при этом простую гипотезу, так и из нескольких, становясь при этом сложной гипотезой.

Простые (элементарные) гипотезы являются скалярными гипотезами.

Сложные (составные) гипотезы представляют собой векторные гипотезы, состоящие из набора простых гипотез:

$$H_c = \text{col}(h_1, h_2, \dots, h_Z),$$

где $Z \leq M$.

Тогда задачу абдукции можно описать следующим образом: при имеющихся входных данных D , H , q и D_0 необходимо определить H_c , т. е. решением задачи абдукции является однозначное выделение гипотезы H_c (она может быть как простой, так и составной) из множества возможных причинных гипотез H , с помощью которой можно точно объяснить имеющиеся факты или наблюдаемые явления D_0 .

Задача абдукции включает в себя задачу классификации имеющихся данных в виде элементарных гипотез, которые хранятся в базе данных, и задачу синтеза сложных объяснений (определение составных гипотез).

Классификация заключается в сопоставлении гипотез с данными, на основании чего определяется их степень соответствия и значение истинности для каждой гипотезы. Для простых случаев задача классификации может сводиться к нахождению одной или нескольких простых гипотез, каждая из которых может самостоятельно, независимо от других, полностью объяснить все входные данные (эффекты, факты). Для таких задач абдукции лучшим объяснением является та элементарная гипотеза, у которой значение истинности будет наибольшим.

В общем случае задача классификации выглядит следующим образом. С учетом описанных выше определений пусть $B = \{b_k | k = 1, \dots, l\}$ — конечное множество значений истинности; H_e — подмножество H ($H_e \subseteq H$), в котором каждая гипотеза $h_j \in H_e$ может объяснить некоторое непустое подмножество данных D_0 ; p — отображение H_e в B , которое устанавливает соответствие между элементарными гипотезами и значениями истинности; $p(h_j)$ интерпретируется как значение истинности гипотезы h_j ; r — отображение D_0 в H .

Тогда при входных данных D , H , D_0 и r необходимо выделить подмножество H_e , состоящее из простых гипотез, каждая из которых самостоятельно может объяснить часть наблюдаемых явлений D_0 , и определить значения истинности для каждой из этих простых гипотез.

Постановка задачи оптимизации абдукции

Следующей задачей абдукции является синтез сложных объяснений, т. е. определение составных гипотез. Необходимость решения данной задачи возникает, когда в базе нет той элементарной гипотезы, которая могла бы быть единственным решением поставленной задачи. В этом случае необходимо определить множество простых гипотез, каждая из которых будет являться объяснением одной из части наблюдаемых данных, и *синтезировать* из них сложное объяснение [14].

Очевидно, что данный процесс *apriori* является неоднозначным. Дело в том, что составная гипотеза, полученная в результате синтеза, может являться одним из решений, но не наилучшим, так как число гипотез, из которых она будет состоять, может быть избыточным. Это возможно, например, в том случае, когда один и тот же элемент данных могут объяснить несколько входящих в составную гипотезу причинных гипотез, различающихся между собой, допустим, стороной рассмотрения (например, причиной брака в изделии может быть как техническая неисправность, так и человеческий фактор), формулировкой или более четкой конкретизацией. В связи с этим естественно поставить задачу оптимизации абдукции, т. е. задачу оптимизации процесса вывода.

Тогда, например, можно считать абдукцию оптимальной, если для вывода составной гипотезы, которая будет являться решением задачи, использовать минимальное число простых гипотез из области допустимых. Обсудим возможную постановку задачи.

Пусть Γ — область допустимых простых гипотез, при включении которых в составную гипотезу должны выполняться следующие условия.

1. Максимальное объяснительное покрытие данных ($M_{\text{ОП}}$): составная гипотеза H_{c1} является лучшим объяснением D_0 , нежели другая составная гипотеза H_{c2} , если $q(H_{c1}) \cap D_0 \supseteq q(H_{c2}) \cap D_0$.

В идеальном случае составная гипотеза H_c обеспечивает полное объяснительное покрытие данных D_0 , т. е. $q(H_c) \supseteq D_0$.

2. Максимальное правдоподобие гипотезы ($M_{\text{Пр}}$): составная гипотеза H_{c1} является лучшим объяснением D_0 , нежели другая составная гипотеза H_{c2} , если $p(H_{c1}) \geq p(H_{c2})$.

Этот критерий выделяет то наилучшее объяснение, у которого значение истинности является наибольшим.

Тогда задача оптимизации абдукции может определяться свойством минимальности составной гипотезы: составная гипотеза H_{c1} является лучшим объяснением D_0 , нежели другая составная гипотеза H_{c2} , если число компонент первой меньше числа компонент второй, $|H_{c1}| < |H_{c2}|$.

Это условие оптимизации говорит о том, что составная гипотеза H_c должна быть наименьшей по числу содержащихся в ней элементарных гипотез.

Формализовать задачу оптимизации абдукции можно следующим образом:

если $H_c \in \Gamma$, где $\Gamma = \langle M_{OP}, M_{IP} \rangle$,

то $H_c \rightarrow \min$,

т. е., учитывая, что $H_c = \text{col}(h_1, h_2, \dots, h_L)$,

$$\dim H_c \rightarrow \min_{H_c \in \Gamma},$$

где $\dim H_c$ — вектор, элементы которого являются простыми гипотезами.

Поскольку значение истинности имеет влияние на одно из условий области определения, то описание этого критерия можно расширить следующим образом: составная гипотеза H_{c1} является лучшим объяснением D_0 , нежели другая составная гипотеза H_{c2} , если

$$\forall d \in D_0, \forall h_2 \in H_{c2}, \text{ таких, что } d \in q(h_2) \cap D_0, \\ \exists h_1 \in H_{c1}, \text{ такое, что } (d \in q(h_1) \cap D_0) \wedge (p(h_1) \geq p(h_2)).$$

Компоненты составной гипотезы H_c должны быть оптимальными с точки зрения их значений истинности. При наличии взаимодействия между простыми гипотезами эта оптимальность является необходимой для получения эвристического решения задачи абдукции.

Но при решении данной задачи могут возникнуть конфликты между условиями области определения Γ и самой постановкой задачи. Для решения этой проблемы необходимо установить отношение приоритета, в соответствии с которым при выборе лучшего решения необходимо сначала рассмотреть гипотезы с точки зрения максимального покрытия данных, которому присваивается наивысший приоритет, а только потом выбрать решение, имеющее минимальное число гипотез [15]. Если отображения q и p однозначно определены, то на синтез задачи абдукции ограничения не влияют и объяснение будет единственным наилучшим решением.

Между двумя элементарными объяснительными гипотезами $h_1, h_2 \in H_e$ возможны различные типы взаимодействия [6, 14].

1. *Ассоциативность*: включение h_1 в H_c подразумевает включение h_2 . Такое взаимодействие может возникнуть вследствие статистических взаимосвязей между h_1 и h_2 .

2. *Аддитивность*: h_1 и h_2 связаны аддитивно, когда их объясняющие способности складываются. Такое возможно, если h_1 и h_2 в *отдельности* объясняют исходные данные $d \in D_0$ только частично, но вместе могут объяснить данные полностью.

3. *Несовместимость*: h_1 и h_2 взаимно несовместимы, если одна из них включена в H_c , а другая — нет.

4. *Аннулирование*: h_1 и h_2 аннулируют объясняющие способности друг друга относительно некоторого $d \in D_0$. Например, h_1 может означать увеличение некоторой важности данных, в то время как h_2

будет ее уменьшать. Таким образом, происходит аннулирование объясняющих способностей друг друга по отношению к данной величине.

Задача абдукции является *нелинейной* при наличии несовместимости гипотез и *немонотонной* в случае аннулирования гипотез. Общая (нелинейная, немонотонная) задача абдукции является NP-полной [6].

Метод оптимизации абдукции с использованием нейронной сети Хопфилда

Синтез сложных гипотез требует значительных вычислений, особенно при установлении взаимодействий между простыми гипотезами [6]. Выйти из положения можно, увеличив скорость синтеза сложных объяснений из элементарных гипотез.

В [9] разработан подход, использующий принцип параллельности при синтезе сложных гипотез, и описана архитектура обработки сообщения на основе распределенной базы данных. В работе [9] решение задачи абдукции рассматривается с помощью искусственных нейронных сетей.

С точки зрения параллельной обработки, нейронные сети представляют интерес как эффективное, хорошо структурированное, распараллеливаемое средство для решения задач этого класса [16].

Дж. Хопфилд [11, 12] предложил нейронную сеть с сильно связанными нейронами, которую можно использовать для решения задач оптимизации [8, 13]. Важность этой модели состоит в том, что она позволяет быстро находить приемлемые решения, хотя среди этих решений может и не быть оптимального. Нейроны в сети являются аналоговыми устройствами, что делает их больше похожими на биологические нейроны, чем на строго цифровые модели. Акцент в этой модели делается на использование принципа параллельности.

Нейроны могут быть смоделированы подобно усилителям, которые описываются сигмоидальной функцией вида $V_j = g(u_j)$, где выходное напряжение V_j усилителя j является функцией входного напряжения u_j . Функцию V_j будем называть накопительной. Обозначим I_j входной ток смещения j -го нейрона. Возможность соединения между парами нейронов определяется матрицей соединения $\{W_{ij}\}$, $i, j = \overline{1, N}$, в которой отрицательное значение указывает на то, что связь является "тормозящей". Дж. Хопфилд [12] показал, что в случае симметричных связей между нейронами (т. е. таких, что $\forall i, j$ справедливо выражение $W_{ij} = W_{ji}$) сеть стремится к устойчивому состоянию, в котором выходы всех нейронов принимают постоянные значения.

Скорость изменения входного напряжения получается следующим образом:

$$\frac{du_j}{dt} = -u_j + \sum_{i=1}^N W_{ij}V_i + I_j.$$

Установившиеся значения выходных напряжений V_j определены токами смещения I_j и начальными значениями входных напряжений u_j .

Если диагональные элементы матрицы $\{W_{ij}\}$ принимают нулевые значения и усилители работают в накопительном режиме, т. е. их накопительные функции являются хорошими аппроксимациями пороговых функций (они определяют активное или неактивное состояние нейрона), то устойчивыми состояниями сети являются локальные минимумы функции энергии E , которая имеет вид

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} V_i V_j - \sum_{j=1}^N V_j I_j.$$

Состояние пространства сети из N нейронов определяется структурой гиперкуба N измерений, а набор всех локальных минимумов энергии — значениями W_{ij} . Для правильного выбора накопительной функции локальные минимумы должны быть ограничены N -мерным гиперкубом, т. е. V_j равно 0 или 1. Это особенно полезно, когда необходимо цифровое решение (0 или 1) данной задачи. Соответствующее значение накопительной функции при этом равно

$$V_j = \frac{1 + \tanh(u_j)}{2}.$$

Если же используются цифровые нейроны, то может возникнуть "заикливание". Кроме того, с цифровыми нейронами детерминированный поиск решения осуществляется вдоль границ гиперкуба, между которыми определяются поисковые интервалы. При использовании аналоговых нейронов поиск решения происходит внутри пространства гиперкуба.

Для решения задач с использованием нейронных сетей необходимо преобразовать их в вычислительную модель нейронной сети. Для решения задачи синтеза абдукции свяжем нейронную переменную V_j с каждой гипотезой $h \in H_e$. Таким образом определяется, включена ли простая гипотеза в составную. Минимизировать число элементов составной гипотезы

$\sum_{j=1}^N V_j$ можно, вводя ограничение: все входные данные $d \in D_0$ должны быть объяснены полностью, т. е.

$$\forall i = \overline{1, n}, \quad \sum_{j=1}^N Q_{ij} V_j \geq 1,$$

где Q_{ij} — матрица инцидентности.

Учитывая, что матрица инцидентности может принимать значения 0 или 1, рассмотрим выражение

$$\sum_{i=1}^N \prod_{j=1}^m \{(1 - Q_{ij}) + (1 - V_j)\}.$$

Здесь первое слагаемое в фигурных скобках описывает ограничение задачи и приравнивается к нулю в случае удовлетворения ограничения и к единице — в противоположном случае. Данные действия вынуждают сеть развиваться. Второе слагаемое, выраженное в виде суммы произведений для каждой исходной величины d_i , следует приравнять к нулю, когда гипотеза h_j , объясняющая величину d_i , входит в составную, т. е. $V_j = 1$. Это выражение удовлетворяет следующим условиям.

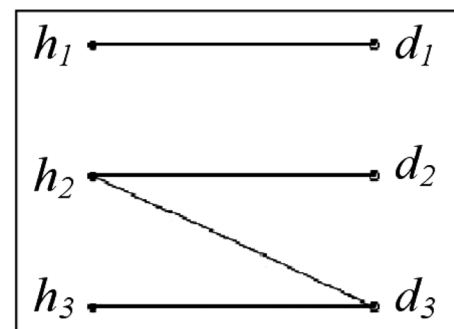
1. Каждое произведение не может быть отрицательным.
2. Каждое произведение приравнивается к нулю, когда гипотеза, объясняющая исходную величину, входит в составную. Иначе произведение принимает значение единицы.
3. Сумма произведений равна нулю в случае, когда определен состав гипотез, необходимый для объяснения всех данных.

В качестве иллюстрации рассмотрим пример оптимизации нахождения составной гипотезы.

Пример. Пусть имеются три простые гипотезы h_1, h_2, h_3 и три элемента данных d_1, d_2, d_3 , представленные на рисунке.

Здесь данные d_1 могут быть объяснены только с помощью гипотезы h_1, d_2 — только с помощью h_2, d_3 — с помощью h_2 и h_3 . Необходимо выявить такую составную гипотезу, с помощью которой можно будет объяснить все три элемента данных, при этом решение должно быть оптимальным. Рассмотрим возможные варианты составных гипотез для объяснения входных данных. Определим, как последняя формула будет меняться в зависимости от включения простых гипотез в составную.

1. Если в составную гипотезу включить все три гипотезы h_1, h_2 и h_3 , то слагаемое ограничения приравнивается к 0, так как все данные будут объяснены полностью.
2. Если в составную гипотезу включить гипотезы h_1 и h_3 и не включить h_2 , то значение выражения для исходной величины d_2 и слагаемое ограничения принимает значение 1, так как эти данные остаются необъясненными. Значения двух других данных принимают значение 0, поскольку гипотезы, которые могут объяснить их, входят в составную.



3. Если в составную гипотезу включить гипотезы h_1 и h_2 , слагаемое ограничения приравнивается к 0, так как все данные будут объяснены полностью.

Выделив первую и третью составные гипотезы как возможное решение задачи, теперь определим из них оптимальную. Сравнив полученные варианты, делаем вывод: в третьем случае значение нако-

пительной функции $\sum_{j=1}^m V_j$ (число элементов состав-

ной гипотезы) является наименьшим, поскольку в отличие от первой составной гипотезы для объяснения всех трех элементов данных это решение использует не три, а только две простые гипотезы, т. е. сведено к минимуму. Таким образом, в качестве решения задачи абдукции при условии, приведенном на рисунке, сеть выбрала бы последний случай, когда составная гипотеза включает в себя гипотезы h_1 и h_2 .

Функция энергии для этого случая равна

$$E = \alpha \sum_{j=1}^m V_j + \beta \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m \{(1 - Q_{ij}) + (1 - V_j)\},$$

где α и β — положительные константы. Первое слагаемое в функции энергии представляет собой число элементов составной гипотезы, а второе слагаемое — штраф за отсутствие полного покрытия, который принимает значение 0 в случае полного покрытия данных. Поскольку требование полного покрытия (объяснение всех наблюдаемых данных) имеет больший приоритет, чем минимальность сложной гипотезы, то константа β должна быть больше, чем α .

Для реализации функции энергии E потребуется наличие нейронной сети k -го порядка, где

$k = \max_i \sum_{j=1}^m Q_{ij}$, и определенного числа гипотез

$h \in H_e$, которые могут объяснить любые данные $d \in D_0$. Нейронная сеть k -го порядка допускает k способов соединения среди нейронов [17]. Если связи k -симметричны, то функция энергии не будет возрастать с течением времени. Пример симметричной связи с тремя способами соединения выглядит следующим образом:

$$\forall i, j, k \quad W_{ijk} = W_{ikj} = W_{jki} = W_{jik} = W_{kij} = W_{kji}.$$

Возможность соединения является одной и той же для всех перестановок записи. Отметим, что такая сеть более высокого порядка может решить задачу синтеза, используя только m нейронов, один для каждого $h \in H_e$.

На основании всего вышеизложенного можно сделать следующие выводы. Задача абдукции могла

бы быть использована при разработке систем диагностирования для решения задач изучения объекта, его возможных дефектов и признаков проявления, а также определения причин неработоспособного технического состояния объекта.

Поскольку задача абдукции является неоднозначной, ее можно описать как задачу оптимизации процесса вывода. Ввиду того что нейронные сети более формализованы и алгоритмизированы, в ряде случаев их можно использовать для решения задачи абдукции, что и было продемонстрировано в данной работе при использовании нейронной модели Хопфилда, так как она позволяет решить задачу оптимизации при неполной информации [4].

Список литературы

1. Ашинянц Р. А. Логические методы в искусственном интеллекте. М.: МГАПИ, 2001.
2. Вагин В. Н., Головина Е. Ю., Загорянская А. А., Фомина М. Б. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах. М.: Физматлит, 2004.
3. Головина Е. Ю. Метод вероятностных абдуктивных рассуждений в сложно структурированных проблемных областях // Информационные технологии. 2002. № 3. С. 30—40.
4. Люгер Дж. Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем / Пер. с англ. 4-е изд. М.: Изд. дом "Вильямс", 2005.
5. Машиностроение: Энциклопедия. В 40 т. Т. III-7. Измерения. Контроль, испытания и диагностика. / Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1996.
6. Bylander T., Allemang D., Tanner M. and Josephson J. The Computational Complexity of Abduction // Artificial Intelligence. 1991. 49. P. 25—60.
7. Goel A. and Bylander T. Computational Feasibility of Structured Matching // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, December 1989. 11 (12). P. 1312—1316.
8. Goel A., Ramanujam J. and Sadayappan P. Towards a Neural Architecture for Abductive Reasoning // Proc. Second IEEE International Conference on Neural Networks, San Diego, CA. Vol. II. July 1988. P. 681—688.
9. Goel A., Sadayappan P. and Josephson J. Concurrent Synthesis of Composite Explanatory Hypotheses // Proc. 17th International Conference on Parallel Processing, Vol. III. August 1988. P. 156—160.
10. Goel A., Soundararajan N. and Chandrasekaran B. Complexity in Classificatory Reasoning // Proc. of the Sixth National Conference on Artificial Intelligence, Seattle, Washington. July 1987. P. 421—425.
11. Hopfield J. Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities // Proc. of the National Academy of Sciences, USA. 1982. 79. P. 2554—2558.
12. Hopfield J. Neurons with Graded Response have Collective Computational Properties like those of Two-State Neurons // Proc. of the National Academy of Sciences, USA. 1984. 81. P. 3088—3092.
13. Hopfield J. and Tank D. Neural Computation of Decisions in Optimization Problems // Biological Cybernetics. 1985. 52. P. 141—152.
14. Josephson J., Chandrasekaran B., Smith J. and Tanner M. A Mechanism for Forming Composite Explanatory Hypotheses // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. May/June 1987. SMC-17 (3). P. 445—454.
15. Josephson J. and Goel A. Practical Abduction, in Abduction: Computation, Philosophy, and Technology, J. Josephson and S. Josephson (editors). New York: Cambridge University Press, in press.
16. Rumelhart D., McClelland J. and the PDP Research Group. Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1. The MIT Press, Cambridge, MA, 1986.
17. Sejnowski T. Higher-Order Boltzmann Machines // Neural Networks for Computing // AIP Conference Proceedings. N 151. 1986. P. 398—403.

УДК 004.896

Ф. М. Кулаков, д-р техн. наук, проф.,
С. Э. Чернакова, мл. научн. сотрудник,
СПИИ РАН, Санкт-Петербург

Информационная технология обучения роботов показом движений

Часть II. Алгоритмы и реализация модели формы движения*

Представлена новая технология обучения роботов методом показа движений с использованием интеллектуального мультимодального человеко-машинного интерфейса. Приведены результаты экспериментальных исследований новой технологии обучения движениям обзора внешней среды и рабочим движениям робота.

Концепция и принципы обучения роботов показом движений представлены в части I данной статьи [1].

Рассмотрим подробнее процессы обучения и воспроизведения движений робота с сенсорной системой, обеспечивающей восприятие объектов внешней среды (ВС), например, оцувствленного робота-манипулятора с телекамерой в схвате. Для обучения предложено использовать так называемую оцувствленную перчатку с установленной на ней телекамерой.

Обучение показом движения среди объектов внешней среды

Обучение и телеуправление роботом выполняется с использованием моделирующего комплекса, содержащего модель ВС (МВС), модель формы движения (МФД) и интеллектуальную систему мультимодального интерфейса (ММИ), создающую так называемый эффект присутствия человека в удаленной ВС с использованием трехмерных виртуальных моделей и изображений реальных объектов. Оператор с использованием ММИ может наблюдать трехмерные изображения с любой стороны, как в голографии, может прикоснуться или переместить виртуальные объекты, ощущая рукой тактильное и силовое воздействие с имитацией веса объекта или его массы в условиях невесомости [2, 3].

Вместо реальных макетов ВС могут использоваться виртуальное изображение МВС и компьютерная модель руки, управляемая системой слежения за положением руки (ССР), входящей в состав ММИ [4].

* Часть I см. в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", № 7, 2008.

Процесс обучения движениям робота среди объектов ВС состоит в том, что рука оператора, на которую надета оцувствленная перчатка, осуществляет движение в пространстве ВС, которое должен совершить впоследствии схват манипулятора. Для этого на стадии обучения необходимо выполнить следующие операции (в режиме on-line):

а) показать фрагмент движения рукой оператора среди объектов макета ВС или виртуальной модели руки в компьютерной модели ВС (МВС);

б) зарегистрировать с помощью системы ММИ и записать в память фрагмент движения, содержащего метки времени и соответствующий вектор (X) шести координат положения ($x = x(l)$, $y = y(l)$, $z = z(l)$) и ориентации ($\varphi_x = \varphi_x(l)$, $\varphi_y = \varphi_y(l)$, $\varphi_z = \varphi_z(l)$) руки оператора;

в) распознать форму движения с помощью системы ММИ и записать результаты в виде фреймового описания в МФД;

г) зарегистрировать изображения объектов, получаемые телекамерой перчатки в процессе движения руки, выполнить распознавание, идентификацию и измерение координат характерных точек изображения объектов, внести эти данные в МВС;

д) дополнить МФД информацией о расположении объектов МВС относительно перчатки во время выполнения фрагмента движения.

Положение оцувствленной перчатки относительно объектов макета ВС определяется в процессе обучения показом, путем решения так называемой навигационной задачи. Оригинальное решение навигационной задачи для данного случая предложено в работе [5].

При обучении робота движению методом показа в поле зрения телекамеры, расположенной на оцувствленной перчатке, попадают объекты (макеты) ВС. Это могут быть объекты манипуляции или посторонние объекты (препятствия). В случаях промышленных и космических применений роботов объекты в основном имеют правильные геометрические формы, углы и грани, которые могут использоваться в качестве характерных признаков, характерных точек.

Характерными точками (ХТ) могут быть малоразмерные (точечные) детали объектов, которые легко выделить на изображении, а также специальные метки или точечные источники света. Именно по этим точкам наиболее просто определить положение и ориентацию телекамеры на оцувствленной перчатке относительно объектов ВС, т. е. решить навигационную задачу в процессе обучения робота.

Рассмотрим вариант, когда векторы положения ХТ объекта $X^{(i)}$ ($i = 1, 2, 3$ — номер ХТ) в системе координат (СК), связанной с объектом, заранее известны. Изображения трех ХТ объекта ($x_{im}^{(1)}$, $x_{im}^{(2)}$, $x_{im}^{(3)}$)

на поверхности изображения в телекамере являются проекциями реальных точек (ХТ1...ХТ3) на эту плоскость в переменном масштабе $k^{(i)} = f/d^{(i)} - f$, обратно пропорциональном расстоянию $d^{(i)}$ точки до плоскости изображения объектива; здесь f — фокусное расстояние объектива.

Полагаем, что СК, связанная с объективом телекамеры, а следовательно, с перчаткой, расположена так, как это показано на рис. 1 (см. вторую сторону обложки), т. е. оси x_1 и x_2 СК параллельны плоскости изображения, x_3 — перпендикулярна им и направлена от объектива к объекту. На рис. 1: X_1, X_2, X_3 — оси системы координат, связанной с объектом; $x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}$ — векторы, определяющие положение ХТ в системе координат объектива телекамеры; $x_{im1}^{(2)}, x_{im2}^{(2)}$ — две проекции вектора из центра

ПЗС-матрицы к изображению $x_{im}^{(2)}$ ХТ2 (аналогично можно показать для ХТ1 и ХТ3). (Индекс "im" — от английского "image" — "образ".)

Таким образом, расстояние $d^{(i)}$ равно проекции i -й ХТ на третью ось СК, связанной с телекамерой: $d^{(i)} = x_{im3}^{(i)}$, а положения изображения ХТ объекта $X^{(i)}$ в плоскости изображения представляются двумерными векторами:

$$x_{im}^{(i)} = (x_{im1}^{(i)}, x_{im2}^{(i)}) = k^{(i)} \widehat{T} X^{(i)}, \quad (1)$$

где $\widehat{T}$ — матрица (2×4) , составленная из первых двух строк матрицы $T = \begin{bmatrix} \alpha & X_n \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, характеризующей поворот и смещение СК, связанной с телекамерой на перчатке, относительно СК объекта. Здесь α — матрица направляющих косинусов относительного угла поворота СК, $X_n = (x_{n1}, x_{n2}, x_{n3})$ — вектор смещения начала СК,

$$X^{(i)} = (x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}, 1).$$

Тогда

$$d^{(i)} = x_{im3}^{(i)} = T_3 X^{(i)},$$

где T_3 — третья строка матрицы T .

Очевидно, что матрица T полностью определяет пространственное положение перчатки в СК, связанной с объектом, и нахождение ее элементов является результатом решения вышеупомянутой навигационной задачи определения пространственного положения перчатки при обучении.

При обработке изображения ХТ определяются векторы $x_{im}^{(i)}$, $i = 1, 2, 3$, поэтому левая часть уравне-

ний (1) является известной, и эти уравнения представляют собой систему из шести уравнений относительно 12 неизвестных элементов матрицы T , которыми являются три компоненты вектора X_n и девять элементов матрицы α .

Поскольку элементы матрицы α связаны еще шестью уравнениями ортогональности и ортонормированности, то всего имеется 12 уравнений, т. е. столько, сколько имеется неизвестных, что, очевидно, достаточно для определения искомой матрицы T .

При "обучающем" движении руки оператора с заданной частотой должна выполняться процедура, включающая операцию выделения изображений ХТ объекта и операцию вычисления значений двумерных векторов $x_{im}^{(i)}$, $i = 1, 2, 3$, их положения в плоскости изображения.

В результате этих действий в базе данных ММИ накапливается последовательность значений троек векторов от стартовой $x_{imb}^{(i=1,2,3)}$ до финишной $x_{ime}^{(i=1,2,3)}$: $(x_{imb}^{(1)}, x_{imb}^{(2)}, x_{imb}^{(3)}); (x_{imI}^{(1)}, x_{imI}^{(2)}, x_{imI}^{(3)}); (x_{imII}^{(1)}, x_{imII}^{(2)}, x_{imII}^{(3)}); \dots (x_{ime}^{(1)}, x_{ime}^{(2)}, x_{ime}^{(3)})$, соответствующих последовательности положений перчатки в процессе движения руки оператора, которое робот будет впоследствии воспроизводить. Каждый элемент этой последовательности несет информацию, достаточную для решения навигационной задачи, т. е. для получения последовательности $T_b, T_r, T_{II}, \dots, T_e$ значений матрицы, являющихся результатом обучения (см. часть I данной статьи).

После обучения робот воспроизводит движение схвата на основе последовательности $T_b, T_r, T_{II}, \dots, T_e$ с использованием алгоритма коррекции этого движения по сигналам от телекамеры, находящейся в схвате, путем решения так называемой задачи коррекции схвата относительно объектов реальной ВС.

Основные алгоритмы обучения робота показом

Наиболее характерным примером взаимодействия робота с объектами ВС является манипуляция с произвольно-ориентированными объектами. Задача взятия объектов имеет несколько случаев, встречающихся на практике. В наиболее простом случае имеется один известный объект. Требуется обучить робота операции взятия этого объекта независимо от возможных незначительных изменений его позиции и ориентации.

Более сложным является случай, когда позиция и ориентация известного объекта не известны заранее. Наиболее типичным является случай наличия нескольких известных объектов с априорно неизвестными их позицией и ориентацией. Еще более сложный вариант взятия имеет место, когда

среди известных объектов находятся неизвестные объекты и помехи, которые могут препятствовать процедуре взятия.

Алгоритм обучения движению осмотра внешней среды

В процессе обучения движению осмотра рука оператора выполняет одно или несколько типовых поисковых движений: вращение кисти по двум углам, движение зигзагом и т. п. Информация о форме типовых поисковых движений заносится в МФД. Обзорное движение может состоять из нескольких фрагментов различных движений. Последовательность и форма этих движений зависят от задачи, определяются на этапе обучения и хранятся в МФД. После выполнения отдельных фрагментов движения может быть выполнена остановка для анализа изображения объектов ВС.

Алгоритм распознавания объектов ВС может использоваться любой, пригодный для решения конкретной задачи, в том числе алгоритм структурного распознавания [6].

Следует отметить, что анализ изображения объектов должен включать в себя:

- распознавание объекта, подлежащего взятию, по некоторому набору характерных признаков (характерных точек $ХТ1, ХТ2, \dots, ХТk$), достаточных для его идентификации по описанию, хранящемуся в МВС;
- выбор среди набора точек ($ХТ1, ХТ2, \dots, ХТk$) именно тех реперных точек ($ХТ1, ХТ2, \dots, ХТn$), которые достаточны для навигации схвата робота в пространстве реальной ВС, обычно не более $n = 4..6$, в зависимости от их расположения.

В том случае, если число наблюдаемых ХТ на объекте недостаточно ($k < n$), необходимо выполнить следующие движения поиска:

- изменить позицию или ориентацию телекамеры на перчатке таким образом, чтобы $k \geq n$, или изменить параметры фильтрации ХТ в алгоритме распознавания;
- изменить условия наблюдения или параметры телекамеры для надежного распознавания ХТ, например, освещенность рабочего места оператора или фокусировку объектива телекамеры;
- добавить искусственные (контрастные, цветные) метки на компьютерной модели или макете объекта, рекомендовать использование этих меток на реальных объектах;
- в том случае, если $k \geq n$, можно перейти к расчету пространственного положения и ориентации перчатки относительно объекта в соответствии с алгоритмом "навигационной задачи" (см. выше).

Как только будет обнаружен и идентифицирован заданный объект и определены положение и ориентация руки (перчатки) относительно этого объекта, обучение первому движению обзора заканчивается.

Цель следующего движения, которому обучается робот, состоит в перемещении схвата в так называемую удобную для наблюдения позицию. При нахождении в ней достигается максимальная надежность идентификации и точность измерений позиции схвата относительно объекта.

Варианты перехода из начальной точки обнаружения объекта в положение, "удобное для наблюдения", должны быть показаны движением руки оператора с использованием его интуитивного опыта.

Разработан вариант обучения показом обзорных движений, выполняемых посредством естественных движений головы. В этом случае телекамера размещается вместе с реперным устройством на голове человека-оператора.

Процесс обучения автоматически заканчивается, например, по сигналу системы ММИ после достижения заданных параметров достоверности распознавания и точности измерений положения руки или головы относительно объекта ВС. Сигнал окончания обучения может быть подан голосом (с использованием системы распознавания речи ММИ) или нажатием кнопки на перчатке. При этом координаты объекта, определенные по его изображению, записываются в МФД в виде вектора координат (X_0).

Алгоритм обучения взятию одного объекта

Процесс взятия в этом случае состоит из трех движений:

- 1) перемещения схвата из исходного положения в положение, "удобное для взятия" объекта;
- 2) движение захвата объекта, например, простым поступательным движением вдоль оси схвата;
- 3) движение взятия объекта, например, простым сжатием схвата с заданной силой.

Рассмотрим только обучение первому действию, при котором оператор свободно перемещает руку с оцувствленной перчаткой к объекту (макету) из исходного положения с наиболее удобной для взятия стороны и устанавливает ее на небольшом расстоянии от предмета с требуемой ориентацией. При этом в МФД с помощью системы ММИ запоминается информация о траектории движения и положении руки относительно объекта, по крайней мере, в конечной точке движения, что необходимо для коррекции положения схвата робота относительно объекта при воспроизведении движения. Желательно также, чтобы в положении схвата, "удобном для взятия", в поле зрения телекамеры на перчатке находились хотя бы одна — две ХТ изображения объекта, чтобы можно было контролировать процесс выполнения взятия.

Обучение движению взятия проводится по наиболее простой траектории, чтобы снизить погрешность наведения. Если в схвате есть датчики нали-

чия предмета, то окончание движения выполняется по сигналам этих датчиков.

При обучении взятию объекта необходимо запомнить поперечный размер объекта в месте взятия и силу сжатия схвата, достаточную для удержания предмета и не слишком большую, чтобы не разрушить данный предмет. Эта операция может быть реализована с использованием дополнительных силовых и тактильных датчиков в схвате робота.

Обучение взятию в случае наличия нескольких объектов ВС отличается более сложным процессом идентификации изображения объектов и необходимостью обучения дополнительным движениям, например обходу препятствий, изменению позиций, удобных для наблюдения при наличии затенения, бликов и помех распознаванию изображения телекамерой на перчатке, а также при воспроизведении движений — для телекамеры в схвате робота-манипулятора.

Особенности алгоритма воспроизведения движений

В результате выполнения необходимого числа обучающих движений рукой человека формируется "опыт движений", накапливаемый в виде фрейм-структурированного описания в МФД, хранящегося в памяти интеллектуальной системы ММИ.

Передача "опыта движений" от человека к роботу происходит, например, путем простого копирования МФД и МВС из памяти ММИ в память СУР или даже передачей этих данных телеуправляемому роботу по каналам связи. Конечно, предварительно выполняется проверка результатов обучения, например, на компьютерной модели робота.

До начала выполнения роботом обученных движений, в соответствии с поставленной задачей и условиями ВС, происходит настройка МФД, как уже отмечалось (в части I данной статьи), например, путем маскирования (поиска) среди всего объема данных МФД необходимых типов движений. Выбранные по назначению и форме траектории описания движений преобразуются СУР в типовые траектории движений для их воспроизведения роботом в реальной ВС.

При воспроизведении движений роботом-манипулятором в реальной ВС после обучения показом имеется возможность выполнить, например, следующие типовые движения:

- обзорное движение в сочетании с анализом изображения ВС в целях выявления объекта, предназначенного для взятия;
- перемещение схвата в позицию, "удобную для наблюдения";
- корректирующее движение схвата относительно объекта по сигналам сенсоров робота;
- перемещение схвата в позицию, "удобную для взятия";
- движение для захвата реального объекта;
- движение для взятия объекта.

До начала работы выполняется контроль функционирования ССР и системы телеуправления в целом. Затем проверяется работа ССР с компьютерной моделью (ГМ) в пункте управления без использования робота и обмена информацией по линии связи. Выполняется проверка результатов обучения с использованием МФД обзора или МФД манипулирования, находящейся в СУР, без включения в этот момент робота. При необходимости выполняется дополнительная коррекция МФД посредством обучения показом естественных движений руки человека и запоминания их в МФД СУР.

Робот включается и выполняет движение первоначального осмотра ВС, выбора объектов, выбора позиции, удобной для взятия или удобной для визуального контроля захвата объекта и манипуляций с ним, а также безопасного обхода препятствий, а затем выполняется переход в режим телеуправления.

Человек-оператор сидит перед экраном монитора, на котором отображается компьютерная модель или реальное изображение объекта, и управляет роботом посредством естественных движений головы и руки с перчаткой.

Некоторые результаты экспериментальных исследований

Эффективность предложенной технологии обучения показом движений, алгоритмов и теоретических расчетов проверялась экспериментально на базе комплекса "Виртуальной реальности" в лаборатории информационных технологий в робототехнике СПИИ РАН (Санкт-Петербург) [7].

Аппаратно-программный комплекс включает в себя:

- два шестистепенных робота-манипулятора типа "Puma" со стереотелекамерами и силовым ощущением;
- макеты фрагмента поверхности космической станции, две графические станции для работы с трехмерными моделями внешней среды (МВС);
- интеллектуальный мультимодальный интерфейс (ММИ) с системой слежения за движениями руки (ССР) и системой слежения за движениями головы (ССГ) человека-оператора.

Комплекс "Виртуальной реальности" обеспечивает возможность экспериментальных исследований различных информационных технологий телеуправления и обучения роботов:

- "технологии погружения" человека-оператора в удаленную внешнюю среду с использованием роботоподобного устройства, перемещающего обзорные стереотелекамеры в помещении с макетами фрагмента поверхности космической станции и контейнеров для научной аппаратуры;
- технологии "виртуального наблюдателя" с использованием модели свободно летающего аппарата (с обзорной телекамерой, позволяющей

осматривать компьютерную трехмерную модель космической станции), а также имитировать работу космонавта в космосе;

- технологии обучения и телеуправления космическим (медицинским) роботом-манипулятором с системой силомоментного оцувствления, обеспечивающей безопасность работы при манипуляционных операциях, отражение усилий и моментов на рукоятке управления, в том числе при работе с виртуальными объектами.

Проведены экспериментальные исследования некоторых алгоритмов обучения показом и телеуправления роботом-манипулятором, в том числе:

- обучения робота-манипулятора движениям осмотра посредством движений головы человека;
- сканирования внешней среды роботом и телекамерой на перчатке;
- использования ММИ для обучения показом движений рукой и голосовыми командами человека;
- обучения робота-манипулятора взятию предметов показом движений руки оператора.

В экспериментальном комплексе отрабатывалось также воспроизведение движений робота-манипулятора среди объектов реальной ВС на основе использования виртуальных компьютерных моделей ВС и робота-манипулятора с системой силомоментного оцувствления.

Обзор внешней среды при обучении показом движений головы человека

Функциональная схема аппаратуры при дистанционном наблюдении ВС представлена на рис. 2.

Находящийся в пункте управления оператор с помощью системы слежения за положением головы (ССГ) задает координаты и ориентацию схвата манипулятора и телекамер на нем. Полученное изображение ВС он наблюдает на экране монитора.

До начала работы человек-оператор должен иметь возможность проверить ССГ в автономном режиме. Для этого разработана компьютерная модель (GM) и специальный модуль связи для управления по шести координатам.

Обучение робота-манипулятора движениям осмотра ВС методом показа происходит следующим образом (рис. 3, см. вторую сторону обложки).

Человек-оператор выполняет осмотр ВС, используя свой личный опыт осмотра объектов. Робот повторяет процедуру, используя порядок осмотра и форму траектории движения головы человека. При этом сначала можно перемещать курсор по полученному панорамному изображению, увеличивать (уменьшать) масштаб отдельно взятых фрагментов, а уже после проверки правильности выполнять реальное движение робота-манипулятора.

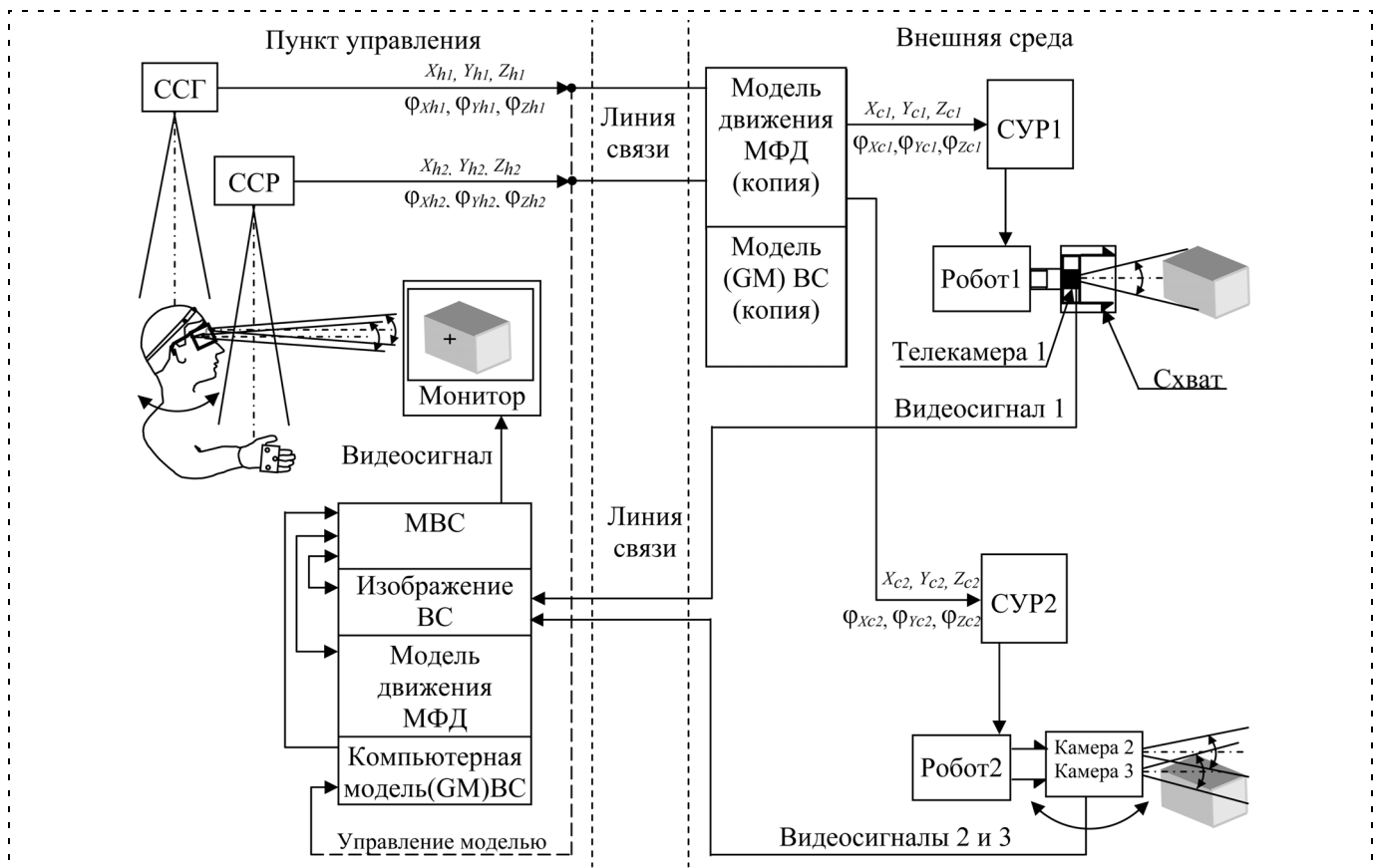


Рис. 2. Функциональная схема обучения робота обзорным движениям и движению взятия объектов с использованием ССГ и ССР

Обучение робота взятию предметов показом движений руки оператора

Реализовано несколько вариантов конструкции "очувствленной перчатки" (рис. 4, см. вторую сторону обложки): телекамера в браслете на руке с реперами и лазерными указками, браслет с активными реперами (ИК-диодами), манипуляционный объект — стик с активными реперами [8].

При обучении показом движений руки человека, оснащенной очувствленной перчаткой с телекамерой и реперами, достигается больший диапазон и естественность движений по сравнению с применением джойстиков или рукоятки типа "Master-Arm" (рис. 5, см. третью сторону обложки).

В этом случае обеспечивается возможность естественной координации движений руки и головы человека-оператора: головой человек управляет движениями обзорной телекамеры, например установленной на дополнительном манипуляторе, а рукой управляет позицией и ориентацией схвата основного робота манипулятора (рис. 6, см. третью сторону обложки).

Для управления сложными объектами отрабатывалась координация одновременного управления рукой и головой оператора при обучении и телеуправлении посредством естественных движений человека-оператора (рис. 7, см. третью сторону обложки).

Экспериментально исследовался новый прототип аппаратуры интеллектуального ММИ с распознаванием руки оператора без маркеров при выполнении ручного управления и обучения методом показа естественных движений руки (рис. 8, см. третью сторону обложки).

В дальнейшем планируется продолжить исследования новых алгоритмов обучения и телеуправления роботами и интеллектуальными мехатронными системами, основанными на использовании перспективных систем интеллектуальных мультимодальных человеко-машинных интерфейсов и новых принципов моделирования движений с использованием фрейм-структурированных описаний МФД, в том числе для медицинских роботов, мехатронных систем и телемедицины [9].

Заключение

Новая информационная технология обучения роботов (мехатронных систем) показом движений основана на использовании фрейм-структурированного представления данных в модели формы движений, позволяющей легко корректировать семантику и топологию движений как человеку-оператору, так и автономному очувствленному роботу.

Разработанная технология обучения предполагает использование интеллектуального мультимодального человеко-машинного интерфейса, который отличается следующим:

- наглядностью и простотой обучения робота сложным движениям;
- надежностью контроля и простотой коррекции результатов обучения;
- обеспечением "эффекта присутствия" человека в удаленной рабочей зоне с трехмерной визуализацией и кинестетическими ощущениями виртуальных и реальных объектов.

В предложенной технологии реализуются одновременно две системы:

- распознавания естественных движений руки человека при обучении робота;
- распознавания объектов (макетов) внешней среды, наблюдаемых телекамерой, установленной в очувствленной перчатке на руке оператора.

Выполненные экспериментальные исследования разработанных алгоритмов обучения и воспроизведения движений осмотра сцены и взятия произвольно ориентированных предметов роботом-манипулятором в стендовых условиях показали эффективность представленной технологии.

Наиболее актуальным является использование результатов исследований новой технологии обучения для интеллектуальных медицинских роботов, роботов-ассистентов, антропоморфных роботов и роботов-андроидов, широко распространенных уже сегодня. Применение новой технологии обучения для космических роботов, а также для современных сборочных производств, в том числе с использованием микро- и нанороботов, также весьма перспективно.

Список литературы

1. Кулаков Ф. М., Чернакова С. Э. Информационная технология обучения роботов показом движений. Ч. I. Концепция, принципы моделирования движений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 6.
2. Кулаков Ф. М. Потенциальные методы управления податливым движением роботов и их виртуальных моделей. Ч. I. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. № 11. С. 2—7.
3. Кулаков Ф. М. Потенциальные методы управления податливым движением роботов и их виртуальных моделей. Ч. II. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 1. С. 15—21.
4. Chernakova S., Nechaev A., Karpov A., Ronzhin A. Multimodal system for hands-free PC control // 13th European signal Processing Conference EUSIPCO-2005. Turkey, 2005.
5. Kulakov F. M., Nechaev A. I., Chernakova S. E. and oth. Eye Tracking and Head-Mounted Display // Tracking Computer Systems for the Remote Control of Robots and Manipulators. Project # 1992P, Task 5 with EOARD. St. Petersburg, 2002.
6. Nechaev A. I., Vorobjev J. S., Corobkov I. N., Olkov M. S., Javnov V. N. Structural Methods of recognition for real time systems // International Conference on Modeling Problems in Bionics "BIOMOD-92". St.-Petersburg, 1992.
7. Кулаков Ф. М. Технология погружения виртуального объекта в реальный мир // Информационные технологии. Приложение. 2004. № 10. С. 1—32.
8. Чернакова С. Э., Кулаков Ф. М., Нечаев А. И. Аппаратно-программные средства ЧМИ для телеробототехники с использованием систем слежения за движениями человека-оператора // Тр. III Междунар. конф. "Кибернетика и технологии XXI века". Воронеж, 2002.
9. Чернакова С. Э., Нечаев А. И., Назарук В. П. Метод регистрации и визуализации трехмерных рентгеновских изображений в режиме реального времени для задач неразрушающего контроля и медицинской диагностики // Информационные технологии. 2005. № 11. С. 28—37.

УДК 681.51:007.52:631.324

С. В. Петухов, канд. техн. наук,
Московский институт

коммунального хозяйства и строительства

Методы автономной навигации при попятном движении робота по запомненным ориентирам на пройденной траектории

Представлены методы автономной навигации и структура алгоритма управления по запомненным ориентирам для определения отклонений от номинальной траектории и коррекции движения транспортного робота. Предлагаются алгоритмы сжатого представления ориентиров в виде точечных планов в бортовом компьютере с использованием данных от стереотелевизионной системы технического зрения. Приводятся результаты экспериментальных исследований нового метода навигации, основанного на сравнении запомненных точечных планов ориентиров и полученных при автоматическом попятном движении робота.

Ключевые слова: автономные и телеуправляемые мобильные роботы, интеллектуальные роботы, зрение роботов, навигация роботов, согласование точечных изображений.

Введение

Разработка системы автоматического возвращения робота по ориентирам, полученным с помощью системы технического зрения (СТЗ) на пройденной траектории и запомненным в бортовом компьютере, отвечает общей тенденции развития автономных и дистанционно управляемых роботов. Решение проблемы основано на использовании адаптивного управления и интеллектуальной обработке информации, а ее актуальность обусловлена рядом задач, например, таких как:

- сохранение робота и результатов исследований в случае нарушения с ним связи или возвращения робота путем попятного движения пройденным маршрутом;
- попятное движение робота на несколько "шагов" назад для принятия альтернативного решения при встрече непреодолимого препятствия.

Предлагаемый способ навигации по запомненным ориентирам не требует их определения в абсолютной системе координат, и такая навигация является альтернативой спутниковой навигационной системе (GPS), которая не воспринимает препятствия, подавляется помехами и экранируется в помещении.

Навигация при автоматическом возвращении робота по запомненным ориентирам

СтереостЗ обладает большой информативностью, автономностью и помехозащищенностью по сравнению с другими источниками информации о внешней среде. Благодаря возможности измерения трехмерных координат ориентиров стереостЗ по-

зволяет получить модель внешней среды для пересеченной местности в виде цифровой карты высот [1], а для промышленной среды — построить план помещения. В последнем случае целесообразно представлять модель внешней среды в виде границ пола и препятствий (колонн, краев дверных проемов и т. п.) в проекции на опорную плоскость [2].

Новое двухмерное представление модели внешней среды в виде точечных планов является результатом многократного сжатия данных на изображениях стереопары, обладающих большой избыточностью. Точечный план (ТП) получается путем вычисления одномерных проекций вертикальных границ ориентиров на опорную плоскость. Из названных видов представлений точечный план требует наименьший объем памяти для хранения и является самым эффективным по критерию минимальной сложности сопутствующих вычислений.

Отличительная особенность рассматриваемой постановки задачи заключается в том, что информация об ориентирах получается в результате оперативной обработки изображений в реальном масштабе времени, непосредственно в процессе движения робота. При этом ориентирами не могут быть объекты (метки), искусственно вносимые в среду во время движения.

Задача автоматического возвращения робота по запомненным ориентирам предусматривает два этапа движения робота:

- прямое движение (в рабочую зону) в автономном или телеуправляемом режиме с запоминанием параметров траектории (например, протяженности участков пройденного пути l , углов поворота траектории ϕ) и описаний ориентиров в виде точечных планов P ;
- попятное движение по пройденной траектории в автоматическом режиме с использованием результатов согласования точечных планов: запомненных P и вновь полученных P для коррекции траектории.

Навигация телеуправляемого робота при прямом движении предполагает, что маршрут движения робота заранее определен, а траектория уточняется при условии прохождения вблизи ориентиров. Для этого на борту робота размещены телекамеры (стереоблок) на поворотной платформе, управляемой оператором по радиоканалу. Применение поворотного стереоблока увеличивает поле зрения робота для выбора ориентиров и позволяет наблюдать один и тот же ориентир из разных точек траектории, что расширяет функциональные возможности мобильного робота.

Считается, что робот движется по многозвенной полигональной траектории (рис. 1), состоящей из прямолинейных отрезков длиной l_k , связанных между собой узловыми точками S_k , $k = 1, 2, \dots, N - 1$, S_N — конечная точка следования робота. В некоторых узловых точках, называемых опорными, про-

водятся измерения, находятся ориентиры и формируются точечные планы.

Во время остановки в опорной точке S_k оператор-водитель находит ориентиры путем поворота устройства наведения стереоблока и выдает команду на ввод стереоизображений в компьютер на его рабочем месте.

Измерения для определения положения ориентиров (далее — измерения ориентиров) проводятся либо с использованием человеко-машинной стереостЗ [3], либо в автоматическом режиме. В первом случае измеряемые точки на ориентирах указываются с помощью курсора на экране дисплея. В обоих случаях формирование точечного плана выполняется автоматически. Полученное сжатое представление ориентиров в виде точечных планов P_k передается роботу для запоминания в бортовом компьютере вместе с измеренными параметрами траектории (l_k, φ_k) и углом поворота стереоблока β_k . Очередной участок траектории в каждой узловой точке S_k задается его длиной l_{k+1} .

Навигация автономного робота при движении в рабочую зону предусматривает измерения ориентиров и формирование точечных планов в соответствии с программой движения, а запоминается не номинальная, а действительно пройденная траектория.

Навигация при автоматическом попятном движении робота (автономного или телеуправляемого) основана на использовании оперативной машинной относительной карты (МОК), автоматически сформированной в процессе прямого движения робота в узловых и опорных точках. Такая карта представлена в памяти бортового компьютера в виде стека. Каждый "лист" МОК, соответствующий k -й опорной точке, представлен параметрами (l_k, φ_k, β_k) и точечным планом P_k . Если в узловых точках ориентиры не наблюдаются, тогда в МОК запоминаются только параметры траектории — l_k и φ_k .

При попятном движении робота "листы" МОК извлекаются из стековой памяти бортового компьютера в обратном порядке в соответствии с номером узловой точки S_k . Параметры дальнейшего движения робота определяются из условия достижения следующей точки S_{k-1} на запомненной траектории. Схема движения робота вблизи опорной точки S_k , представленная на рис. 2, а, позволяет определять параметры управления ($\hat{\varphi}_k, \hat{l}_k$) по данным ($l_k, \varphi_k, \beta_k, P_k$), извлекаемым из МОК.

Параметры траектории (l_k, φ_k) на участке движения робота от точки S'_{k+1}

к точке S_k реализуются системой автоматического управления с ошибками, поэтому происходит отклонение робота от намеченной точки S_k в точку S'_k , в которой выполняется стереосъемка и получается точечный план P'_k . В результате совмещения плана P'_k с запомненным планом P_k определяется их относительный угол поворота Θ_k , вектор отклонения робота от траектории $\bar{r}_k$ и параметры управления ($\hat{\varphi}_k, \hat{l}_k$) для следования робота в точку S_{k-1} . Основная проблема заключается в получении и согласовании точечных планов для вычисления параметров ($\bar{r}_k, \Theta_k$).

Последовательный алгоритм навигации ориентиров состоит в следующем. По результатам согласования точечных планов P_k и P'_k на каждом k -м шаге попятного движения робота из точки S'_k в точку S_{k-1} определяется вектор отклонения робота по положению $r_k = (\Delta x_k, \Delta y_k)^T$ в проекциях на оси декартовой системы координат $x_k S_k y_k$, где T — знак транспонирования. Из навигационного треугольника $S_k S_{k-1} S'_k$ (рис. 2, а) находится угол прицеливания: $v_k = \varphi_k + \alpha_k$, где $\alpha_k = \arcsin(\Delta y_k / r_k)$ — на-

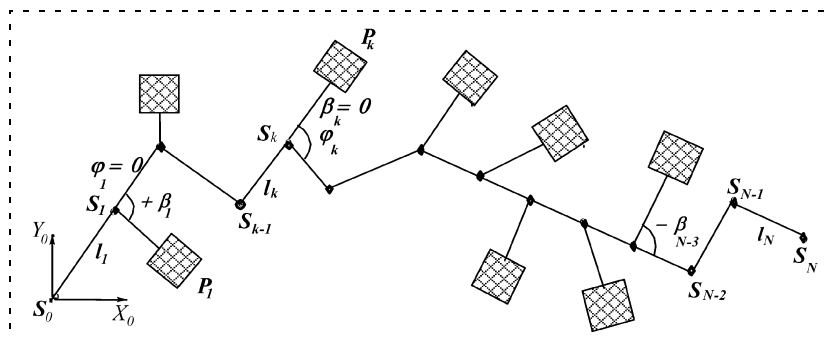


Рис. 1. Схема привязки номинальной траектории к планам окрестностей P_k при формировании машинной относительной оперативной карты (МОК)

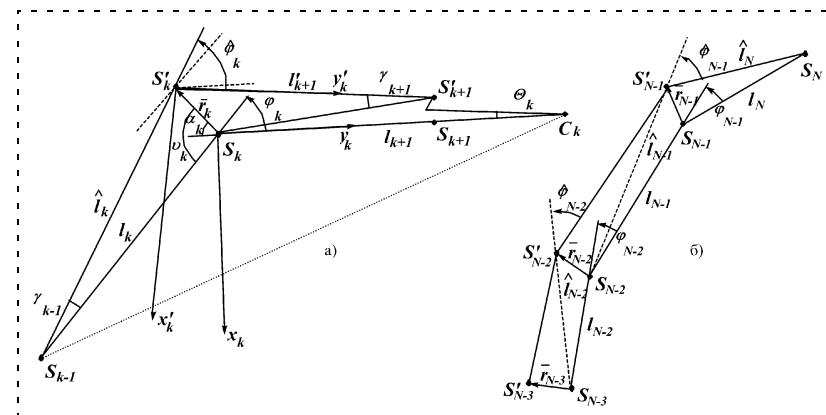


Рис. 2. Схема определения параметров управления в точке S'_k : длины пути $\hat{l}_k$ и курсового угла $\hat{\varphi}_k$ (а) и траектория попятного движения робота (б)

клон вектора r_k относительно оси координат $S_k y_k$,

$$r_k = \sqrt{\Delta x_k^2 + \Delta y_k^2}.$$

Далее вычисляется новая длина участка траектории $\hat{l}_k$ и угол поворота $\hat{\varphi}_k$ траектории в точке S'_k из условия прибытия робота в точку S_{k-1} по формулам:

$$\hat{l}_k = \sqrt{r_k^2 + l_k^2 - 2r_k l_k \cos \vartheta_k}, \quad v_k = \varphi_k + \alpha_k; \quad (1)$$

$$\hat{\varphi}_k = \varphi_k + \Theta_k + \gamma_{k-1}, \quad (2)$$

где $\gamma_{k-1} = \arccos[(l_k^2 + \hat{l}_k^2 - r_k^2)/2l_k \hat{l}_k]$ — угол схождения; Θ_k — относительный угол поворота точечных планов. Найденные по формулам (1) и (2) значения $\hat{\varphi}_k$ и $\hat{l}_k$ передаются в систему управления автоматическим движением робота для их реализации. В качестве примера на рис. 2, б, показана траектория попятного движения на три шага от конечной точки S_N до точки S'_{N-3} .

Структура бортового вычислительного комплекса навигации и управления на основе МОК позволяет адаптировать ее к различным датчикам информации, в том числе к GPS, лазерному дальномеру, датчику пройденного пути и гироскопу в качестве курсовой системы. Гироскоп может корректироваться в опорных точках по результатам согласования точечных планов.

Получение информации об ориентирах

Используются разработанные эффективные методы обработки и анализа стереоизображений. Точечные планы формируются путем измерения ориентиров двумя способами — с участием человека-оператора и в автоматическом режиме работы стереоСТЗ [4].

Формирование точечных планов с помощью человеко-машинной стереоСТЗ [3, 4] отличается высокой степенью надежности благодаря развитому интерфейсу и возможности оператора наблюдать на экра-

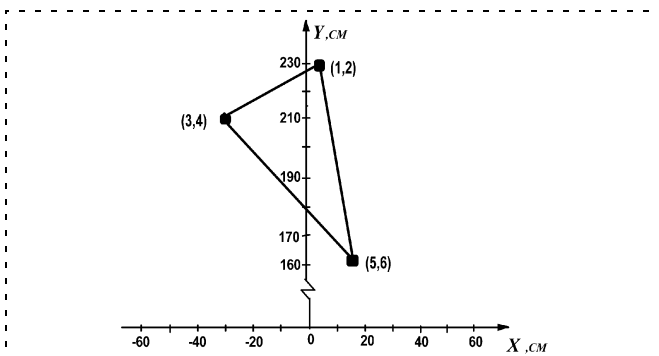


Рис. 3. Точечный план ориентиров в проекции на пол (измеренные точки пронумерованы от 1 до 6)

не дисплея ПЭВМ ориентиры (и препятствия), указывать с помощью курсора точки на ориентирах на одном из изображений стереопары, по координатам которых автоматически строятся точечные планы [5]. Точечный план получается свободным от помех и представляет *точечный план ориентиров* — неизменяемую конфигурацию точек, форма и размеры которой инвариантны к направлению и дальности съемки (рис. 3). Элементы точечного плана ориентиров на рис. 3 обозначены номерами соответствующих измеренных точек. Другой пример точечного плана для производственной среды представлен в работе [6].

Задача согласования точечных планов

Учитывается смещение точечных планов по положению r и их относительный угол поворота Q при разной мощности множеств, представляющих точечные планы, включая помехи.

Введем системы координат $x_k S_k y_k$ и $x'_k S'_k y'_k$ в плоскости движения робота (см. рис. 2, а), с осями $S_k y_k$ и $S'_k y'_k$, совмещенными с соответствующими отрезками траекторий: запомненной и реализованной при попятном движении. Взаимное положение точечных планов определяется аффинным преобразованием, включая поворот на угол Θ , перенос r и изменение масштаба μ :

$$R_P = \mu M(\Theta) R_{P'} + r, \quad (3)$$

где $r = (\Delta x, \Delta y)^T$ — вектор смещения плана P' в системе координат плана P (равный вектору отклонения робота от соответствующей опорной точки); $R_P, R_{P'}$ — радиус-векторы центра тяжести S точечных планов ориентиров в системах координат планов P и P' ; $M(\Theta)$ — матрица направляющих косинусов, определяемая поворотом плана P' относительно плана P . В нашем случае масштаб точечного плана ориентиров постоянен, так как ориентиры жесткие, поэтому $\mu = 1$.

Принципиальное отличие рассматриваемой постановки задачи от традиционной заключается в том, что число точек на исходных точечных планах P и P' неодинаковое, так как кроме ориентиров на изображениях имеются помехи [7].

На рис. 4 показана схема решения задачи получения информации об ориентирах по результатам согласования точечных планов. Математически задача сводится к нахождению предела последовательности проекций на выпуклые множества, которое представлено пересечением двух точечных множеств разной мощности. При использовании человеко-машинной стереоСТЗ задача практически сводится к классической задаче распознавания по эталону.

Представление ориентиров точечными планами существенно увеличивает быстродействие и надежность алгоритмов согласования. Дополнительное ускорение получается с использованием "окраски"

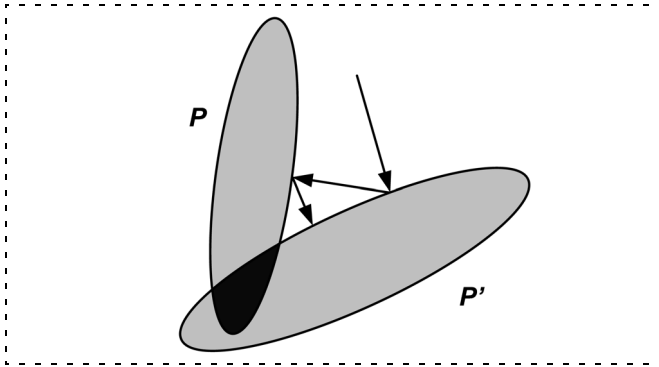


Рис. 4. Предел последовательности проекций на выпуклые множества

каждого элемента точечного плана параметром ($\Pi = \pm 1$), который представляет собой знак градиента интенсивности на вертикальных ориентирах.

В целях повышения надежности решения задачи вводятся дополнительные признаки-инварианты, построенные на точках из множеств M_P и $M_{P'}$, не изменяющие свою конфигурацию при переходе из плана P в план P' . В качестве таковых могут рассматриваться линейчатые признаки — одноименные отрезки прямых, соединяющие одинаково окрашенные точки на планах ориентиров, и (или) образованные ими морфологические признаки — геометрические фигуры (треугольники).

Быстрый алгоритм согласования точечных планов основан на последовательном переборе линейчатых инвариантов — отрезков прямых, соединяющих пары точек на планах. Алгоритм включает следующие шаги.

1. Сначала из всех возможных отрезков на планах P и P' оставляются пары отрезков с одинаковой "окраской" концов Π , удовлетворяющие условию $|d_P - d_{P'}| < 0,01d_P$, где $d_P, d_{P'}$ — длины отрезков. Такие отрезки имеются в силу неизменности геометрической конфигурации ориентиров.

2. Определяется угол рассогласования отрезков $\Delta\Psi_i$ для каждой пары, а в качестве функционала вычисляется его среднее значение на n -м шаге процедуры согласования:

$$\Delta\Psi_n = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \Delta\Psi_i \quad (4)$$

где M — число оставшихся инвариантов на планах P и P' .

3. Исключаются наименее "похожие" отрезки по длине и углу наклона, сравнивается значение функционала с его величиной на предыдущем шаге и повторяется шаг 2.

4. Согласование точечных планов продолжается до получения минимального значения функционала или когда $M_P = M_{P'} = 2$; при этом вычисляются центр тяжести C общей части точечных планов P и P' , а затем их относительный угол поворота $\Theta = \Delta\Psi_n$.

По результатам согласования точечных планов определяются проекции вектора относительного смещения в соответствии с преобразованием (3):

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_P + (y_P \sin \Theta - x_P \cos \Theta), \\ \Delta y &= y_P + (y_P \cos \Theta + x_P \sin \Theta), \end{aligned} \quad (5)$$

где (x_P, y_P) и $(x_{P'}, y_{P'})$ — координаты точки C на точечных планах P и P' .

Алгоритм обладает большой производительностью, затраты машинного времени составляют сотые доли секунды на ПЭВМ серии Pentium.

Экспериментальные исследования метода навигации при попятном движении робота по запомненной траектории

Проведены испытания человеко-машинной стереоСТЗ на основе поворотного стереоблока из двух твердотельных камер на дистанционно управляемом роботе "Система", разработанном в ГосИФТП [8]. Получаемые координаты точек и расстояния между ними служат подсказкой для уточнения относительного расположения ориентиров, а точечные планы практически свободны от помех.

Эффективность методов навигации проверяли с использованием перемещаемой экспериментальной установки с четырехкамерной стереоСТЗ, разработанной в ГосИФТП под руководством И. В. Шаманова [9]. Аппаратные средства включали персональный компьютер на борту робота, а пройденный путь измеряли по оборотам ведущего колеса. Поворот установки на месте осуществлялся вращением левых и правых колес в противоположные стороны. Программное обеспечение включает комплекс программ автоматического анализа стерео-

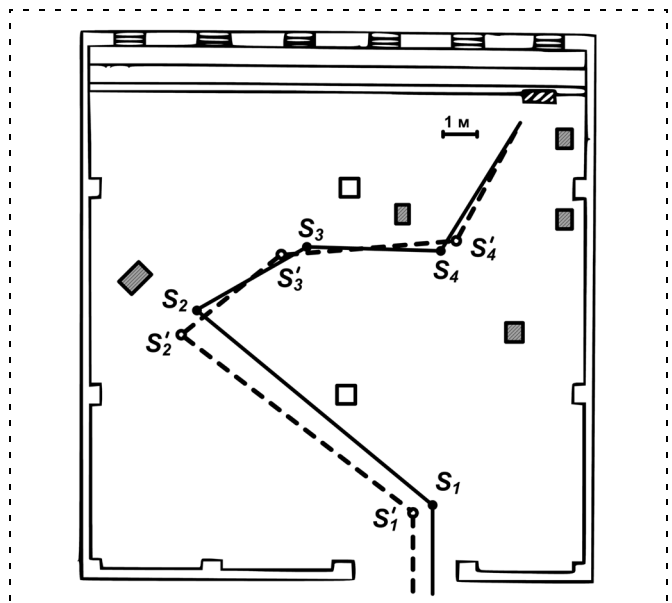


Рис. 5. План помещения и типовая траектория возвращения робота (--- --)

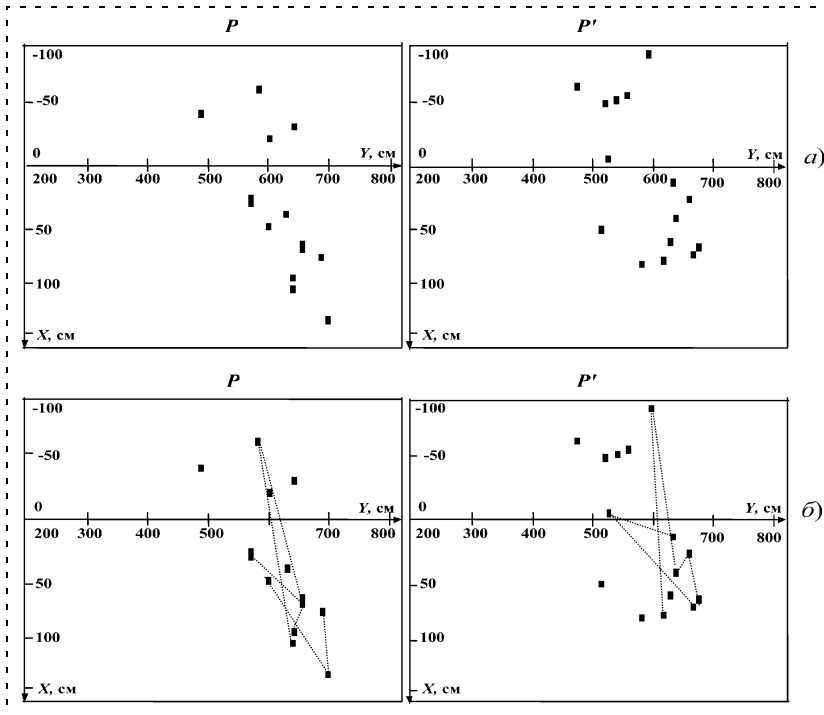


Рис. 6. Согласование точечных планов: исходные планы, полученные при прямом телеуправляемом движении (P) и при попятном движении (P') (а); первая итерация согласования точечных планов P и P' (б)

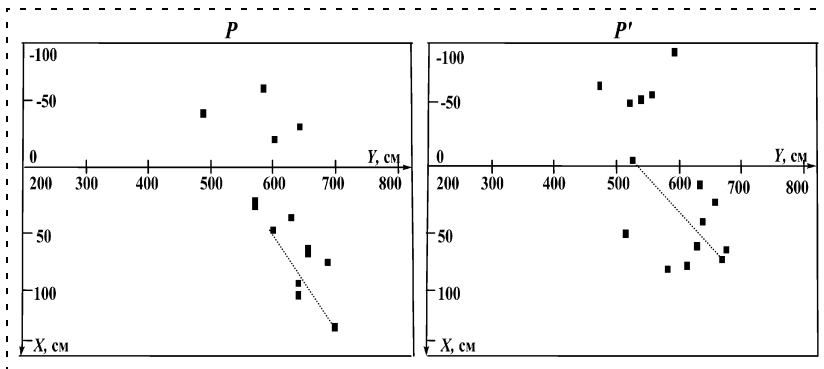


Рис. 7. Согласование точечных планов ориентиров P и P' : последняя итерация

изображений, формирования и согласования точечных планов, вычисления параметров управления ($\hat{r}_k$, $\hat{\phi}_k$) в окрестности k -й опорной точки (см. рис. 2).

Вариант траектории движения робота в помещении и реализованная траектория попятного движения в точку S_1 показаны на рис. 5. В качестве примера на рис. 6, а приведены точечные планы P и P' , полученные в точках S_4 и S'_4 с параметрами смещения $r_x = -40$ см, $r_y = 52$ см и повернутых на угол $\Theta = -8,25^\circ$. Результат первой итерации ($r_x = -62$ см, $r_y = 29$ см, $\Theta = -0,67^\circ$) согласования планов по линейчатым морфологическим признакам показан на рис. 6, б, где пунктирной линией обозначены найденные инварианты. На последней (пятой) итера-

ции (рис. 7) осталось по две точки на планах P и P' , результат согласования этих планов $r_x = -42$ см, $r_y = 47$ см, $\Theta = -7,98^\circ$. Параметры наведения вычисляли по (1) и (2) и составили $\Delta\hat{\phi}_4 = 8,9^\circ$, $\hat{l}_4 = \hat{l}_4 - l_4 = 62,8$ см.

Заключение

Разработанные методы компактного описания ориентиров точечными планами требуют малого объема памяти для их запоминания и позволяют осуществлять навигацию в реальном масштабе времени. Использование человеко-машинной стереОСТЗ на этапе прямого движения робота дает возможность оператору выбирать измеряемые точки на ориентирах, по которым получают точечные планы, свободные от помех. Тем самым повышается точность определения навигационных параметров.

Список литературы

1. Петухов С. В. Методы навигации, система запоминания данных и структура управления для автоматического возвращения транспортных роботов по информации от стереосистемы технического зрения // Искусственный интеллект в технических системах. Вып. № 24. М.: ГосИФТП, 2004. С. 36–62.
2. Носков В. П., Носков А. В. Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям // Мехатроника. 2005. № 12. С. 16–24.
3. Петухов С. В., Васильев В. Ф., Иванюгин В. М. Способ автоматизированного измерения координат точек внешней среды и построения ее трехмерной модели в стереотелевизионной системе технического зрения. Патент № 2065133, по заявке № 93033305 от 28.06.93, выдан 10.08.1996, 12 с.
4. Петухов С. В., Иванюгин В. М., Илюхин А. С. Развитие бинокулярных и тринокулярных стереосистем технического зрения // Искусственный интеллект в технических системах. М.: ГосИФТП, 2004. С. 3–35.
5. Петухов С. В. Представление ориентиров на основе проекционного преобразования // Тр. Института системного анализа РАН. 2008, № 4 (в печати).
6. Петухов А. С., Рачков М. Ю., Петухов С. В. Применение алгоритмов постобработки сжатых изображений при дистанционном управлении мобильными роботами // Мехатроника. 2007. № 1. С. 54 (Приложение к журналу. С. 17–24).
7. Петухов С. В. Совмещение точечных планов ориентиров на основе поиска инвариантов // Обработка динамической информации в интеллектуальных системах технического зрения. М.: ГосИФТП, 1992. С. 33–44.
8. Вечканов В. В. и др. Многофункциональная мобильная робототехническая система для атомных АЭС // Роботы и манипуляторы в экстремальных условиях. Матер. науч.-техн. конф. 21–24 мая 1996, С.-Петербург, 1996. С. 39–44.
9. Шамапов И. В. Определение пространственных координат наблюдаемых объектов по последовательности их изображений, полученных при параллельной съемке // Искусственный интеллект в технических системах. М.: ГосИФТП, 1997. С. 39–55.

УДК 59.01.85

А. А. Лазичев, канд. техн. наук, доц.,
Ю. А. Самулеева, студентка,
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Система автоматизированной настройки манометров с помощью нанесения шкал

Изложены основные идеи для разработки автоматизированной системы настройки манометрических приборов. Представлена структура системы, варианты ее создания и теоретическая эффективность внедрения.

Ключевые слова: оптимизация, манометр, шкала, рисование.

Постановка задачи

Для увеличения конкурентоспособности манометрической продукции в условиях современного рынка требуется одновременно решать сразу две задачи: повышать качество манометров и снижать их себестоимость. Достигнуть таких результатов можно за счет внедрения средств автоматизации, ускоряющих выпуск продукции и снижающих участие человека в производственном процессе.

Созданная в ОАО "Манотомь" линия безрегулировочной сборки [1] манометров типа МП2-УУ2 (манометры класса точности 2,5 с максимальным давлением от $1 \cdot 10^5$ Па до $4 \cdot 10^7$ Па, рис. 1) не по-



Рис. 1. Манометр МП2-УУ2

зволяет в полной мере решить задачу выпуска продукции, исключая участие человека из процесса настройки манометров. Это обусловлено влиянием различных факторов, к числу которых можно отнести: несовершенство применяемых в производстве материалов, частичный износ оборудования, человеческий фактор и др. В результате внедрения линии безрегулировочной сборки манометров доля приборов, не нуждающихся в дальнейшей регулировке, составила 40 %. Такой показатель говорит о достаточно низкой эффективности внедрения средств автоматизации, так как созданное оборудование не позволило в конечном итоге полностью отказаться от ручной настройки манометров.

Результаты исследований производства манометров на линии безрегулировочной сборки показали, что из двух регулируемых параметров манометра (диапазона и линейности [2, 3]) необходимо дорегулировать только диапазон, т. е. максимальный угол поворота стрелки. Другими словами, нужно перейти от настройки каждого конкретного манометра под стандартную ("штампованную") шкалу к созданию шкалы для каждого манометра, учитывающей присущие этому манометру параметры (в данном случае диапазон поворота стрелки). Данное решение было предложено в работе [4], однако на сегодняшний день оно не реализовано на практике.

С помощью наблюдений было установлено, что максимальные отклонения манометров от "стандартной" шкалы после линии безрегулировочной сборки составляют $\pm 1,5$ деления, а в среднем не превышают одного деления. На основе этого можно утверждать, что изменения шкалы, учитывающие особенности каждого манометра, не приведут к значительному изменению изображения циферблата. Максимальное отклонение в 1,5 деления приведет к "сжатию" (или "растяжению") шкалы на $\pm 12,27^\circ$, что составляет приблизительно $\pm 4,5$ % от всего диапазона. В большинстве же случаев (около 90 % от всех манометров, нуждающихся в дорегулировке) изменение шкалы не превысит $\pm 8,18^\circ$, или ± 3 % (одно деление). Если учесть, что шкала будет "сжиматься"/"растягиваться" пропорционально с двух сторон (соответствующих нулю и отметке максимального давления, на рис. 1 это значение 16), то изменение положений делений от стандартной шкалы составит, в худшем случае, $\pm 2,25$ % ($\pm 6^\circ$), что будет практически неразличимо для глаза.

Структура автоматизированной системы

Работу автоматизированной системы настройки манометров с помощью нанесения шкал можно представить следующим образом. Тестируемые манометры устанавливаются в специальные держатели для подачи давления. Напротив каждого тестируемого манометра устанавливается видеокамера, связанная через устройство ввода видеоданных с персональным компьютером. Камеры передают изображения положения стрелки в заданные моменты времени. Видеопоток в компьютер передается непрерывно с некоторой частотой кадров, однако для анализа нужны не все кадры, а только отвечающие определенным моментам времени, т. е. соответствующие некоторым определенным значениям давления.

Подачу давления можно осуществлять разными способами, например, с помощью датчика давления [5]. Однако наиболее простым решением в условиях манометрического производства является адаптация существующего оборудования ОАО "Манотомь" для решения поставленной задачи. Для успешной реализации автоматизированной системы настройки манометров достаточно обеспечить относительно равномерное нарастание давления с определенной скоростью, которая, в свою очередь, зависит от таких факторов, как число кадров в секунду для видеопотока каждой камеры, класс точности манометра и т. п. Тогда в качестве чувствительного элемента можно использовать один из существующих датчиков давления, а программное обеспечение должно отслеживать нарастание давления, снимаемое с датчика, и в нужные мо-

менты выбирать видеоданные с камер для их дальнейшей обработки.

Вычислительные алгоритмы, предназначенные для предварительной (подготовительной) обработки видеоданных и далее для определения угла поворота стрелки, формируют массивы данных, по которым сначала в памяти компьютера формируется образ манометрической шкалы, а затем он с помощью принтера выводится на металл.

Таким образом, в автоматизированной системе настройки манометров с помощью нанесения шкал выделяются четыре подсистемы.

1. Сигнализирующая подсистема подачи давления.
2. Подсистема ввода видеоданных.
3. Подсистема преобразования и определения положения стрелки тестируемых манометров.
4. Подсистема нанесения шкал.

Взаимодействие указанных подсистем показано на рис. 2.

Сигнализирующая подсистема управляет задвижками клапанов подачи 2 и сброса давления 1, обеспечивая необходимые параметры нарастания (убывания) давления в системе 3. С помощью датчика давления 4 сигнализирующая подсистема следит за текущим давлением и выдает сигналы подсистеме ввода видеоданных в те моменты, когда нужно получить изображения тестируемых манометров для их дальнейшего анализа с целью определить положение стрелки.

Алгоритмы преобразования и определения положения стрелки тестируемых манометров определяют положения стрелки для заданного числа характеристических точек манометров. Измерение происходит как для прямого хода стрелки (в процессе



подачи давления), так и для обратного (в процессе сброса давления) для дальнейшего расчета средних значений показаний каждой из характеристических точек. Такая процедура необходима в силу наличия у чувствительного элемента манометра гистерезиса.

Полученные средние значения угла поворота стрелки (читай — ее положения) передаются в подсистему нанесения шкал, которая формирует вначале образ шкалы в памяти компьютера, а затем выводит этот образ с помощью специального принтера.

Рассмотрим более подробно работу названных подсистем.

Сигнализирующая подсистема подачи давления

Сигнализирующая подсистема подачи давления для автоматизации сборки и настройки манометров предназначена для непрерывного контроля, подаваемого на тестируемые манометры давления. Исходную подсистему можно разделить на две части:

- 1) непосредственно подсистему подачи/сброса давления;
- 2) подсистему контроля текущего давления и сигнализации.

Подсистема подачи/сброса давления состоит из двух насосов, трубопровода и двух клапанов, один из которых работает на подачу, а другой — на сброс давления.

Подсистема сбора и обработки информации контролирует давление, подаваемое непосредственно на манометры через воздействие на вентили сброса и подачи. Принцип функционирования этой подсистемы заключается в следующем: датчик фиксирует текущее значение давления в системе и передает его значение через устройство сопряжения в ПК. При достижении заданного значения программа подает управляющий сигнал.

Подсистема ввода видеоданных

Одним из способов определения особенностей поведения манометра при различных значениях давления (в рамках диапазона измерения данной модели манометра и максимально возможного давления) является визуальное наблюдение за показаниями поверяемых приборов с последующим обозначением характеристических точек. В качестве *характеристических точек* выступают значения давления, соответствующие отметкам шкалы для данно-

го типа манометров. Число характеристических точек определяется в соответствии с таблицей.

Подсистема ввода видеоданных представлена набором из четырех видеокамер, снимающих показания поверяемых манометров, а именно положение стрелки в заданные моменты времени. Сигнальная информация о том, когда следует сохранять видеокادر, поступает от сигнализирующей подсистемы подачи давления. Наличие четырех каналов ввода видеоданных обусловлено широким выбором на рынке именно таких устройств различных производителей. Увеличение числа каналов (одновременно поверяемых манометров) достигается за счет использования нескольких карт ввода видеопотока, откуда появляется условие кратности четырем.

В основной массе систем ввода видеоданных реализована возможность последовательного считывания кадров с камер, т. е. с каждой камеры кадры передаются со скоростью 6 кадров в секунду (суммарно 24 кадра в секунду). Те же из них, у которых скорость кадров сохраняется на уровне 25 (PAL) или 30 (NTSC) кадров в секунду, имеют достаточно высокую стоимость (от \$1000). Для того чтобы определить необходимые требования к частоте кадров, следует отталкиваться от класса точности прибора.

Алгоритмы преобразования и определения положения стрелки тестируемых манометров

Один из самых простых способов определения положения стрелки в кадре видеоданных можно описать следующими тремя шагами:

- 1) выделить область с максимально вероятным размещением стрелки (в данном случае это можно сделать наложением маски, так как мы заранее знаем, где будет размещаться циферблат тестируемого манометра);
- 2) задать параметры контрастности и яркости таким образом, чтобы устранить возможные световые помехи; преобразовать изображение к двухцветному (полагая, что белым цветом изображен фон и черным — стрелка);
- 3) выделить в двумерном пространстве множество точек, принадлежащих изображению стрелки, и с помощью методов линейной интерполяции найти уравнение прямой, проходящей через центр симметрии стрелки.

Все три шага не представляют сложности в алгоритмической реализации и имеют достаточно большое распространение. Однако следует отметить, что используемые параметры контрастности и яркости (вернее, их изменения от исходных на кадрах видеoinформации) должны подбираться опытным путем в зависимости от положения, типа и яркости инфракрасного освещения.

Зависимость числа проверяемых точек манометров от класса точности проверяемого прибора

Класс точности манометра	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4
Число точек	≥10	≥8	≥5	≥5	≥5	≥3

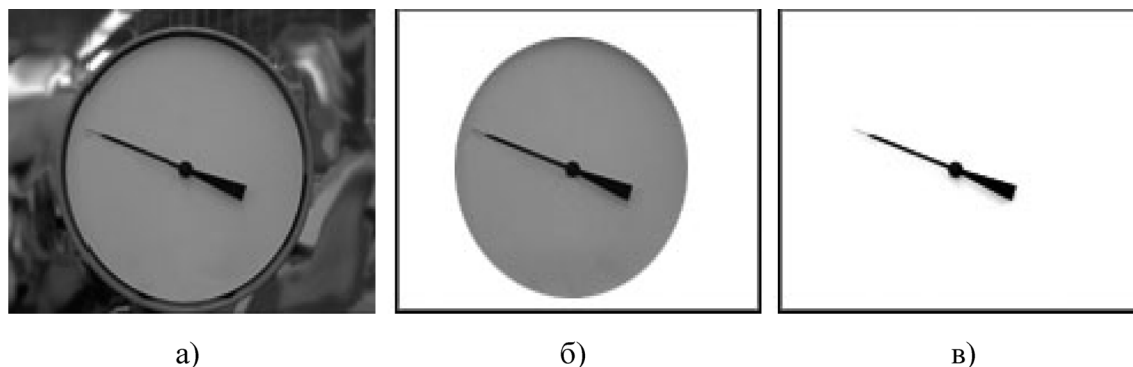


Рис. 3. Изменение изображения с помощью алгоритмов:

a — исходное изображение; *б* — выделение области размещения стрелки; *в* — изменение параметров контрастности и яркости; преобразование в двухцветное изображение

Один из вариантов преобразований входного видеоизображения представлен на рис. 3 (рамкой выделены границы изображения).

После определения углов поворота стрелки тестируемых манометров для прямого (нарастание давления) и обратного (сброс давления) ходов нужно рассчитать средние значения соответствующих показаний (значений угла поворота стрелки) для получения массива выходных данных. Выполнение данной процедуры обусловлено наличием гистерезиса чувствительного элемента манометра — пружины Бурдона.

Подсистема нанесения шкал

Алгоритмы преобразования и определения положения стрелки тестируемых манометров передают в подсистему нанесения шкал массив данных для каждого манометра, включающий углы поворота стрелки (ее положения), соответствующие характеристическим точкам. По этим данным программное обеспечение подсистемы нанесения шкал рисует образ циферблата в памяти ПК и подготавливает его для вывода на печать. На циферблат наносится как шкала, так и дополнительная информация: марка прибора, класс точности прибора и т. д. в соответствии с конструкторской документацией.

Затем выполняется вывод на печать средствами операционной системы, что делает процедуру печати достаточно простой. Для реализации данной подсистемы, однако, следует предусмотреть способы точного позиционирования головки при выводе данных на принтер. В противном случае вся работа теряет смысл, так как значительные погрешности при печати сведут к нулю все предыдущие старания соблюсти заданный класс точности и, как

следствие, эффективность использования автоматизации.

Отдельная тема исследования — выбор принтера, так как его особенности напрямую влияют на эффективность всей системы.

Заключение

Представлены результаты подготовительного этапа разработки системы автоматизированной настройки манометров с помощью нанесения шкал, в ходе выполнения которого была доказана возможность ее практического создания.

Реализация рассмотренного проекта позволит исключить ряд этапов технологического процесса манометрического производства (окрашивание циферблата, разработку шаблонов шкал, операции нанесения шкал, ручную настройку манометров и ряд более мелких операций), что, по предварительным расчетам, позволит снизить себестоимость манометров на 15...20 %.

Список литературы

1. Кузнецов А. А. Автоматизированный измерительно-технологический комплекс для автоматизированной настройки манометров: Дис. канд. техн. наук: 05.13.06 / Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники. Томск, 2004. 149 с.
2. Гонек Н. Ф. Манометры. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. 176 с.
3. Манометры, вакуумметры и мановакуумметры. Инструкция по регулировке 5Ш0.283.113Д, Томск, 2002. 24 с.
4. Гольдшмидт М. Г., Шамина О. Б., Свинолунов Ю. Г., Скворцов В. Ф., Шварц А. Е., Войтко В. П., Бригадин А. Г., Крауиньш Д. П., Панов А. В. Разработка и внедрение технологии автоматизированной сборки манометров: Отчет о НИР. Томск, 1986. 151 с.
5. Бригадин А. Г. Автоматизация регулировки манометров: Дис. канд. техн. наук: 05.13.07 / Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники. Томск, 1998. 151 с.

УДК 681.3:621.391.26

А. В. Седов*, **, д-р техн. наук, проф.,

Е. В. Тришечкин**,

* Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону,

** Южно-Российский государственный
технический университет

(Новочеркасский политехнический институт)

Формула для вычисления спектра дискретного сигнала при варьировании частоты следования отсчетов в системах контроля и управления

Рассматривается задача вычисления комплексного спектра дискретного сигнала при изменении частоты дискретизации сигнала. В отличие от известной формулы, используемой для этих целей, предлагаемая не содержит бесконечных сумм, не требует аналитического выражения для спектра непрерывного сигнала и проще реализуется в современных системах цифровой обработки. Области применения — цифровые мехатронные системы с вычислением спектров измеряемых сигналов, системы технической диагностики, мониторинга, распознавания, связи, системы с адаптивным выбором частоты дискретизации измеряемых сигналов и др.

Ключевые слова: цифровые системы, спектр сигнала, частота дискретизации, эффект наложения спектров, формула связи спектров.

Постановка задачи

При решении задач контроля и управления в технических системах, в частности мехатронных системах, нередко требуется цифровая обработка сигналов, связанная с вычислением спектра сигнала при варьировании частоты следования отсчетов измеряемых сигналов.

Общеизвестна и теоретически доказана взаимосвязь [1—3] комплексного спектра $X_H(j\omega)$ непрерыв-

ного бесконечного сигнала $x(t)$ и спектра $X(e^{j\omega T})$ дискретного сигнала $x[kT]$, полученного из данного непрерывного путем периодической дискретизации с интервалом T . Эта взаимосвязь определяется формулой

$$X(e^{j\omega T}) = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{\infty} X_H(j(\omega + \omega_S m)), m \in Z, \quad (1)$$

где $X_H(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$ — преобразование Фурье

бесконечного непрерывного сигнала $x(t)$; $x(e^{j\omega T}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[kT]e^{-j\omega kT}$ — преобразование Фурье дискретного сигнала $x[kT] = x(t)|_{t=kT}$, $k \in Z$; $\omega_S = 2\pi/T$ — частота дискретизации сигнала.

В соответствии с формулой (1) спектр $X(e^{j\omega T})$ дискретного сигнала с точностью до постоянного множителя $1/T$ равен бесконечной сумме составляющих, совпадающих со спектром $X_H(j\omega)$ исходного непрерывного сигнала, но смещенных друг относительно друга на все возможные значения частоты $\omega_S m$, кратные частоте дискретизации ω_S , где $m \in Z$ (рис. 1). При этом возможно возникновение эффекта "наложения" спектров или "наложения" указанных составляющих в частотной области (см. рис. 1), что приводит к возникновению разницы между спектром $X(e^{j\omega T})$ дискретного сигнала и спектром $X_H(j\omega)$ аналогового сигнала, из которого он получен в основном диапазоне частот сигнала $[0, \omega_S/2)$. Именно данный случай очень важен, так как характеризует искажение сигнала в результате его дискретизации.

Формула (1) имеет огромное теоретическое значение, однако на практике ее прямое применение часто затруднено ввиду следующих обстоятельств:

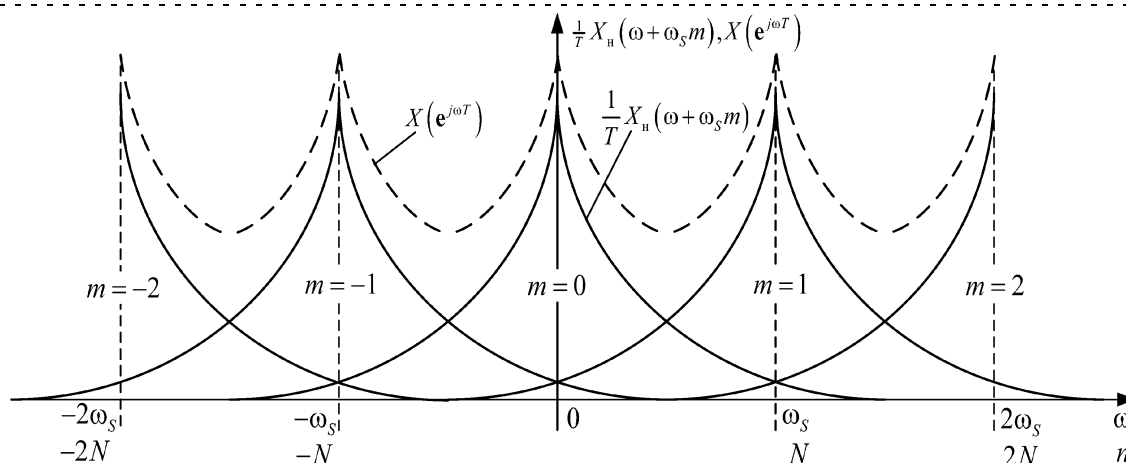


Рис. 1. Графическая иллюстрация к формуле (1)

- измеряемый непрерывный сигнал $x(t)$ в системах контроля и управления, как правило, из-за сложности не имеет четкого аналитического описания, а следовательно, прямое определение спектра $X_H(j\omega)$ путем вычисления интеграла преобразования Фурье практически невозможно; в то же время формула (1) предполагает именно аналитическое описание спектра $X_H(j\omega)$;
- бесконечное число слагаемых в правой части (1) в общем случае делает эту сумму невычислимой;
- бесконечная сумма в формуле (1) при вычислении спектра — излишняя и без потери точности может быть заменена на сумму с конечным числом слагаемых, так как на практике имеют дело с сигналами $x(t)$ с ограниченным спектром $x(t) \in \mathbf{B}$, $\mathbf{B} = \left\{ x; \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt = 0 \text{ для всех } |\omega| > \omega_h \right\}$, за-

данных конечным числом отсчетов. Кроме того, имеет смысл анализ спектра $X(e^{j\omega T})$ только на конечном интервале частот $[0, \omega_S/2)$.

В качестве спектра $X_H(j\omega)$ непрерывного сигнала на практике в цифровых системах удобнее получать и использовать спектр дискретного сигнала $x[kT] = x(t)|_{t=kT}$, измеренного с заведомо малым интервалом дискретизации T , выбранным в соответствии с условием теоремы Котельникова $T < \pi/\omega_h$. Данный квазинепрерывный спектр несложно получить и можно использовать в качестве адекватного заменителя спектра $X(e^{j\omega T})$, например, в формуле (1).

Таким образом, можно подытожить, что актуальна задача получения формулы для вычисления спектров дискретного сигнала в случае изменения частоты следования отсчетов, подобная формуле (1), но лишенная ее недостатков, удобная и адекватная в смысле практического использования.

Формула вычисления спектра дискретного сигнала

Рассмотрим случай конечного во времени сигнала $x_p(t)$, заданного на интервале наблюдения $t \in [0, T_S)$, равном периоду бесконечного сигнала $x(t)$, $-\infty < t < \infty$, с конечной энергией и со спектром

$$X_H(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt, \text{ ограниченным частотой } \omega_h, \text{ т. е. } \text{supp } X_H(j\omega) \subseteq [-\omega_h, \omega_h].$$

На интервале наблюдения $t \in [0, T_S)$ сигнал $x_p(t)$ зададим N равноотстоящими отсчетами $x_p[kT]$, $k = \overline{0, N-1}$, при этом считая $T = T_S/N$ (рис. 2). Таким образом, определим дискретный сигнал $x_p[kT]$, $k = \overline{0, N-1}$, по исходному непрерывному сигналу $x_p(t)$.

Комплексный спектр дискретного сигнала $x_p[kT]$, $k = \overline{0, N-1}$, может быть вычислен с использованием следующей формулы дискретного преобразования Фурье (ДПФ):

$$X(e^{j\omega_n T}) = X(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_p[kT] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, n = \overline{0, N-1}. \quad (2)$$

Изначально предположим, что частота дискретизации сигнала $\omega_S = 2\pi/T$ выбрана достаточно высокой, такой что выполняется условие теоремы Котельникова $T < \pi/\omega_h$. Выбранное при этом число отсчетов N на интервале наблюдения $t \in [0, T_S)$ обозначим $N_{\max}$. Комплексный спектр $X_{\max}(n)$, $n = \overline{0, N_{\max}-1}$,

дискретного сигнала $x_p[kT]$, $k = \overline{0, N_{\max}-1}$, полученный по формуле (2), при этом будет полностью характеризовать спектр $X_H(j\omega)$ непрерывного сигнала $x_p(t)$. Таким образом, дискретный комплексный спектр $X_{\max}(n)$, $n = \overline{0, N_{\max}-1}$, можно рассматривать как квазинепрерывный и использовать в выводимой формуле вместо спектра $X_H(j\omega)$.

Абсолютное значение $|X_{\max}(n)|$ полученного комплексного спектра $X_{\max}(n)$, $n = \overline{0, N_{\max}-1}$, при этом может быть представлено в виде, показанном на рис. 3.

Выделяются две симметричные составляющие А и В спектра $|X_{\max}(n)|$ с номерами отсчетов n от 1 до $(N_{\max}/2 - 1)$ и от $(N_{\max}/2 + 1)$ до $(N_{\max} - 1)$. Обе симметричные составляющие амплитудного спектра $|X_{\max}(n)|$ представляют собой симметричные половины дискретных копий спектра $X_H(j\omega)$ исход-

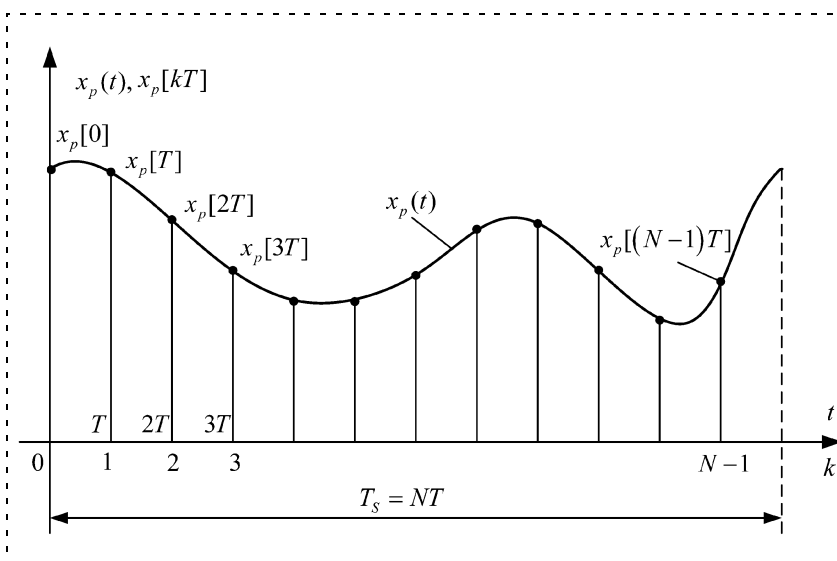


Рис. 2. Исходные непрерывный $x_p(t)$ и дискретный $x_p[kT]$ сигналы

ного непрерывного сигнала $x_p(t)$. Расстояние по частоте между максимумами соседних симметричных составляющих (копий) спектра равно частоте дискретизации ω_S , интервал между отсчетами равен $\Delta\omega = 2\pi/T_C$.

Если уменьшить число отсчетов N (сделать их число меньше, чем $N_{\max}$) на интервале наблюдения сигнала $t \in [0, T_S)$ так, чтобы условие теоремы Котельникова $T < \pi/\omega_h$ перестало выполняться, то указанные симметричные составляющие спектра $X_{\max}(n)$ будут "наползать" друг на друга (эффект "наложения спектров", или "aliasing") [2, 3] подобно изображенному на рис. 1. Именно это обстоятельство "наползания" составляющих при изменении частоты следования отсчетов и необходимо учесть в выводимой формуле.

Подытожим следующее: выводимая формула должна обеспечивать вычисление комплексного спектра $X(n)$, $n = 0, N-1$, при измененном числе отсчетов сигнала $N < N_{\max}$ с учетом эффекта "наползания" спектров и использования в качестве заданного спектр $X_{\max}(n)$. При этом должно автоматически определяться требуемое число копий спектра $X_{\max}(n)$ и требуемые номера гармоник этих копий спектра, участвующих в суммировании при вычислении каждого n -го отсчета спектра $X(n)$.

Введем следующие обозначения: $m = -Q_1$ — номер последней копии спектра $X_{\max}(n)$, участвующей в суммировании, слева от оси ординат; $m = Q_2$ — то же, справа от оси ординат. Копию спектра $X_{\max}(n)$, расположенную симметрично относительно нулевой частоты, пронумеруем как нулевую ($m = 0$). На рис. 4 приведена схема расчета отсчета спектра $X(n)$ с номером n по заданным копиям спектра $X_{\max}(n)$ для случая $N_{\max} = 4N$ (на рис. 4 показаны огибающие копий спектров). На интервале $0 \dots (N_{\max} - 1)$ жирной линией выделен заданный спектр $X_{\max}(n)$.

Как видно из рис. 4, значение отсчета спектра $X(n)$ определяется как сумма четырех комплексных значений различных копий спектра $X_{\max}(n)$, $n = 0, N_{\max} - 1$, при $m \in \{-1, 0, 1, 2\}$. Через отсчеты спектра $X_{\max}(n)$, выделенного жирной линией, отсчет $X(n)$ может быть определен следующим образом:

$$X(n) = X_{\max}(n) + X_{\max}(n + N) + X_{\max}(n - N + N_{\max}) + X_{\max}(n - 2N + N_{\max}). \quad (3)$$

Несложно заметить, что в случае вычисления n -й гармоники спектра $X(n)$ дискретного сигнала при

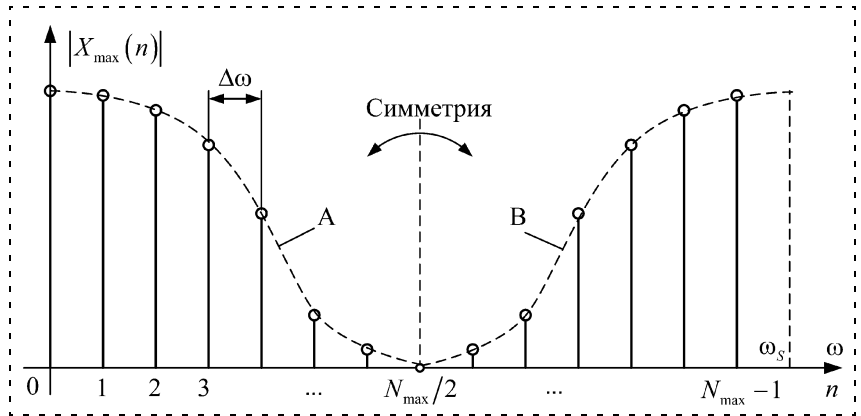


Рис. 3. Абсолютное значение $|X_{\max}(n)|$ комплексного спектра $X_{\max}(n)$

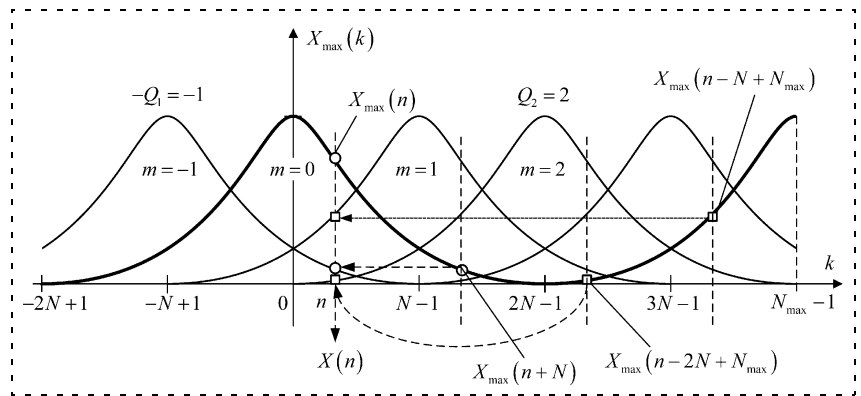


Рис. 4. Схема расчета отсчета спектра $X(n)$ по копиям спектра $X_{\max}(n)$

заданных значениях $N_{\max}$ и N справедлива следующая система неравенств:

$$\begin{cases} Q_1 N + n < \frac{N_{\max}}{2}; \\ Q_2 N - n < \frac{N_{\max}}{2}. \end{cases}$$

Первое неравенство в системе определяет условие участия последней слева копии спектра $X_{\max}(n)$ в расчете n -й гармоники спектра $X(n)$. Второе неравенство — условие участия последней справа копии спектра $X_{\max}(n)$ в расчете n -й гармоники спектра $X(n)$.

После приведения неравенств получим выражения для расчета значений Q_1 и Q_2 :

$$\begin{cases} Q_1 = \left\langle \frac{1}{N} \left(\frac{N_{\max}}{2} - n \right) \right\rangle \sigma \left(\frac{1}{N} \left(\frac{N_{\max}}{2} - n \right) \right); \\ Q_2 = \left\langle \frac{1}{N} \left(\frac{N_{\max}}{2} + n \right) \right\rangle. \end{cases} \quad (4)$$

Символом $\langle \dots \rangle$ обозначена операция взятия целой части числа, находящегося в скобках; $\sigma(i) = \begin{cases} 1, i \geq 0, \\ 0, i < 0 \end{cases}$ — функция Хевисайда.

Получив значения Q_1 и Q_2 , несложно в *общем виде*, подобно выражению (3), перечислить все номера отсчетов комплексного спектра $X_{\max}(n)$, используемые при вычислении n -й гармоники спектра $X(n)$ при заданных значениях $N_{\max}$ и N : $\{n, N+n, 2N+n, \dots, (Q_1-1)N+n, Q_1N+n\}$ — номера отсчетов, обусловленные копиями спектра $X_{\max}(n)$ слева от оси ординат; $\{N_{\max}-N+n, N_{\max}-2N+n, \dots, N_{\max}-Q_2N+n\}$ — номера отсчетов, обусловленные копиями спектра $X_{\max}(n)$ справа от оси ординат.

Окончательно выводимая формула, подобная формуле (1), предназначенная для вычисления спектра $X(n)$, $n = \overline{0, N-1}$, дискретного сигнала в случае изменения частоты следования отсчетов или числа отсчетов N сигнала на интервале наблюдения, при заданных $N_{\max}$ ($N < N_{\max}$) и спектре $X_{\max}(n)$, $n = \overline{0, N_{\max}-1}$, может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} X(n) \Big|_{n=\overline{0, N-1}}^{N_{\max}} &= \\ &= \sum_{m=-Q_1}^0 X_{\max}(n-mN) + \sum_{m=1}^{Q_2} X_{\max}(n-mN+N_{\max}) = \\ &= \sum_{m=-Q_1}^{Q_2} X_{\max}(n-mN+\sigma^*(m-1)N_{\max}), \quad (5) \end{aligned}$$

где $\sigma^*(i-1) = \begin{cases} 1, & i \geq 0, \\ 0, & i < 0 \end{cases}$ — смещенная функция Хевисайда.

Выражение (5) используется совместно с формулами (4). Оно полностью соответствует формуле (1), однако в отличие от нее не имеет бесконечных сумм, что позволяет для конкретного конечного дискретного сигнала быстро и точно определять спектр в случае варьирования интервала дискретизации отсчетов без повторного полного расчета комплексного спектра с использованием дискретного преобразования Фурье (2). Это важно, например, для систем с адаптивной дискретизацией сигнала.

Иллюстративный пример использования формулы

Рассмотрим использование формул (4) и (5) в вычислительном примере определения спектра дискретного сигнала при разных интервалах следования отсчетов для следующего контрольного непрерывного сигнала:

$$x_p(t) = 1 + \sum_{i=1}^7 \left| \frac{4}{\pi i} \sin\left(\frac{\pi i}{2}\right) \right| \cos\left(\frac{2\pi i}{T_S} t + \frac{\pi i}{12}\right), \quad (6)$$

заданного на интервале наблюдения $t \in [0, 1)$, ($T_S = 1$).

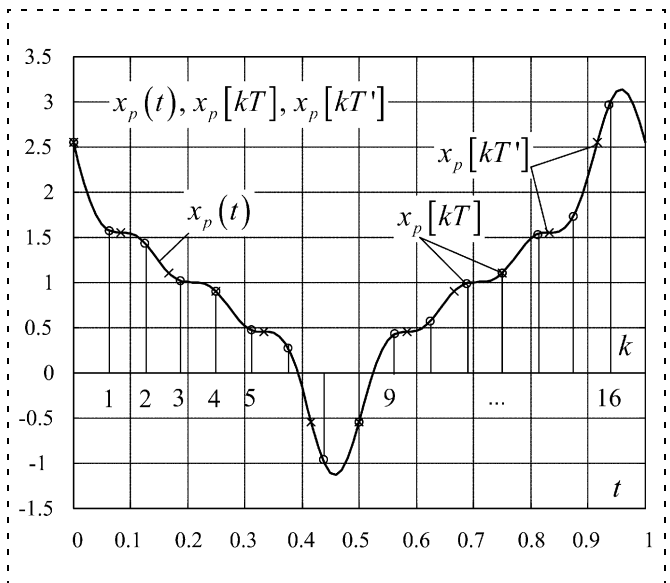


Рис. 5. Общий вид контрольного сигнала $x_p(t)$ и дискретных отсчетов $x_p[kT]$ (отмечены "о"), $x_p[kT']$ (отмечены "х")

Зададимся значением $N_{\max} = 16$. Несложно показать, что при этом выполняется условие теоремы Котельникова $T < \pi/\omega_h$ для отсчетов сигнала $x_p(t)$. Так как $\omega_h = 14\pi/T_S = 14\pi$, а $T = T_S/N_{\max} = 1/16$, то имеем: $1/16 < 1/14$.

На рис. 5 показан контрольный сигнал $x_p(t)$ на интервале наблюдения, а также дискретные отсчеты сигнала $x_p[kT]$, заданные с интервалами $T = 1/16$, и отсчеты сигнала $x_p[kT']$, заданные с интервалом $T' = 1/12$.

Комплексный спектр $X_{\max}(n)$, $n = \overline{0, N_{\max}-1}$, контрольного сигнала $x_p(t)$, рассчитанный с использованием отсчетов $x_p[kT]$ на основе дискретного преобразования Фурье (2), приведен в таблице.

По формулам (4) для величины $N = 12$ определяются значения Q_1 и Q_2 :

$$\begin{cases} Q_1^{(12)} = \left\langle \frac{1}{N} \left(\frac{N_{\max}}{2} - n \right) \right\rangle \sigma \left(\frac{1}{N} \left(\frac{N_{\max}}{2} - n \right) \right) = \\ = \left\langle \frac{1}{12} (8 - n) \right\rangle \sigma \left(\frac{1}{12} (8 - n) \right); \\ Q_2^{(12)} = \left\langle \frac{1}{N} \left(\frac{N_{\max}}{2} + n \right) \right\rangle = \left\langle \frac{1}{12} (8 + n) \right\rangle. \end{cases}$$

Для величины $N = 11$ эти значения примут вид

$$\begin{cases} Q_1^{(11)} = \left\langle \frac{1}{11} (8 - n) \right\rangle \sigma \left(\frac{1}{11} (8 - n) \right); \\ Q_2^{(11)} = \left\langle \frac{1}{11} (8 + n) \right\rangle. \end{cases}$$

Спектры дискретных сигналов, рассчитанные по формулам (5) и (2)

n	$X_{\max}(n)$	$X_{12}^{(5)}(n)$	$X_{12}^{(2)}(n)$	Q_1	Q_2	$X_{11}^{(5)}(n)$	$X_{11}^{(2)}(n)$	Q_1	Q_2
0	1	1	1	0	0	1	1	0	0
1	$0,615 + 0,165j$	$0,615 + 0,165j$	$0,615 + 0,165j$	0	0	$0,615 + 0,165j$	$0,615 + 0,165j$	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	$0,15 + 0,15j$	$0,15 + 0,15j$	$0,15 + 0,15j$	0	0	$0,15 + 0,15j$	$0,15 + 0,15j$	0	1
4	0	0	0	0	1	$-0,024 - 0,088j$	$-0,024 - 0,088j$	0	1
5	$0,033 + 0,123j$	$9,415 \cdot 10^{-3} + 0,035j$	$9,415 \cdot 10^{-3} + 0,035j$	0	1	$0,033 + 0,123j$	$0,033 + 0,123j$	0	1
6	0	0	0	0	1	$0,033 - 0,123j$	$0,033 - 0,123j$	0	1
7	$-0,024 + 0,088j$	$9,415 \cdot 10^{-3} - 0,035j$	$9,415 \cdot 10^{-3} - 0,035j$	0	1	$-0,024 + 0,088j$	$-0,024 + 0,088j$	0	1
8	0	0	0	0	1	$0,15 - 0,15j$	$0,15 - 0,15j$	0	1
9	$-0,024 - 0,088j$	$0,15 - 0,15j$	$0,15 - 0,15j$	0	1	0	0	0	1
10	0	0	0	0	1	$0,615 - 0,165j$	$0,615 - 0,165j$	0	1
11	$0,033 - 0,123j$	$0,615 - 0,165j$	$0,615 - 0,165j$	0	1	—	—	—	—
12	0	—	—	—	—	—	—	—	—
13	$0,15 - 0,15j$	—	—	—	—	—	—	—	—
14	0	—	—	—	—	—	—	—	—
15	$0,615 - 0,165j$	—	—	—	—	—	—	—	—

По значениям Q_1 и Q_2 несложно определить, сколько копий спектра $X_{\max}(n)$ используется при расчете данного отсчета спектра $X(n)$. Это число равно $Q_1 + Q_2 + 1$.

Поясним остальные обозначения, принятые в таблице. $X_{12}^{(5)}(n)$, $X_{11}^{(5)}(n)$ — столбцы комплексных спектров $X(n)$ дискретных сигналов, полученных при задании $N = 12$ и $N = 11$ отсчетов на интервале наблюдения, рассчитанные с использованием предложенной формулы (5); $X_{12}^{(2)}(n)$, $X_{11}^{(2)}(n)$ — то же, но рассчитанные с использованием формулы ДПФ (2).

Как видно из таблицы, имеет место совпадение значений столбцов $X_{12}^{(5)}(n)$ и $X_{12}^{(2)}(n)$, $X_{11}^{(5)}(n)$ и $X_{11}^{(2)}(n)$. Это подтверждает работоспособность предложенной формулы (4) при расчете спектра дискретного сигнала с измененным интервалом дискретизации отсчетов. Но в отличие от формулы (2) при расчете спектра дискретного сигнала с измененным интервалом следования отсчетов с использованием (4) не требуется выполнение достаточно сложных и длительных по времени операций комплексного умножения. Это резко (в 100 раз) увеличивает скорость расчета, что важно для различных высокопроизводительных цифровых систем реального времени.

Помимо рассмотренных примеров был проведен более сложный расчет для широкополосного (30 гармонических составляющих) контрольного сигнала вида

$$x_p(t) = 1 + \sum_{i=1}^{30} \left| \frac{4}{\pi i} \sin\left(\frac{\pi i}{2}\right) \right| \cos\left(\frac{2\pi i}{T_S} t + \frac{\pi}{12} i\right).$$

При выборе $N_{\max} = 65$ и $N = 12$ был проведен расчет по формуле (5) и подтверждена ее работоспособность. Значения Q_1 и Q_2 изменялись при этом в диапазоне 0...3.

Общие выводы

- Получена новая формула, представленная выражениями (4) и (5), позволяющая быстро и просто (не используя операций комплексного умножения, подобно ДПФ) вычислять спектр дискретного сигнала при варьировании частоты следования отсчетов и использующая при этом однократно вычисленный спектр дискретного сигнала при условии выполнении теоремы Котельникова.
- Полученная формула позволяет избежать трудностей, присущих известной формуле (1), связанных с вычислением бесконечных сумм, аналитическим определением спектра непрерывного сигнала, проведением излишних операций суммирования.
- Дискретное представление спектра как в левой, так и в правой частях формулы (5) позволяет ее эффективно реализовать в современных цифровых системах обработки сигналов, в частности, в системах с адаптивной дискретизацией сигналов.
- Эффективность предложенной формулы проиллюстрирована рядом вычислительных примеров.

Список литературы

1. Френкс Л. Теория сигналов. М.: Сов. Радио, 1974. 344 с.
2. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. 848 с.
3. Куприянов М. С., Матюшкин Б. Д. Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования. СПб.: Политехника, 1999. 592 с.

УДК 004.7

С. П. Саханский, канд. техн. наук, доц.,
Сибирский государственный аэрокосмический
университет имени академика М. Ф. Решетнева,
Красноярск

Измерение площади монокристалла в системе автоматического управления выращиванием германия

Предложена математическая модель измерения текущей площади монокристаллов германия на установке выращивания по способу Чохральского, позволяющая измерять и управлять текущей площадью монокристалла на основе широтной модуляции сигнала датчика уровня.

Ключевые слова: контактный метод, широтная модуляция сигнала датчика уровня, математическая модель сигнала управления.

В последнее время большое развитие в мире получил предложенный фирмой Royal Radar Establishment *весовой* метод измерения диаметра выращиваемого кристалла путем непосредственного взвешивания самого кристалла или тигля с расплавом при вытягивании кристаллов. Весовой метод контролирует изменяющийся вес (или площадь) кристалла, как и рассматриваемый в данной статье метод измерения площади кристалла. Однако на ФГУП "Германий" (г. Красноярск) пришлось отказаться от внедрения установок вытягивания кристаллов германия, основанных на весовом методе, в связи с возникшими техническими проблемами по точной механической передаче изменяющегося веса с расплавом, находящимся во вращающемся тигле, или веса выращиваемого кристалла.

Практическое применение при выращивании монокристаллов германия нашли системы автоматического управления выращиванием кристаллов, основанные на контактном методе измерения текущей площади. Приоритет данные системы имеют в связи с возможностью выращивания многих марок кристаллов германия в закрытой тепловой оснастке, обеспечивающей необходимые тепловые условия роста, что затрудняет применение широко распространенных оптических систем управления.

В основу контактного метода измерения и управления выращиванием монокристаллов [1–5] входит управление текущей площадью (или диаметром при круглой форме) растущего кристалла на основе вычисления сигнала управления Δu как функции отклонения текущей площади кристалла от заданной за период оценки сигнала управления $T_{\text{ц}}$ при условии поддержания уровня расплава в тигле с точностью 1...2 мкм. На рис. 1 представлена система управления выращиванием монокристаллов

германия на базе микроЭВМ. В камере осуществляется выращивание кристалла диаметром d . Кристалл вытягивается из расплава со скоростью вытягивания V_3 и вращения W_3 кристалла, при этом расплавленный металл, находящийся в тигле (с внутренним диаметром D), вращается с угловой скоростью W_T . В процессе убывания расплава в тигле происходит размыкание и замыкание контактного датчика уровня относительно плавающего на поверхности металла в тигле графитового экрана. Сигнал с контактного датчика подается через сглаживающую цепочку $C1$, $R1$, $R2$ и блок согласования в ЭВМ для принятия решения об управлении подъемом тигля вверх. Управление скоростями вытягивания кристалла V_3 , вращения кристалла W_3 , вращения тигля W_T осуществляется через соответствующие приводы, а управление температурой расплава — посредством датчика температуры боковой поверхности нагревателя и регулятора температуры по заданию T_3 ЭВМ.

Скорость убывания расплава в тигле V_p , а также скорость подъема тигля вверх V_{TM} после размыкания контактного датчика и замедленная скорость подъема тигля после замыкания контактного датчика V_{TM}/M определяются с учетом коэффициентов увеличения скорости ($C = 4$) и уменьшения скорости подъема тигля ($M = 4$).

Выражения, на которых основана работа установок выращивания германия, основанных на контактном методе, приведены ниже:

$$V_p = V_3 \frac{\rho_T}{\rho_{\text{ж}}} \left[\frac{d}{D} \right]^2; \quad (1)$$

$$V_{\text{TM}} = V_p \left[\frac{d_{\text{max}}}{d} \right]^2 = V_3 \frac{\rho_T}{\rho_{\text{ж}}} \left[\frac{d_{\text{max}}}{D} \right]^2; \quad (2)$$

$$d_{\text{max}} = d_3 \frac{1}{\sqrt{1 - 1/C}}; \quad (3)$$

$$\frac{V_{\text{TM}}}{M} = V_p \left[\frac{d_{\text{min}}}{d} \right]^2 = V_3 \frac{\rho_T}{\rho_{\text{ж}}} \left[\frac{d_{\text{min}}}{D} \right]^2; \quad (4)$$

$$d_{\text{min}} = d_{\text{max}} \frac{1}{\sqrt{M}}, \quad (5)$$

где V_p — скорость убывания расплава в тигле; V_3 — скорость вытягивания кристалла; d — текущий диаметр кристалла; D — внутренний диаметр тигля; ρ_T — удельная плотность твердого материала; $\rho_{\text{ж}}$ — удельная плотность жидкого материала; d_3 — заданный диаметр выращиваемого кристалла; d_{max} — максимальный допустимый диаметр выращиваемого кристалла, при котором датчик и экран сомкнутся после размыкания; d_{min} — минимальное допустимое

значение диаметра кристалла, при котором соблюдается условие отставания экрана от датчика после замкнутого состояния.

Для синхронизации скорости подъема тигля и скорости вытягивания кристалла используются следующие выражения:

$$X_{\text{изпр}} = P \frac{\left(1 - \frac{1}{C}\right) K_y}{B};$$

$$X_{\text{изрм}} = PM \frac{\left(1 - \frac{1}{C}\right) K_y}{B},$$

где $K_y = B \frac{\Delta_T \rho_{\text{ж}}}{\Delta_3 \rho_T} \left[\frac{D}{d_3} \right]^2$ — уставка

заданного диаметра; $X_{\text{изрр}}$ — число импульсов затравки, через которое выдается P импульсов перемещения тигля, при разомкнутом контактным датчике; $X_{\text{изрм}}$ — число импульсов затравки, через которое выдается P импульсов перемещения тигля, при замкнутом контактным датчике; P — число выдаваемых импульсов подъема тигля на шаговый привод; B — коэффициент умножения уставки; Δ_3 — дискретность отсчета перемещения затравки; $\Delta_{\text{т}}$ — дискретность отсчета перемещения тигля; d_3 — заданный диаметр выращиваемого кристалла.

Для контактного метода перемещения затравки, тигля и период оценки сигнала управления могут быть представлены в следующем виде:

$$X_{3\text{II}} = X_{\text{II}3\text{II}}\Delta_3;$$

$$X_{\text{TH}} = X_{\text{ИTH}} \Delta_{\text{T}};$$

$$X_{\text{изц}} = \frac{X_{\text{итц}} K_y}{B};$$

$$T_{\text{ц}} = \frac{X_{\text{изц}} \Delta_3}{V_3} = \frac{X_{\text{зц}}}{V_3} = \frac{X_{\text{итц}} K_y \Delta_3}{B V_3},$$

где $X_{\text{зц}}$ — перемещение затравки; $X_{\text{изц}}$ — перемещение затравки с дискретностью отсчета Δ_3 ; $X_{\text{тц}}$ — перемещение тигля; $X_{\text{итц}}$ — перемещение тигля

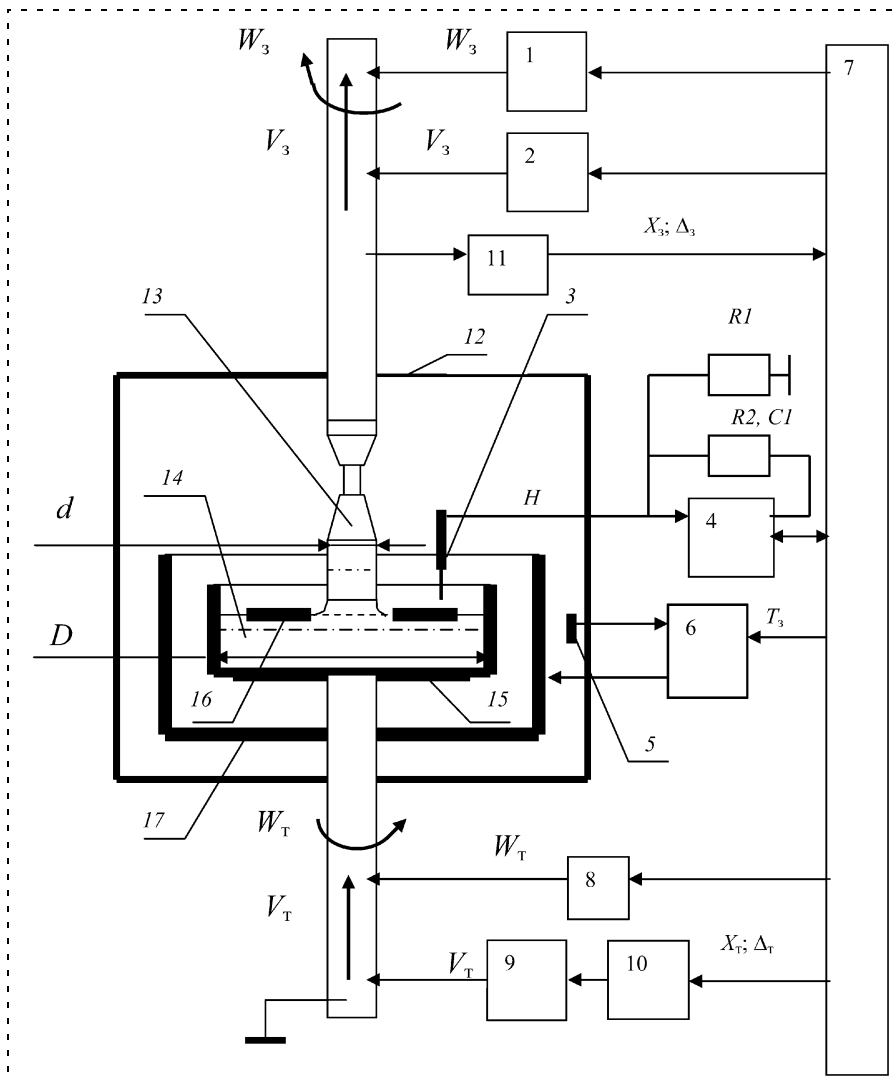


Рис. 1. Система управления на основе контактного метода:

1 — привод вращения затравки; 2 — привод перемещения затравки; 3 — контактный датчик; 4 — блок согласования с ЭВМ; 5 — датчик температуры; 6 — регулятор температуры; 7 — ЭВМ; 8 — привод вращения тигля; 9 — шаговый двигатель; 10 — блок управления шаговым двигателем; 11 — датчик перемещения затравки; 12 — камера; 13 — слиток; 14 — расплав металла; 15 — тигель; 16 — экран; 17 — нагреватель

с дискретностью отсчета Δ_T ; $T_{\text{ц}}$ — период оценки сигнала управления (время отработки заданного числа импульсов $X_{\text{итп}}$).

Управление скоростью вытягивания кристалла $V_3(x)$ и температурой боковой поверхности нагревателя $T_3(x)$ на цилиндрической части выращиваемого кристалла можно представить в виде выражений

$$V_3(x) = V_{3\Pi}(x) + K_v \Delta y; \quad (6)$$

$$T_3(x) = T_{3\Pi}(x) + A_t \int \Delta y dx; \quad (7)$$

$$\Delta y = X_{\text{итц}} \frac{K_y}{AB} - \frac{X_{\text{изц}}}{A}, \quad (8)$$

где K_v — пропорциональный коэффициент регулирования по скорости; A_t — интегральный коэффициент регулирования по температуре; $V_{3п}(x)$, $T_{3п}(x)$ — программное задание закона изменения технологических параметров; $V_3(x)$, $T_3(x)$ — общее управление технологическими параметрами; Δu — сигнал управления; x — перемещение вдоль оси кристалла.

При отработке микропроцессорных систем управления выращиванием германия выяснилось, что вычисление сигнала управления Δu по выражению (8) приводит к сложной гармонической ошибке измерения до 2 % (за счет погрешностей винтовых передач по перемещению кристалла и тигля). Для повышения точности измерения текущей площади кристалла до величины порядка 0,5 % была найдена новая математическая модель для измерения и управления текущей площадью кристалла в закрытой тепловой оснастке. Ниже приводится математический аппарат вычисления сигнала управления на основе широтной модуляции сигнала датчика уровня.

Время паузы после замыкания контактного датчика в контактном методе Δt и время ускоренного движения тигля после размыкания датчика Δt_d , а также число циклов $K_{ц}$ по замыканию и размыканию датчика можно представить в виде:

$$\Delta t_d(d) = \Delta t \frac{\left[1 - \left(\frac{d_{\min}}{d}\right)^2\right]}{\left[\left(\frac{d_{\max}}{d}\right)^2 - 1\right]};$$

$$K_{ц} = \frac{T_{ц}}{(\Delta t_d + \Delta t)},$$

где Δt — время движения тигля с замедленной скоростью $V_{тм}/M$ после замыкания датчика; Δt_d — время движения тигля с ускоренной скоростью $V_{тм}$ после размыкания датчика; $K_{ц}$ — число циклов замыкания и размыкания датчика за время $T_{ц}$.

Система автоматического управления за счет регулирования текущей площади кристалла по сигналу управления обеспечивает диапазон изменения диаметра в соответствии со следующими выражениями:

$$d_{тр} \leq d \leq d_{пр};$$

$$d_{пр} = d_3 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{C\alpha}}};$$

$$d_{тр} = d_{\max} \frac{\sqrt{\beta}}{\sqrt{M}} = d_3 \frac{\sqrt{\beta}}{\sqrt{M\left(1 - \frac{1}{C}\right)}},$$

где d — текущий диаметр кристалла; $d_{пр}$ — максимальный рабочий диаметр; $d_{тр}$ — минимальный рабочий диаметр; α — коэффициент рабочего максимального диаметра ($\alpha = 2$); β — коэффициент рабочего минимального диаметра ($\beta = 2,5$).

Выражение времени ускоренной скорости подъема тигля Δt_d при различных значениях рабочего диапазона диаметра кристалла можно представить в виде

$$\Delta t_d(d_{пр}) = \Delta t \frac{\left(C\alpha - \alpha - \frac{C\alpha}{M}\right)}{(\alpha - 1)};$$

$$\Delta t_d(d_3) = \Delta t \left(C - 1 - \frac{C}{M}\right);$$

$$\Delta t_d(d_{тр}) = \Delta t \frac{(\beta - 1)}{(M - 1)}.$$

Если задаться условием максимально допустимого размыкания уровня расплава в контактном методе управления $L_p(1...2 \text{ мкм})$, то выражение времени замедленной скорости подъема тигля $\Delta t(d)$ примет вид

$$\Delta t(d) = \frac{L_p}{\left(V_p(d) - \frac{V_{тм}}{M}\right)} = L_p T_{ц} \frac{\left[\frac{d_3}{d}\right]^2}{X_{тц} \left(1 - \frac{\left[\frac{d_3}{d}\right]^2}{M\left(1 - \frac{1}{C}\right)}\right)},$$

где L_p — максимально допустимое значение изменения уровня расплава.

В качестве основной оценки выберем оценку времени замедленного движения тигля для крайнего минимального значения рабочего диапазона диаметра $\Delta t(d_{тр})$:

$$\Delta t(d_{тр}) = \tau = \frac{L_p T_{ц}}{X_{тц} E},$$

$$\text{где } E = \frac{(\beta - 1)}{M\left(1 - \frac{1}{C}\right)}.$$

Число циклов замыкания и размыкания $K_{ц}$ датчика уровня можно представить в виде

$$K_{ц} = \frac{X_{тц} E}{\left[\frac{L_p \left\{ \left(1 - \frac{1}{C}\right) - \left[\frac{d_3}{d}\right]^2 \frac{1}{M} \right\}}{\left\{ \left[\frac{d_3}{d}\right]^2 - \left(1 - \frac{1}{C}\right) + \left(C - 1 - \frac{C}{M}\right) \right\}} \right]}.$$

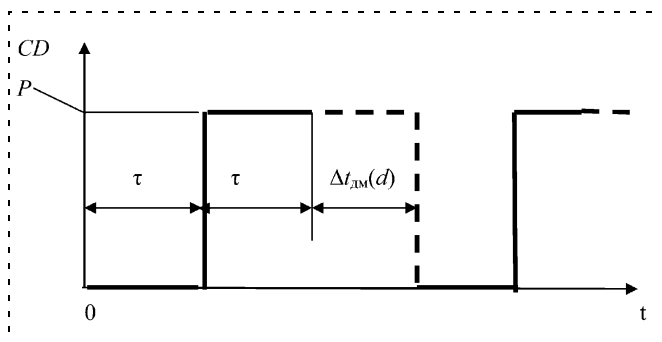


Рис. 2. График работы датчика уровня при вычислении сигнала управления на основе широтной модуляции:
CD — работа контактного датчика уровня (P — датчик замкнут)

На основании решения приведенных выше соотношений сигнал управления Δy можно представить в виде

$$\Delta y = \Delta t_d(d) - \Delta t_d(d_3) = \Delta t_d(d) - \tau \left(C - 1 - \frac{C}{M} \right); \quad (9)$$

$$\Delta y = \tau \left[\frac{\left\{ \left(1 - \frac{1}{C} \right) - \left[\frac{d_3}{d} \right]^2 \frac{1}{M} \right\}}{\left\{ \left[\frac{d_3}{d} \right]^2 - \left(1 - \frac{1}{C} \right) \right\}} - \left(C - 1 - \frac{C}{M} \right) \right]. \quad (10)$$

Для программирования сигнала управления Δy в системе управления применен алгоритм, который заключается в том, что в системе управления в момент замыкания контактного датчика выдерживается программная пауза τ замкнутого и последующая пауза τ разомкнутого искусственных состояний датчика уровня, после чего вычисляется сигнал управления Δy на основе подсчета длительности паузы $\Delta t_{дм}(d)$ до момента первого замкнутого состояния датчика уровня (рис. 2):

$$\Delta y = \Delta t_{дм}(d) - \tau \left\{ C - 2 - \frac{C}{M} \right\}. \quad (11)$$

Вычисление сигнала управления по выражению (11) позволяет повысить точность измерения текущей площади кристалла до величины порядка 0,5 %, а сами выражения (9)—(11) являются математической моделью вычисления сигнала управления на основе широтной модуляции сигнала датчика уровня.

Графики работы микропроцессорных установок при выращивании монокристалла германия диаметром 104 мм, на которых проведена отработка данной методики, показаны на рис. 3 и 4.

При работе установки вытягивания германия № 21 (рис. 4) применялась программа вычисления сигнала управления Δy на основе рассмотренной

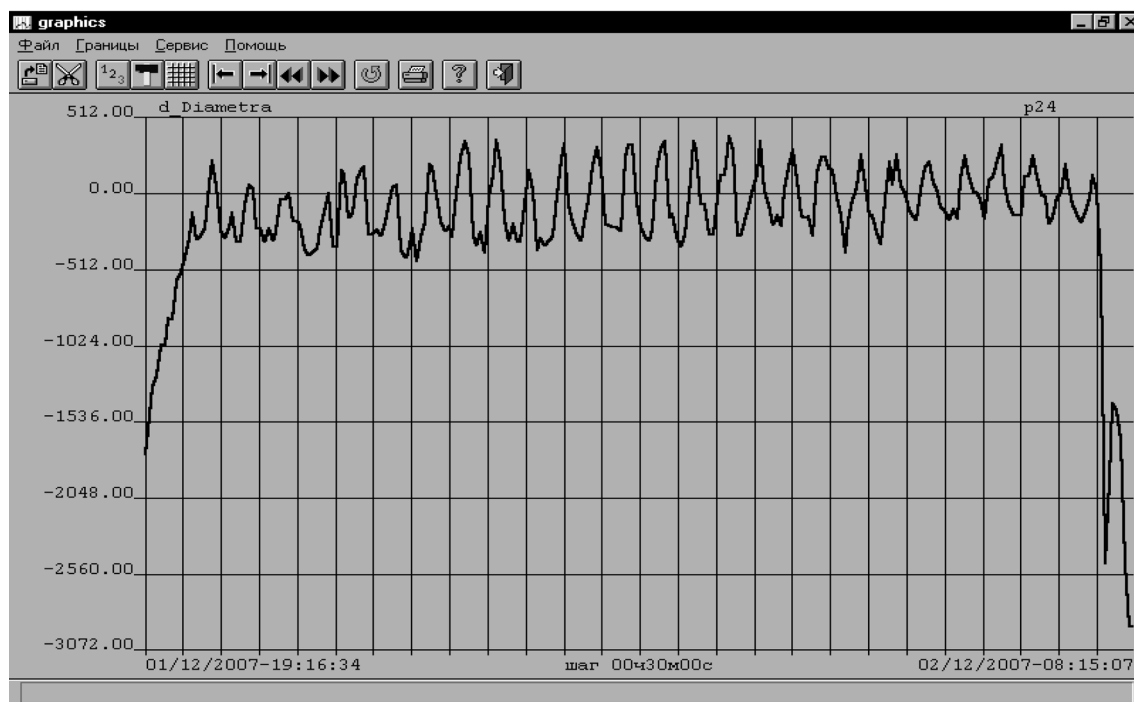


Рис. 3. График изменения сигнала управления Δy (d_Diametra) на установке № 24

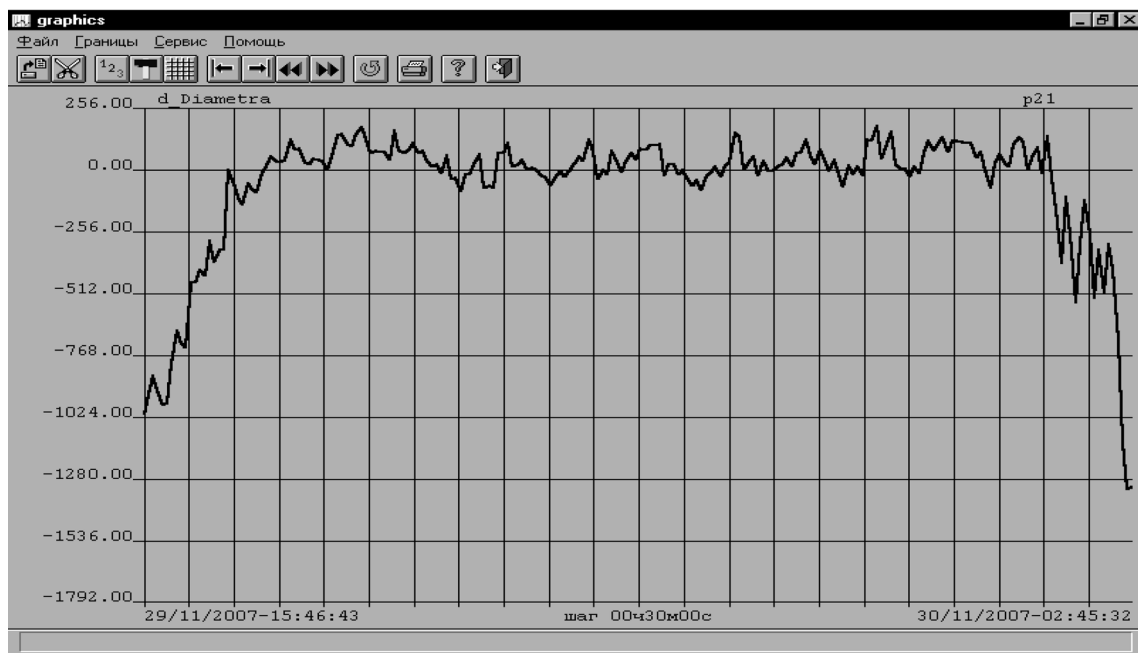


Рис. 4. График изменения сигнала управления Δy (d_Diametra) на установке № 21

выше методики, с широтной модуляцией сигнала датчика уровня, в отличие от установки № 24 (рис. 3), на которой сигнал управления Δy вычислялся по выражению (8). Качественное сравнение сигналов управления наглядно демонстрирует сложную периодическую ошибку измерения за счет погрешностей винтовых передач по перемещению кристалла и тигля на установке № 24. Ошибка измерения на установке № 24 приводила к колебанию по диаметру полученного после вытягивания готового кристалла в пределах 2—4 %.

Внедрение предложенного метода вычисления и управления диаметром кристалла на установке № 21 позволило получить точность стабилизации площади выращиваемого кристалла германия (диаметром 104 мм) порядка 0,5 %, что подтверждено актом внедрения в производство ФГУП "Германий". Анализ точности выполнен на основе измерения готовой продукции.

* * *

Разработана математическая модель вычисления сигнала управления для измерения и управления текущей площадью при выращивании монокристаллов германия на основе широтной модуляции сигнала датчика уровня. Данная модель позволила организовать производство монокристаллов

германия кристаллографического направления "100" и диаметром 104 мм с воспроизведением формы (площади) готового монокристалла с точностью 0,5 %.

Список литературы

1. Патент 2128250 РФ, МПК СЗО 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 СЗО 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. Лаптенко. 2002. № 99123739/12.
3. Саханский С. П., Подкопаев О. И., Лаптенко В. Д. Способ управления процессом выращивания монокристаллов германия из расплава // Под ред. В. В. Стацеры. Перспективные материалы, технологии, конструкции-экономика: Красноярск: ГИЦМиЗ, 2000. Вып. 6. С. 391—393.
4. Саханский С. П. Основные математические соотношения контактного метода управления выращиванием монокристаллов по способу Чохральского / Под ред. проф. Г. П. Белякова // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Красноярск: СибГАУ, 2005. Вып. 7. С. 85—88.
5. 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.

СУДОВАЯ АВТОМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ И РЕЧНОМ ФЛОТЕ

УДК 629.5.86

А. В. Кислицын, канд. техн. наук,
заместитель начальника Военно-морского
института радиоэлектроники им. А. С. Попова
(Санкт-Петербург), капитан 1 ранга,

М. В. Буйневич, канд. техн. наук,
проф. кафедры БИ АСУ Военно-морского
института радиоэлектроники им. А. С. Попова
(Санкт-Петербург),

В. В. Метелицин, зам. главного конструктора
ФГУП "Центральный научно-исследовательский
институт "Комета" (Москва)

О повышении безопасности мореплавания путем интеграции систем наблюдения различных ведомств, занимающихся морской деятельностью

Рассматриваются объективные предпосылки интеграции систем наблюдения за морской обстановкой, принадлежащих различным ведомствам, для обеспечения безопасности мореплавания судов и охраны человеческой жизни на море. Представлена модель потери информации при работе морской диспетчерской службы, с помощью которой может быть определена пропускная способность системы наблюдения при создании новых интегрированных систем. Освещены существующие организационно-технические проблемы процесса интеграции систем наблюдения и даны некоторые предложения о способах их решения.

Ключевые слова: интеграция систем наблюдения, единая региональная система, безопасность мореплавания судов, морская диспетчерская служба, неавтоматизированный режим сбора и обработки информации, оценка эффективности системы наблюдения, модель потери информации.

Объективные предпосылки интеграции систем наблюдения за морской обстановкой

В последние десятилетия все более возрастает значение информационных технологий в области морской деятельности государств. Растет потребность в оперативной информации о морской обстановке, которая играет первоочередную роль при обеспечении безопасности мореплавания судов и охране человеческой жизни на море. С этой целью в настоящее время в особо важных с экономической точки зрения регионах морей вблизи побережья Российской Федерации построены и продолжают создаваться современные эффективные средства наблюдения за морской обстановкой. В Северо-Западном, Дальневосточном, Азово-Черноморском бассейнах созданы и функционируют береговые станции морских районов Глобальной морской

системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности (ГМССБ), региональные центры службы управления движением судов (СУДС).

В рамках транспортного диалога Россия — ЕС по инициативе Европейского агентства морской безопасности (European Maritime Safety Agency — EMSA) предлагается объединить европейскую информационную сеть SafeSeaNet и Региональную систему безопасности Финского залива, а также осуществить сотрудничество в области создания объединенных систем обеспечения безопасности мореплавания в регионе Черного моря [1].

1 января 2008 г. вступили в силу поправки к главе V "Безопасность мореплавания" Международной конвенции СОЛАС [2]. Указанными поправками в главу V вводится новое правило "Система дальнейшей идентификации и слежения за судами (СДИ)", которым определены типы судов и сроки их оснащения оборудованием СДИ, а также определены общие принципы функционирования СДИ и взаимодействия вовлеченных сторон [3].

Практически все вышеперечисленные системы, развертываемые на побережье России, создаются силами и за счет средств Министерства транспорта, а также Государственного Комитета РФ по рыболовству (Дальневосточный бассейн). При этом другие ведомства, связанные с морской деятельностью, также развивают независимо друг от друга свои собственные системы наблюдения за морской обстановкой. Не нужно повторять, что нередко средства освещения обстановки различных ведомств дублируют друг друга, выполняя близкие по способу реализации задачи. При этом создание новых систем освещения обстановки требует значительных финансовых затрат.

Несмотря на то, что организационно определен порядок взаимодействия диспетчерских служб различных ведомств и в его рамках идет обмен информацией об обстановке на море, нельзя утверждать, что в экстремальных условиях при значительном увеличении потоков информации эти схемы взаимодействия будут также хорошо работать. К таким экстремальным условиям можно отнести, например, техногенные катастрофы, террористические акты, крупномасштабные боевые действия в прибрежных регионах и т. д.

Модель потери информации. Пропускная способность системы наблюдения

Рассмотрим модель работы гипотетического органа управления, получающего информацию о морской обстановке от различных источников, и путем математических расчетов оценим его возможности в условиях нештатной ситуации.

Наблюдение за морем ведется с применением множества средств, информация от которых приходит независимо друг от друга в случайные моменты времени. Собственные источники информации органа управления отображают текущую обстановку в автоматизированном режиме, обладающем большими возможностями по объему обрабатываемых данных. Взаимодействие с другими ведомствами осуществляется по телефону либо посредством радиообмена. Неавтоматизированный режим сбора и обработки информации в значительной мере снижает производительность работы диспетчерской службы, особенно в условиях нештатных ситуаций, когда собственный обнаружитель может выйти из строя либо его технические возможности не позволят получить необходимую информацию.

Для описания физики процесса принята следующая математическая модель. На вход системы, состоящей из n приборов одинаковой производительности, поступает простейший поток заявок с плотностью λ . В случае если все приборы заняты, заявка становится в очередь и ждет освобождения прибора. Однако исходя из предельно допустимых параметров устаревания информации о ситуации в море вводятся ограничения на время пребывания донесения в системе с применением математического аппарата систем массового обслуживания с ограниченным временем ожидания заявок в очереди.

В данной модели под понятием "прибор" будем подразумевать диспетчера или его помощника, осуществляющих сбор и обработку информации об обстановке, а также доведение важнейшей информации в вышестоящую инстанцию.

"Заявка" — доклад об обстановке диспетчеру от одного источника информации.

Под понятием "обслуживание" будем понимать отбор необходимой информации, полученной от источника, и принятие решения диспетчером о степени опасности ситуации в море, а также, в случае необходимости, передачу сообщения в адрес вышестоящего органа управления.

Время обслуживания каждой заявки прибором является случайной величиной $t_{\text{обс}}$, которая подчинена показательному закону распределения с параметром

$$\mu = \frac{1}{t_{\text{обс}}},$$

где $t_{\text{обс}}$ — среднее время, необходимое для обслуживания одной заявки.

Любая заявка, вновь прибывшая в систему и заставшая все каналы обслуживания занятыми, ста-

новится в очередь и ожидает обслуживания. Время пребывания в очереди подчинено закону

$$v = \frac{1}{t_{\text{ож}}},$$

где $t_{\text{ож}}$ — время ожидания заявки в очереди.

Если заявка, пробыв в системе некоторое время $t_{\text{ож}}$, не была принята на обслуживание, то она покидает систему необслуженной. Другими словами, информация, прибывшая к диспетчеру с большой временной задержкой, в обработку не принимается, поскольку происходит последующий обновленный доклад от данного источника. Параметр v можно рассматривать как среднюю плотность ухода заявок из системы (среднюю плотность потерь информации).

Основные зависимости для n -канальной системы при определении основных характеристик функционирования [4] приведены ниже.

1. Вероятность того, что обслуживанием заявок заняты все n каналов системы и S заявок ожидают обслуживания:

$$P_{n+S} = \frac{\frac{\alpha^{n+S}}{S! \prod_{m=1}^S (n+m\beta)}}{\sum_{k=1}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^n}{n!} \sum_{S=1}^{\infty} \frac{\alpha^S}{\prod_{m=1}^S (n+m\beta)}}, \quad S \geq 1,$$

где $\alpha = \lambda t_{\text{обс}}$; $\beta = \frac{t_{\text{обс}}}{t_{\text{ож}}}$; λ — плотность потока заявок.

2. Среднее число заявок, ожидающих обслуживания:

$$\begin{aligned} M_{\text{ож}} &= \sum_{S=1}^{\infty} S P_{n+S} = \\ &= \frac{\frac{\alpha^n}{n!} \sum_{S=1}^{\infty} \frac{S \alpha^S}{\prod_{m=1}^S (n+m\beta)}}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^n}{n!} \sum_{S=1}^{\infty} \frac{\alpha^S}{\prod_{m=1}^S (n+m\beta)}}. \end{aligned}$$

3. Вероятность отказа в обслуживании заявки:

$$P_{\text{отк}} = \frac{\beta}{\alpha} M_{\text{ож}}.$$

Проведение расчетов по этим формулам затруднительно вследствие их громоздкости и наличия бесконечных сумм. Для приближенных расчетов

можно заменить бесконечные суммы выражениями:

$$\sum_{S=r}^{\infty} \frac{\alpha^S}{\prod_{m=1}^{\infty} (n - m\beta)} < \frac{\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^r}{r!} e^{\frac{\alpha}{\beta}}; \quad (1)$$

$$\sum_{S=r}^{\infty} \frac{S\alpha^S}{\prod_{m=1}^{\infty} (n - m\beta)} < \frac{\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^r}{(r-1)!} e^{\frac{\alpha}{\beta}}. \quad (2)$$

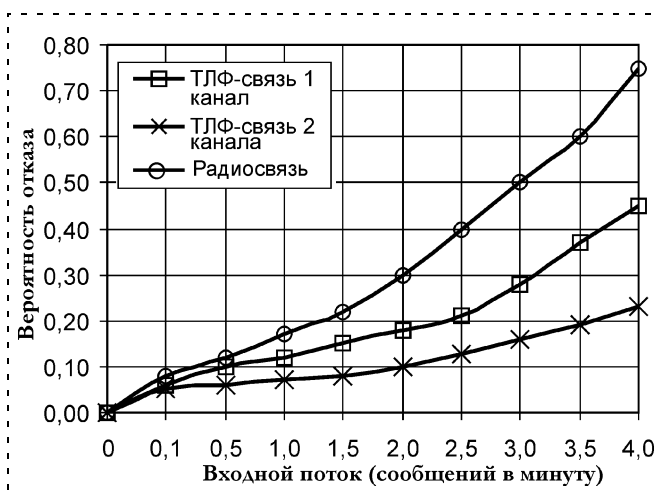
Формулы (1) и (2) были получены в предположении, что время обслуживания заявок и время их ожидания в очереди распределены по показательному закону. Однако в реальных системах массового обслуживания возможно появление и таких, в которых это время подчинено иным законам распределения. Но, как показали исследования [4], эти зависимости, полученные для стационарных условий функционирования систем, справедливы и для других законов распределения времени обслуживания и ожидания заявок. Об этом можно судить по результатам расчетов, проведенных методом статистических испытаний для достаточно широкого диапазона основных параметров систем:

$$1 \leq n \leq 30; 0,01 \leq \alpha \leq 30; 0,1 \leq \beta \leq 10.$$

Будем считать, что величины n , μ , $t_{\text{ож}}$ — величины постоянные. Тогда можно найти зависимость

$$P_{\text{отк}} = f(\alpha). \quad (3)$$

Необходимые значения определяются графоаналитическим путем: задаваясь вероятностью потери сообщения о цели, находим допустимую интенсивность потока заявок, или, другими словами, пропускную способность системы наблюдения.



Вероятность потери информации в зависимости от входного потока сообщений по разным каналам связи

Исходя из типовой организации диспетчерской службы, не связанной с реальными ведомствами, и задав числовые значения переменных, получим графическую зависимость вероятности отказа в обслуживании заявки в зависимости от потока заявок, т. е. вероятности потери информации, которая изображена на рисунке.

Данная модель может быть использована для проведения расчетов в опытно-конструкторских работах при разработке единой системы освещения морской обстановки. Анализ зависимости показывает необходимость повышения производительности приборов обслуживания при их работе в условиях осложнения обстановки на море. Наиболее узкое место — отсутствие автоматизации в процессе взаимодействия диспетчерских служб разных ведомств.

Некоторые предложения по интеграции систем наблюдения

Задачи наблюдения за морской обстановкой, стоящие перед разными ведомствами, имеют значительные отличия, и простое сложение компонентов в создании единой системы может не дать положительного результата. Кроме того, существуют определенные противоречия в способах решения тех или иных задач. Так, например, в радарных комплексах СУДС обеспечение максимальной точности определения местоположения судов на рейдах портов (в ближней зоне) требует некоторого загробления порога срабатывания обнаружителей целей в устройствах обработки информации. Использовать такие системы в интересах Министерства обороны РФ, где главное требование к системам наблюдения — максимальная дальность обнаружения объектов, на первый взгляд весьма проблематично: здесь необходим максимальный подъем чувствительности приемных устройств. Однако современные технологии обработки информации позволяют из всей совокупности данных вычленивать только то, что необходимо для решения свойственных соответствующему ведомству задач. В этом случае для обеспечения максимальной зоны освещенности могут быть использованы отдельные обнаружители, работающие в едином комплексе, но в интересах разных ведомств. Кроме того, это позволит перераспределить усилия собственных радиолокационных станций (РЛС) береговой системы наблюдения ВМФ в целях освещения морской обстановки в дальней зоне, а обстановку в ближней зоне можно будет вести по данным технических средств СУДС. В то же время информация об обстановке в дальней морской зоне, полученная подразделениями Министерства обороны от собственных более мощных источников, может быть полезна и для гражданских ведомств, а также для структурных подразделений Пограничной службы, сил МЧС и т. д.

Один из весьма сложных вопросов интеграции систем наблюдения за морской обстановкой — обеспечение конфиденциальности обрабатываемой информации. Здесь необходимы совместные обоснованные решения для разграничения ведомственного и персонального доступа к объему данных, обрабатываемых в системах.

Отдельным вопросом является проблема отсутствия единого подхода различных ведомств к обеспечению электронными картами собственных автоматизированных систем обработки информации. Предприятия-разработчики различных систем самостоятельно принимают решение о том, какой формат электронных карт использовать. А некоторые из них вместо навигационных морских карт используют несертифицированные электронные планшеты собственного производства или топографические электронные карты. В результате становится невозможным обеспечение навигационной безопасности плавания кораблей и судов в зоне ответственности.

Не менее важный недостаток при комплексном решении задачи обеспечения морской безопасности — отсутствие устройств приема информации от автоматической идентификационной системы (АИС) на объектах береговой системы наблюдения ВМФ и постах технического наблюдения Погранвойск ФСБ РФ, ведущих круглосуточное наблюдение на удаленных участках моря. Правилем 19 главы 5 Международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 г. (СОЛАС-74) предусмотрено обязательное использование на всех судах автоматических идентификационных (информационных) систем, которые могут быть использованы в целях обеспечения безопасности мореплавания, а также при проведении поисково-спасательных операций и антитеррористических мероприятий. В зонах интенсивного судоходства процесс распознавания судов является крайне важной и крайне сложной задачей, и здесь любой дополнительный источник информации приносит неоценимую пользу.

По данным средств массовой информации, командование ВМС США настоятельно рекомендует руководству стран западной Африки, а также судовладельцам этого региона ускорить процесс оснащения всех судов АИС-транспондерами. Это повысит навигационную безопасность плавания судов, а также обеспечит защиту морских перевозок от морских пиратов.

Необходимо учитывать, что на береговом радиотехническом посту наблюдения мощность принятого активного сигнала от АИС-транспондера, как правило, несравнимо больше мощности отраженного СВЧ-импульса обычной радиолокационной станции — это обеспечивает большую дальность обнаружения морских объектов, оборудованных АИС. Кроме того, на рабочих частотах системы АИС явление рефракции радиоволн проявляется значительно по

сравнению с частотами обычных радаров навигационного предназначения, что позволяет ожидать повышения эффективности освещения морской обстановки за счет приема информации от АИС, находящихся далеко за дальностью радиогоризонта РЛС [5].

Немного уходя от темы статьи, хочется выразить сожаление по поводу того, что на военных кораблях ВМФ России не устанавливаются АИС-транспондеры. Правило I указанной выше Конвенции гласит, что исключением в применении требований об обязательной установке АИС являются военные корабли и вспомогательные суда ВМФ. Это понятно с точки зрения скрытности действий сил в море: данные, передаваемые в эфир в открытом виде, о местоположении корабля, его характеристиках и выполняемых им действиях являются разглашением конфиденциальной информации. Однако Конвенция рекомендует военным кораблям и вспомогательным судам ВМФ поступать, насколько это целесообразно и практически возможно, таким образом, чтобы это совпадало с принципами безопасности мореплавания. В целях скрытности действий корабля транспондер всегда можно отключить либо выдавать в эфир минимум информации, а в системе глобальной морской системы связи при бедствиях (ГМССБ) при спасении корабля сигнал транспондера может оказаться последней надеждой экипажа. По опыту проведения совместных учений сил Военно-морского флота России с иностранными кораблями можно сделать вывод о том, что другие государства имеют на вооружении эти системы. Так, например, во время учений "Черноморское партнерство—2006" с участием стран бассейна Черного моря фрегат УРО ВМС Турции "Йылдырым" на протяжении всего периода совместных действий имел включенный АИС-транспондер. В эфир выдавалась информация только о его местоположении, курсе и скорости движения.

Все вышесказанное еще раз подтверждает, что в настоящее время возникла потребность комплексного и научно-обоснованного решения вопроса интеграции и создания единых региональных систем освещения обстановки. На этапе планирования мероприятий по созданию единых региональных систем освещения обстановки необходим научно-обоснованный подход на основе выработки основных критериев, которые могли бы служить мерой эффективности решения поставленных задач, а также на основе разработки методик и алгоритмов оценки существующих систем и выработки рекомендаций по их совершенствованию.

Создание и развитие единых региональных систем освещения обстановки должно повысить эффективность использования людских, технических, финансовых и других ресурсов в ходе разработки систем освещения морской обстановки различного ведомственного подчинения, согласовать направления

их развития. Возможно значительное сокращение сроков разработки, внедрения и освоения новых образцов технических средств в сравнении со сроками их морального старения и сроками внедрения новых технологий (в том числе информационных), исключение дублирования работ и затрат.

Особенно важно при создании и оптимизации региональных систем учесть все существующие и перспективные средства освещения обстановки, интересы всех ведомств, участвующих в создании единой системы, чтобы разработать оптимальную методику оценки эффективности и выработать системотехнические требования исходя из задач, стоящих перед каждым участником объединения.

Список литературы

1. Информационный бюллетень ФГУП "Морсвязьспутник" № 1, январь 2008 г. <http://www.marsat.ru>
2. Бюллетень № 23 изменений и дополнений к Консолидированному тексту Международной Конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 г. (СОЛАС-74). СПб. ЦНИИМФ, 2006. С. 29.
3. Информационное сообщение Морского регистра судоходства от 6.01.08. <http://www.rs-head.spb.ru>
4. Новиков О. А., Петухов С. И. Прикладные вопросы теории массового обслуживания. М.: Сов. радио, 1969. С. 189.
5. Временное руководство по использованию Автоматической идентификационной системы (АИС) на судах и в береговых службах. М. 2002.

УДК 629.072

А. А. Борейко¹, научн. сотрудник, С. А. Мун², студент,
А. Ф. Щербатюк¹, чл.-корр. РАН, директор института,

¹ Институт проблем морских технологий, ДВО РАН, г. Владивосток

² Дальневосточный государственный технический университет им. В. В. Куйбышева, г. Владивосток

Определение движения подводного аппарата на основе обработки видеоизображений

Рассмотрены алгоритмы оценивания параметров движения автономного необитаемого подводного аппарата, использующие для обработки видеоизображения. Подход основан на выделении одних и тех же случайных объектов на последовательных кадрах и определении их взаимного перемещения. Приведены результаты работы системы определения движения подводного аппарата с использованием реальных данных.

Ключевые слова: автономные необитаемые подводные аппараты, определение движения, обработка изображений.

Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу.

УДК 528.561, 621.317.76, 656.6:658, 629.783:527

А. В. Тювин, канд. техн. наук, нач. отдела, А. А. Афонин, канд. техн. наук, доц.,
А. И. Черноморский, канд. техн. наук, зам. зав. каф.,
Московский авиационный институт (ГТУ)

Оценка потенциальной точности морских векторных гравиметрических измерений

Дается постановка и решение задачи векторных гравиметрических измерений при использовании автономных малоразмерных подводных аппаратов в качестве носителей бесплатформенных гравиинерциальных навигационных комплексов. Исследуется оценка потенциальной точности данных измерений в бесплатформенной технологии их реализации.

Ключевые слова: бесплатформенный гравиинерциальный навигационный комплекс, малоразмерный подводный аппарат, бесплатформенная инерциальная навигационная система, векторные гравиметрические измерения, гравиметрический алгоритм, модель погрешностей.

Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по проекту 2.1.2.9248 аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы (2006—2008 годы)" и РФФИ по гранту 05-05-65365.

УДК 004: 656.61.073

В. М. Дорожко, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник,
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

Оценка информационного признака начального этапа поворота морского судна

На основе обработки натурных наблюдений тангенциальных скоростей кормы и носа судна выявлен идентификационный признак начального этапа поворота судна, в качестве которого выступает максимум углового ускорения вращения корпуса судна. С помощью метода вычислительной гидродинамики показано, что наличие максимума углового ускорения судна обусловлено смещением в процессе перекладки руля мгновенной оси вращения к носу судна.

Ключевые слова: морское судно, информационный признак, переложенный руль, циркуляционное движение, угловое ускорение вращения судна.

Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу.

УДК 629.12.011

В. В. Королев, аспирант, **Н. Е. Жадобин**, д-р техн. наук, проф.,
С. В. Заставный, системный администратор,
Государственная морская академия им. адм. С. О. Макарова, г. Санкт-Петербург
Санкт-Петербургский международный банковский институт

Многоканальная система контроля напряженного состояния корпуса судна

Обосновывается актуальность разработки многоканальных систем контроля напряженного состояния корпуса судна. Обсуждаются особенности разработки и создания соответствующей многоканальной цифровой системы контроля с использованием магнитоупругих преобразователей в качестве датчиков напряженного состояния корпуса судна, адаптированной к судовым условиям. Приводится функциональная схема системы контроля, блока цифровой и аналоговой обработки сигнала, а также описание отдельных звеньев.

Ключевые слова: система контроля, напряженное состояние корпуса судна, повреждения корпусных конструкций.

Полный текст статьи опубликован в Приложении к журналу.

CONTENTS

Afanasyeva K. E. , Shiryayev V. I. Adaptive Estimation and Forecasting in Dynamic Systems on the Basis of Guarantee Approach 2

The algorithms of estimation and forecasting of dynamical systems is considered, describing the evolution of object on the basis of information about "relative" objects in the case when information about disturbances in system and noises in measurements are known with some available areas of changing. When the declining of object dynamics from set trajectory is discovered, the "relative" objects are chosen. On the basis of "relative" trajectories the trajectory of interesting object is formed. The algorithms application is illustrated on the data of cellular subscribers in regions.

Keywords: Adaptive guarantee estimation, forecasting, uncertainty, "relative" objects, the parallel treatment of filters (the bank of filters).

Tsykunov A. M. Algorithm of Robust Control for Linear Dynamic Objects on the Output 7

It is the problem of construction robust control systems for stationary and non-stationary objects with delay. This algorithm allows to compensating parametrical and external disturbance with the given accuracy is solved. The algorithm of the control applied for all listed types of objects is received. The numerical example and result of modeling is resulted.

Keywords: unknown parameters, relative degree, robust control, disturbance signal, measures output, observer.

Anisimov A. A., Tararykin S. V. Automatic Tuning of Digital Polynomial Regulators, Applied in Electromechanical Systems, with Help of Artificial Neural Network	13
--	-----------

The article deals with the problem of automatic tuning of digital polynomial regulators, applied in electromechanical systems. The method of automatic tuning is suggested, which is based on the identification of control object with help of the radial neural network with the following calculation of regulator parameters by method of modal control. This approach allows significantly reduce an amount of time, needed for tuning of control system.

Keywords: electromechanical system, digital polynomial regulator, automatic tuning, radial neural network, neural network training.

Burlachenko T. B., Morozova T. Yu. Neural Optimization Abductive Inference in Problems of Diagnostics of Technical Systems	19
---	-----------

For the decision of a problem of diagnosing it is offered to use abductive inference. There is formulated the task of optimization of abduction. For the decision of this problem it is used a Hopfield network.

Keywords: diagnosis, abduction, abductive inference, optimization, Hopfield network.

Kulakov F. M., Chernakova S. E. Advanced Information Technology of Robot Teaching-by-showing	24
---	-----------

The robot telecontrol by human-operator carries out the following tasks: a remote working zone observation, a control process for remote robot and a preliminary teaching of robot.

The advanced information technology for robot teaching-by-showing of the natural motions of human-operator based on an intellectual multimodal man-machine interface is presented.

The developed teaching technology application for medical, assistant, anthropomorphous and android robots is a very actual today. The advanced teaching technology for space robot, assembly robots, included a micro- and nano-technologies is a highly needed.

Keywords: robot, telecontrol, teaching-by-showing, man-machine interface.

Petukhov S. V. Autonomic Navigation Methods under Robot's Backwards Movement by Remembered Landmarks on the Past Trajectory	30
--	-----------

This paper presents methods of the autonomous navigation and control algorithms using remembered landmarks for determination of deviations from nominal trajectory and movement's correction of the mobile robot. The algorithms for compressed representation of the landmarks with point plans in onboard computer were developed, using data from computer stereo vision system. Presented experimental results of the new navigation's method based on matching of the remembered point plans with landmarks, determined during autonomic robot's backward movement.

Keywords: autonomous and remote control mobile robots, intelligent machines, robot vision, robot's navigation, point plan, point images matching.

Lazichev A. A., Samuleeva Yu. A. Automated System for Calibration of Manometers with Help of Scales Drawing	35
--	-----------

In the article sets basic ideas for development of automated system for calibration of manometers. In it showed of system structure, chooses of constructions and efficiency of application.

Keywords: pptimization, manometer, scale, drawing.

Sedov A. V., Trishechkin Y. V. The Formula for the Calculation of a Spectrum of a Discrete Signal at the Changing of the Repetition Rate of Samples in the Monitoring and Control Systems	39
--	-----------

The problem of the calculation of a complex spectrum of a discrete signal is considered at the changing of sampling frequency of a signal. As against the known formula used for these purposes and connecting spectra of a continuous signal and discrete one have receiving as a result of its periodic sampling the offered formula does not contain the infinite sums, does not demand an analytical expression for a spectrum of a continuous signal and it is realized easier in modern microprocessor systems of digital processing signals. The fields of the application are digital systems with the calculation of spectra of measured signals, in particular systems of technical diagnostics, the monitoring, the recognition, the communication, systems with an adaptive choice of sampling frequency of measured signals, etc.

Keywords: digital systems, the spectrum of a signal, the sampling frequency, the aliasing, the formula of the interconnection of spectra.

Sakhanski S. P. Mensurement of Monocrystal Area in the System of Automatic Monitoring of Germanium Growing	44
---	-----------

Mathematical expression was offered to measure current germanium monocrystal area on growing system by Czokhralski which allows to measure and monitor current monocrystal area based on width modulation of level detector signal.

Keywords: contact method, width modulation of level sensor signal, mathematical model of control signal.

Kislitsin A. V., Buynovich M. V., Metelitsin V. V. About Increase of Navigation Safety by Integration of Observing Systems of the Various Departments, Engaged Maritime Activity	49
---	-----------

Unbiased background of integration the different sea observing systems (belonging to various departments) is viewed, for guaranteeing a safety navigation and human life protection at sea. As a sample, the loss of information model

is presented. With this model the carrying capacity of observing system can be computed in view of creation new integration systems. Existing technical-organizational problems of integration the observation systems is widely covered in the article.

Keywords: integration the observing systems, uniform regional system, safety navigation, vessel traffic control, non-automatized mode of information gathering and data processing evaluation of observation system effectiveness, the loss of information model.

Boreyko A. A., Moun S. A., Scherbatyuk A. F. Underwater Autonomous Vehicle Motion Detection Based on Video Images Processing. 53

The algorithms of autonomous underwater vehicle motion detection based on image processing are considered in the paper. The approach is based on the detection of the same objects on the consecutive frames and its joint displacement calculation. The motion detection system structure and algorithms of its operation onboard of AUV TSL are considered and results of marine trials are supplemented.

Keywords: autonomous underwater vehicle /AUV/; motion detection; image processing.

Tyuvn A. V., Afonin A. A., Chernomorsky A. I. The Assessment of Marine Vector Gravimetric Measurements Potential Precision. 53

Modern marine gravimetry is characterized by rather low efficiency and its realization considerable costs. This disadvantage is showed especially in scientific and applied problems solution, specifically in geological survey, requiring the identification of delicate gravitational field structure in high-frequency spectrum of gravitational anomalies. This painstaking jobs automatic implementation with autonomous low-sized underwater vehicle (LUV) using as strapdown graviinertial navigation complexes (SGNC) carriers is reasonable. And with it the problem statement of vector gravimetric measurements (VGM) is possible [1, 2]. The VGM potential accuracy estimation in strapdown technology realization is present paper objective.

Keywords: strapdown graviinertial navigation complex, low-sized underwater vehicle, strapdown inertial navigation system, vectorial gravimetric measurements, gravimetric algorithm, mathematic model, errors model, requirements estimation.

Dorozhko V. M. Astimation of Information Indicator of the Initial State of the Sea Vessel Turn 54

On the basis of processing observations of tangential stern and bow speeds the maxima of an angular acceleration of rotation of a vessel that is accepted as indicator of the initial stage of turn of a vessel is detected. With the help of computational fluid dynamics method it is shown, that a reason of creation of a maxima of a vessel angular acceleration is offset of an instant axis of rotation to a nose of a vessel during transposition of a rudder.

Keywords: sea vessel, information indicator, full rudder, turning motion, angle acceleration, pivot point, computational fluid dynamics, force moment.

Korolev V. V., Zhadobin N. E., Zastavnyi S. V. Multichannel Control System Stressed State Hull. 54

The article justifying the relevance of the installation of multi-control systems stressed state hull. A functional scheme developed a control system, block digital and analog signal processing, as well as a description of individual parts. A brief rationale for sitting of monitoring sensors.

Keywords: multichannel monitoring system stressed state hull, damaged hull structures.

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский 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 *З.В. Наумова*.

Сдано в набор 03.06.2008. Подписано в печать 15.07.2008. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,05. Заказ 856. 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