

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 10 (139)

октябрь

2012

Редакционный совет:

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

Главный редактор:
ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Заместители гл. редактора:

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

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

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

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Ким Д. П.** Алгебраический метод синтеза систем управления с чистым запаздыванием . . . 2
Некрасов И. В. Многошаговая оптимизация дискретного процесса управления методом ограниченного перебора возможных состояний системы 8

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

- Ходашинский И. А., Горбунов И. В.** Оптимизация параметров нечетких систем на основе модифицированного алгоритма пчелиной колонии 15
Мащенко А. А., Мусатов В. Ю., Сысоев В. В. ПЛИС-реализация нейросетевого алгоритма идентификации газа по векторному отклику хеморезистивной мультисенсорной микросхемы 21
Кабак И. С., Гаделев А. М. Система диагностики технологического процесса резания с использованием аппарата нейронных сетей. 25

ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Максименко А. С., Федунев Б. Е., Чучага Р. В.** Компьютерная система "Динамический граф" для оценки реализуемости алгоритмов деятельности оператора 30
Бу Дык Лунг, Падерно П. И., Сатторов Ф. Э. Человеческий фактор в корпоративных сетях. Часть 1. Модели и оценки. 38

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Иващенко В. А., Колоколов М. В., Васильев Д. А.** Концепция синтеза структуры системы автоматизированного управления электропотреблением промышленных предприятий 43
Садыгов А. Б. Метод оценки риска возникновения аварий на предприятиях 47

Журнал в журнале

"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Логинов М. Ю., Челноков Ю. Н.** Аналитическое решение линейных дифференциальных уравнений ошибок БИНС для случая неподвижного объекта. 55
Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Мурсалимов Э. Ш. Метод идентификации параметров математической модели подводного аппарата 64
Contents 71

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

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

УДК 62-50:519.711

Д. П. Ким, д-р техн. наук, проф.,
dpkim@yandex.ru,

Московский государственный
технический университет радиотехники,
электроники и автоматики (МИРЭА)

Алгебраический метод синтеза систем управления с чистым запаздыванием

Рассматривается задача синтеза регулятора, когда объект обладает чистым (транспортным) запаздыванием. Используется алгебраический метод, основанный на применении желаемой передаточной функции. При этом передаточная функция звена чистого запаздывания аппроксимируется дробно-рациональной функцией.

Ключевые слова: алгебраический метод, транспортное запаздывание, желаемая передаточная функция (ЖПФ), нормированная передаточная функция (НПФ), время регулирования, перерегулирование, аппроксимирующие передаточные функции

Введение

По синтезу систем автоматического управления с запаздыванием опубликовано значительное число работ. Эти работы посвящены синтезу оптимальных и квазиоптимальных по быстродействию систем управления, систем, оптимальных по интегральному квадратичному критерию, а также модальному управлению [1–4]. Достаточно подробный обзор и список литературы по оптимальным и квазиоптимальным по быстродействию системам управления с запаздыванием представлены в работе [1], а по оптимальным по интегральному квадратичному критерию системам автоматического управления — в работе [3]. В монографии [4], посвященной спектральной декомпозиции систем с запаздыванием, рассмотрены вопросы модального управления объектами с запаздываниями и приведен обзор огромного числа работ по решению широкого спектра задач, связанных с системами управления с запаздыванием.

Недостатком оптимальных по быстродействию алгоритмов управления для объектов с запаздыванием, особенно высокого порядка, является их сложность и связанная с этим трудность, а порой и невозможность, их практической реализации. Кроме того, при их использовании на конечном участке процесса управления возникают проблемы, связанные с отклонением от оптимальных траекторий и возможностью появления автоколебаний [1]. Недостатком метода синтеза оптимальных по интег-

ральному квадратичному критерию систем управления является нерешенность проблемы, связанная с выбором квадратичной формы в критерии оптимальности, отвечающей заданным прямым показателям качества [5, 6].

Данная статья посвящена алгебраическому методу синтеза регулятора для объекта с чистым запаздыванием. Метод синтеза основан на использовании желаемой передаточной функции. При этом передаточная функция звена чистого запаздывания аппроксимируется дробно-рациональной функцией.

Аппроксимация передаточной функции звена чистого запаздывания дробно-рациональной функцией

Запишем передаточную функцию запаздывающего звена в виде

$$W_{\tau}(s) = e^{-\tau s} = \frac{1}{e^{\tau s}}.$$

Разложив $e^{\tau s}$ в ряд Тейлора и ограничившись тремя первыми членами разложения, получим

$$W_{\tau 1}(s) = \frac{1}{1 + \tau s + 0,5\tau^2 s^2}. \quad (1)$$

Аналогично, представив передаточную функцию запаздывающего звена в виде

$$W_{\tau}(s) = e^{-\tau s} = \frac{e^{-\tau s/2}}{e^{\tau s/2}},$$

разложив числитель и знаменатель в ряд Тейлора и ограничившись двумя и тремя членами разложения, соответственно, получим

$$W_{\tau 2}(s) = \frac{1 - \tau s/2}{1 + \tau s/2}, \quad (2)$$

$$W_{\tau 3}(s) = \frac{1 - \tau s/2 + \tau^2 s^2/8}{1 + \tau s/2 + \tau^2 s^2/8}. \quad (3)$$

Представление передаточной функции в виде (2) называют *аппроксимацией Паде (Pade)*. Частотная передаточная функция запаздывающего звена $W_{\tau}(j\omega)$ и ее первая аппроксимирующая частотная передаточная функция $W_{\tau 1}(j\omega)$ (см. (1)) отличаются между собой как по амплитуде, так и по фазе. В то же время частотная передаточная функция $W_{\tau}(j\omega)$ и аппроксимирующие ее две другие частотные передаточные функции $W_{\tau 2}(j\omega)$ и $W_{\tau 3}(j\omega)$ (см. (2) и (3)) отличаются только по фазе: их амплитудные частотные функции равны между собой. Фазовые частотные функции отличаются, и это отличие возрастает с ростом частоты [7].

Алгебраический метод синтеза передаточной функции регулятора

Вкратце остановимся на алгоритме синтеза передаточной функции регулятора при алгебраическом методе, когда желаемая передаточная функция (ЖПФ) известна. Ниже при записи степеней полиномов они обозначаются буквой n с нижним индексом, указывающим на сам полином. Например, степень полинома $T(s)$ обозначается n_T .

Пусть передаточная функция объекта имеет вид

$$W_o(s) = \frac{P(s)}{Q(s)}.$$

Алгоритм (порядок) синтеза передаточной функции регулятора состоит в следующем [7–9].

1. Проводится факторизация передаточной функции объекта: она представляется в виде

$$W_o(s) = \frac{P^-(s)P^+(s)}{Q^-(s)Q^+(s)},$$

где $P^-(s)$, $Q^-(s)$ — полиномы с левыми нулями; $P^+(s)$, $Q^+(s)$ — полиномы с правыми и нейтральными нулями.

2. Выписываются условия физической осуществимости (реализуемости), грубости и разрешимости, которые, соответственно, имеют следующий вид:

$$n_{Q^-} + n_M \leq n_{P^-} + n_N + r_p; \quad (4a)$$

$$n_G = n_{Q^+} + n_N + r_p; \quad (4б)$$

$$n_G \leq n_M + n_N + 1. \quad (4в)$$

Здесь n_M и n_N — степени неизвестных полиномов $M(s)$ и $N(s)$, определяемых в процессе синтеза; r_p — число интегрирующих звеньев, включаемых в регулятор для обеспечения требуемого порядка астатизма синтезируемой системы; n_G — степень характеристического полинома (знаменателя) ЖПФ.

3. Из приведенных выше трех условий определяются степени n_M и n_N .

4. Выписываются полиномы $M(s)$ и $N(s)$ с неизвестными коэффициентами и составляется полиномиальное уравнение

$$P^+(s)M(s) + Q^+(s)N(s)s^{r_p} = G(s), \quad (5)$$

где $G(s)$ — характеристический полином ЖПФ.

5. Приравняв коэффициенты полиномиального уравнения при одинаковых степенях слева и справа, получаем систему алгебраических уравнений, откуда находим коэффициенты полиномов $M(s)$ и $N(s)$. Передаточная функция регулятора получается при подстановке их и других входящих в факторизованную передаточную функцию объекта полиномов в формулу

$$W_p(s) = \frac{Q^-(s)M(s)}{P^-(s)N(s)s^{r_p}}. \quad (6)$$

Определение желаемой передаточной функции

Прежде всего необходимо определить порядок ЖПФ n_G . Из условий (4) находим

$$n_G - n_Q \geq n_{Q^+} + r_p - 1 - n_{P^-}. \quad (7)$$

Здесь n_Q — порядок передаточной функции объекта.

Передаточная функция синтезируемой системы и, соответственно, ЖПФ имеет вид [7, 8]

$$W_{ж}(s) = \frac{P^+(s)M(s)}{G(s)}. \quad (8)$$

Как отмечалось выше, полином $M(s)$ определяется из полиномиального уравнения (5), в которое входят полиномы передаточной функции объекта и характеристический полином ЖПФ. Поэтому в общем случае числитель ЖПФ заранее не известен, и при определении ЖПФ следует иметь в виду, что ее числитель однозначно определяется ее знаменателем, передаточной функцией объекта и порядком астатизма синтезируемой системы: его нельзя задавать произвольно, стремясь обеспечить требуемые показатели качества.

Из (8) следует, что ЖПФ не имеет нулей, т.е. ее числитель равен константе, если передаточная функция объекта не имеет правых нулей, и $M(s)$ является полиномом нулевой степени (т.е. константой). Степень полинома $M(s)$ удовлетворяет следующему условию:

$$n_M \geq n_{Q^+} - 1 + r_p.$$

Поэтому его степень равна нулю, если передаточная функция объекта имеет не более одного правого полюса и синтезируемая система является статической или при отсутствии правых полюсов порядок астатизма синтезируемой системы не превышает единицы. Сказанное справедливо, если левые нули и полюса передаточной функции объекта полностью компенсируются полюсами и нулями передаточной функции регулятора соответственно.

Нормированная передаточная функция

При определении ЖПФ используется нормированная передаточная функция (НПФ). НПФ — это передаточная функция, у которой в знаменателе коэффициент при старшей степени и свободный член равны единице:

$$W_H(s) = \frac{\tilde{b}_0 q^m + \tilde{b}_1 q^{m-1} + \dots + \tilde{b}_m}{q^n + \tilde{a}_1 q^{n-1} + \dots + 1}.$$

ЖПФ, которая имеет вид

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

получается из НПФ путем постановки $q = \alpha s$, и ее коэффициенты связаны с коэффициентами НПФ соотношениями [7]

$$b_i = \tilde{b}_i \alpha^{m-i}, \quad i = 0, 1, \dots, m; \quad a_0 = \alpha^n, \quad a_k = \tilde{a}_k \alpha^{n-k},$$

$$k = 1, 2, \dots, n-1. \quad (9)$$

Здесь параметр преобразования α связан с временем регулирования t_p ЖПФ и временем регулирования τ_p НПФ соотношением

$$t_p = \alpha \tau_p.$$

Системы управления с НПФ и ЖПФ имеют одинаковый характер переходного процесса, и их перерегулирования равны. Поэтому при определении ЖПФ сначала исходя из требований к характеру переходного процесса и перерегулированию выбирается НПФ и путем моделирования находится ее время регулирования t_p . Затем по требуемому времени регулирования t_p определяется параметр преобразования α .

В качестве основных рассматриваются четыре типа НПФ — передаточные функции с четырьмя типовыми характеристическими нормированными полиномами (знаменателями), которые отличаются между собой набором корней [9, 10]:

- 1) *биномиальный* — полином $(q+1)^n$;
- 2) *колебательный* — полином из произведений $n/2$

трехчленов $(q^2 + 2z_n \beta_n q + \beta_n^2)$ при четном n и произведений $(n-1)/2$ трехчленов $(q^2 + 2z_n \beta_n q + \beta_n^2)$ и одного двучлена $(q + \alpha_n)$ при нечетном n ;

3) *арифметический* — полином, корни которого образуют арифметическую прогрессию;

4) *геометрический* — полином, корни которого образуют геометрическую прогрессию.

Первый член a и разность d прогрессии корней арифметического нормированного полинома n -го порядка связаны соотношением [8, 9]

$$a(a+d)(a+2d)\dots(a+(n-1)d) = 1.$$

Первый член a и знаменатель q прогрессии корней геометрического нормированного полинома связаны соотношением

$$a^n q^{(n-1)n/2} = 1, \quad \text{или} \quad q = 1/a^{2/(n-1)}.$$

При первом члене $a = 1$ арифметический и геометрический полиномы обращаются в биномиальные. У арифметических и геометрических НПФ, полюса которых образуют возрастающие прогрессии, первый член представляет собой степень устойчивости, у тех же НПФ, полюса которых образуют убывающие прогрессии, последний член — степень устойчивости. НПФ, полюса которых образуют возрастающие арифметические и геометрические прогрессии, совпадают с одноименными НПФ, полюса которых составляют убывающие прогрессии, если они имеют одинаковую степень устойчивости.

Если синтезируемая система не имеет нулей, то следует использовать биномиальную или колебательную НПФ, в противном случае (при наличии левых нулей) — геометрическую или арифметическую НПФ [9, 10].

Определение алгоритма управления с помощью аппроксимирующей передаточной функции $W_{\tau 2}(s) = (2 - \tau s)/(2 + \tau s)$

Пусть передаточная функция объекта имеет вид

$$W_{\tau}(s) = \frac{R(s)}{T(s)s^{r_0}} e^{-\tau s},$$

где $R(s)$ и $T(s)$ — полиномы с левыми нулями степени m и n ($m \leq n$) соответственно, $r_p \leq 1$. Сначала рассмотрим синтез системы управления с использованием второй аппроксимирующей передаточной функции звена чистого запаздывания (аппроксимацию Паде)

$$W_{\tau 2}(s) = \frac{2 - \tau s}{2 + \tau s} = \frac{1 - (\tau/2)s}{1 + (\tau/2)s}.$$

При этом передаточная функция объекта принимает вид

$$W_{o2}(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{R(s)(2 - \tau s)}{T(s)s^{r_0}(2 + \tau s)}.$$

Проведем факторизацию.

$$P^-(s) = R(s); \quad P^+(s) = 2 - \tau s;$$

$$Q^-(s) = T(s)(2 + \tau s); \quad Q^+(s) = s^{r_0}.$$

Степени полученных полиномов равны

$$n_{P^-} = m, \quad n_{P^+} = 1, \quad n_{Q^-} = n + 1, \quad n_{Q^+} = r_0,$$

$$n_Q = n + r_0 + 1.$$

Далее принимаем, что объект имеет одно интегрирующее звено ($r_0 = 1$), и синтезируемая система является астатической с астатизмом первого порядка. Поэтому регулятор не должен содержать интегрирующего звена: $r_p = 0$.

В этом случае условие (7) принимает вид

$$n_G - (n + 2) \geq -n_{P^-},$$

и для степени характеристического полинома ЖПФ получаем

$$n_G = (n + 2) - n_{P^-}. \quad (10)$$

Условия физической реализуемости, грубости и разрешимости (4) принимают вид

$$n + 1 + n_M \leq m + n_N;$$

$$(n + 2) - n_{P^-} = 1 + n_N;$$

$$(n + 2) - n_{P^-} \leq n_M + n_N + 1.$$

Отсюда находим

$$n_N = n + 1 - n_{P^-}, n_M = 0. \quad (11)$$

Далее выбирается НПФ степени n_G , и определяется характеристический полином $G(s)$ ЖПФ (см. (9)). Затем выписываются полиномы $M(s)$ и $N(s)$ с неизвестными коэффициентами, и составляется полиномиальное уравнение, откуда находятся коэффициенты указанных полиномов. Подставив найденные и другие входящие в (6) полиномы, получим искомую передаточную функцию регулятора.

В качестве конкретного примера рассмотрим задачу синтеза регулятора для управления технологическим процессом окисления серы, на примере которой исследуем качество системы управления, синтезируемой с помощью принятой аппроксимации передаточной функции звена чистого запаздывания, и зависимость показателей качества (время регулирования и перерегулирования) от параметра преобразования α .

Математическую модель указанного процесса по основному каналу "расход серы — температура газа" с учетом запаздывания и ограничения на скорость перемещения исполнительного механизма можно представить в виде [1]

$$W_{\tau}(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{(T_0 s + 1)s}. \quad (12)$$

Запаздывание и постоянная времени принимаются равными соответственно значениям $\tau = 0,6$ и $T_0 = 0,95$, передаточный коэффициент $K = 0,8$. При принятой выше аппроксимации передаточной функции запаздывающего звена передаточная функция объекта принимает вид

$$W_{o2}(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{0,8(1 - 0,3s)}{(1 + 0,3s)(0,95s + 1)s}.$$

В данном случае $R(s) = 0,8$, $T(s) = 0,95s + 1$ и

$$P^-(s) = 0,8; P^+(s) = 1 - 0,3s;$$

$$Q^-(s) = (1 + 0,3s)(0,95s + 1); Q^+(s) = s.$$

Степени полиномов принимают следующие значения:

$$n_R = m = 0, n_T = n = 1, \\ n_{P^-} = 0, n_{P^+} = 1, n_{Q^-} = 2, n_{Q^+} = 1, n_Q = 3.$$

Соответственно имеем (см. (10) и (11))

$$n_G = 3, n_M = 0, n_N = 2.$$

В качестве НПФ принимаем биномиальную НПФ

$$W_H(s) = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}.$$

Выбор такой НПФ связан с желанием получить моно-

тонный переходный процесс, если это возможно для систем с запаздыванием. Характеристический полином ЖПФ принимает вид (см. (9))

$$G(s) = \alpha^3 s^3 + 3\alpha^2 s^2 + 3\alpha s + 1.$$

Положив

$$M(s) = b, N(s) = c_0 s^2 + c_1 s + c_2,$$

для полиномиального уравнения получаем (см. (5))

$$(1 - 0,3s)b + (c_0 s^2 + c_1 s + c_2)s = \\ = \alpha^3 s^3 + 3\alpha^2 s^2 + 3\alpha s + 1.$$

Отсюда находим

$$M(s) = 1, N(s) = \alpha^3 s^2 + 3\alpha^2 s + 3\alpha + 0,3.$$

Передаточная функция регулятора принимает вид (см. (6))

$$W_p(s) = \frac{(1 + 0,3s)(0,95s + 1)}{0,8(\alpha^3 s^2 + 3\alpha^2 s + 3\alpha + 0,3)}.$$

При ее преобразовании к виду, удобному для моделирования в системе Simulink MatLab, получим

$$W_p(s) = \frac{k(s + 3,33)(s + 0,0526)}{s^2 + d_1 s + d_2},$$

где

$$k = 0,285/(0,8\alpha^3), d_1 = 3/\alpha, d_2 = (3\alpha + 0,3)/\alpha^3.$$

Ниже приводятся значения параметров передаточной функции регулятора при разных значениях коэффициента преобразования:

$$k = 0,356, d_1 = 3, d_2 = 3,33 \text{ при } \alpha = 1;$$

$$k = 0,844, d_1 = 4, d_2 = 6,044 \text{ при } \alpha = 0,75;$$

$$k = 2,85, d_1 = 6, d_2 = 14,40 \text{ при } \alpha = 0,5;$$

$$k = 22,8, d_1 = 12, d_2 = 67,2 \text{ при } \alpha = 0,25;$$

$$k = 356,2, d_1 = 30, d_2 = 600 \text{ при } \alpha = 0,1.$$

На рис. 1 представлена схема моделирования в Simulink при $\alpha = 0,5$. Ввиду отсутствия в указанном пакете моделирования колебательного звена для набора передаточной функции регулятора звено с передаточной функцией вида

$$(s + \beta)/(s + \gamma)$$

охватывается отрицательной обратной связью звеном с аналогичной передаточной функцией.

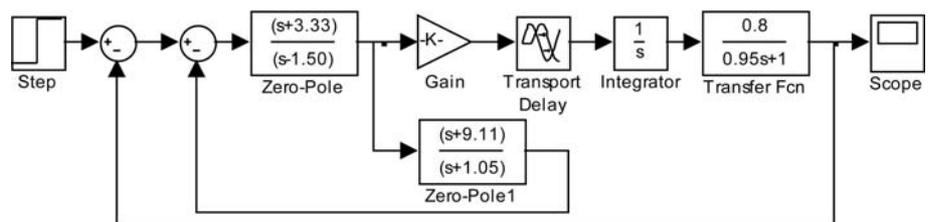


Рис. 1

Таблица 1

Характеристика	Значение				
	1	0,75	0,5	0,25	0,1
Переходный процесс	Монотонный	Монотонный	Монотонный	Аперриодический	Колебательный
Время регулирования	7,5	6	4,25	3,75	4,3
Перерегулирование	0	0	0	3	50

Результаты моделирования представлены в табл. 1.

При синтезе систем управления без запаздывания, если параметр преобразования α уменьшается в два раза, то в два раза уменьшается время регулирования синтезируемой системы управления. Однако при наличии запаздывания в объекте управления и синтезе системы управления с помощью аппроксимирующих передаточных функций звена чистого запаздывания, как следует из табл. 1, при уменьшении коэффициента преобразования α время регулирования уменьшается, но не пропорционально изменению α . Более того, с какого-то момента меняется характер переходного процесса, и время регулирования увеличивается. При дальнейшем уменьшении коэффициента α синтезированная система становится неустойчивой. Строго говоря, все эти рассуждения справедливы до тех пор, пока не наступит ограничение на управление.

Определение алгоритма управления с помощью других аппроксимирующих передаточных функций

Выполним синтез системы управления с запаздыванием и проведем исследование на рассмотренном выше примере управления технологическим процессом окисления серы с помощью двух других аппроксимирующих передаточных функций запаздывающего звена (1) и (3). Начнем с первой аппроксимирующей передаточной функции

$$W_{\tau 1}(s) = \frac{1}{1 + \tau s + 0,5\tau^2 s^2}.$$

Передаточная функция объекта (12) с учетом численных значений параметров принимает вид

$$W_{\tau}(s) = \frac{0,8e^{-0,6s}}{(0,95s + 1)s}.$$

Поэтому аппроксимирующая передаточная функция объекта имеет вид

$$W_{01}(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{0,8}{(0,18s^2 + 0,6s + 1)(0,95s + 1)}.$$

При ее факторизации получим

$$P^- = 0,8; P^+ = 1;$$

$$Q^- = (0,18s^2 + 0,6s + 1)(0,95s + 1); Q^+ = s.$$

Степени полиномов, соответственно, принимают следующие значения:

$$n_{P^-} = 0, n_{P^+} = 0, n_{Q^-} = 3, n_{Q^+} = 1, n_Q = 4.$$

Так как синтезированная система должна обладать астатизмом 1-го порядка, и объект содержит интегрирующее звено, то регулятор не должен содержать интегрирующее звено: $r_p = 0$. Из (7) следует, что минимальная степень n_G характеристического полинома ЖПФ должна быть равна порядку передаточной функции объекта

$$n_G = n_Q = 4.$$

Выбрав в качестве НПФ биномиальную НПФ

$$W_H(s) = \frac{1}{s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1},$$

из (9) для коэффициентов характеристического полинома ЖПФ получим

$$a_0 = \alpha^4; a_1 = 4\alpha^3; a_2 = 6\alpha^2; a_3 = 4\alpha; a_4 = 1.$$

Соответственно, характеристический полином ЖПФ принимает вид

$$G(s) = \alpha^4 s^4 + 4\alpha^3 s^3 + 6\alpha^2 s^2 + 4\alpha s + 1.$$

Из условия физической осуществимости, грубости и разрешимости (4) находим

$$n_N = 3, n_M = 0.$$

Положив

$$M(s) = b, N(s) = c_0 s^3 + c_1 s^2 + c_2 s + c_3,$$

составим полиномиальное уравнение (см. (5)).

$$\begin{aligned} b + s(c_0 s^3 + c_1 s^2 + c_2 s + c_3) = \\ = \alpha^4 s^4 + 4\alpha^3 s^3 + 6\alpha^2 s^2 + 4\alpha s + 1. \end{aligned}$$

Отсюда по указанной выше методике находим

$$M(s) = 1, N(s) = \alpha^4 s^3 + 4\alpha^3 s^2 + 6\alpha^2 s + 4\alpha.$$

Подставив эти и другие входящие в (6) полиномы, для передаточной функции регулятора получим

$$W_p(s) = \frac{(0,18s^2 + 0,6s + 1)(0,95s + 1)}{0,8(\alpha^4 s^3 + 4\alpha^3 s^2 + 6\alpha^2 s + 4\alpha)}.$$

Преобразуем ее к виду, удобному для моделирования в Simulink:

$$W_p(s) = \frac{k(s^2 + 3,33s + 5,56)(s + 1,0526)}{(s^2 + d_1 s + d_2)(s + \delta)}.$$

Здесь

$$k = 0,676; d_1 = 2,667; d_2 = 3,555; \delta = 2,667 \text{ при } \alpha = 0,75;$$

$$k = 3,42; d_1 = 4; d_2 = 8; \delta = 4 \text{ при } \alpha = 0,5;$$

$$k = 54,72; d_1 = 8; d_2 = 32; \delta = 8 \text{ при } \alpha = 0,25;$$

$$k = 2138; d_1 = 20; d_2 = 200; \delta = 20 \text{ при } \alpha = 0,1.$$

Схема моделирования приведена на рис. 2. При $\alpha = 0,75$ моделирование в Simulink не удастся, так как нули и полюса передаточных функций звеньев, которые используются для получения модели регулятора, получаются комплексными.

Результаты моделирования представлены в табл. 2.

Сравнительный анализ результатов моделирования системы управления, синтезированной с помощью второй аппроксимирующей передаточной функции (см. табл. 1), с результатами моделирования той же системы управления, синтезированной с помощью первой аппроксимирующей передаточной функции (табл. 2), показывает, что качество системы управления получается лучшим при использовании второй аппроксимирующей передаточной функции запаздывающего звена: время регулирования меньше и перерегулирование и неустойчивость наступают при меньших значениях коэффициента преобразования.

Наконец, кратко остановимся на исследовании системы управления, синтезируемой с помощью третьей аппроксимирующей передаточной функции запаздывающего звена (см. (3)), не останавливаясь на выводе передаточной функции регулятора, которая имеет следующий вид:

$$W_p(s) = \frac{(0,045 + 0,3s + 1)(0,95s + 1)}{0,8(\alpha^4 s^3 + 4\alpha^3 s^2 + (6\alpha^2 - 0,045)s + 4\alpha + 0,3)}$$

или после преобразования

$$W_p(s) = \frac{k(s^2 + 6,667s + 2,222)(s + 1,0526)}{(s^2 + d_1s + d_2)(s + \delta)}$$

где

$$k = 0,169; d_1 = 2,360; d_2 = 3,507; \delta = 2,973$$

при $\alpha = 0,75$;

$$k = 0,855; d_1 = 3,281; d_2 = 7,798; \delta = 4,719$$

при $\alpha = 0,5$;

$$k = 13,68; d_1 = 4,912; d_2 = 30,015; \delta = 11,088$$

при $\alpha = 0,25$;

$$k = 534,4; d_1 = -0,557; d_2 = 172,6; \delta = 40,56$$

при $\alpha = 0,1$.

Схема моделирования имеет такой же вид, что и при использовании первой аппроксимирующей

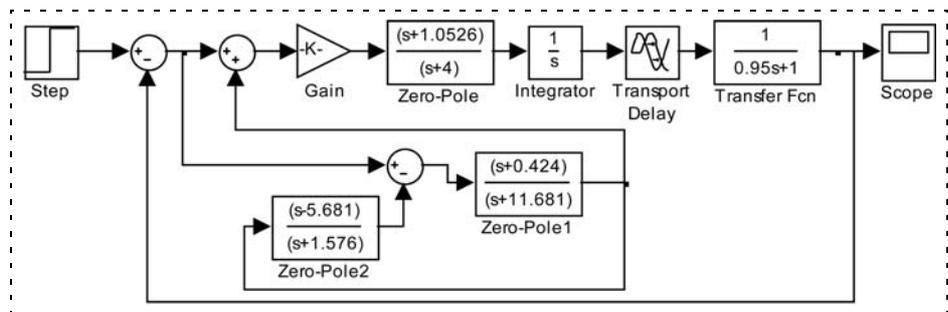


Рис. 2

передаточной функции (рис. 2). По той же причине, что и при рассмотрении моделирования регулятора, полученного с помощью первой аппроксимирующей передаточной функции, моделирование системы управления, синтезированной с помощью третьей аппроксимирующей передаточной функции, при $\alpha = 0,75$ и $\alpha = 0,5$ в Simulink не удастся. Исследование проводили только при $\alpha = 0,25$ и $\alpha = 0,1$. При $\alpha = 0,25$ переходный процесс получился монотонным, время регулирования 3,25 (меньше, чем в двух других случаях). Однако уже при $\alpha = 0,1$ система становится неустойчивой.

Заключение

Предложенный алгебраический метод синтеза систем управления с транспортным запаздыванием, основанный на использовании аппроксимирующих передаточных функций запаздывающего звена, позволяет получить хорошие показатели качества. При этом на этапе синтеза, варьируя коэффициент преобразования нормированной передаточной функции в желаемую, можно менять характер переходного процесса и показатели качества синтезируемой системы управления.

Список литературы

1. Клюев А. С., Карпов В. С. Синтез быстродействующих регуляторов для объектов с запаздыванием. М.: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 1990. 176 с.
2. Громов Ю. Ю., Земской Н. А., Лагутин Ф. В., Иванова О. Г., Тютюник И. М. Системы автоматического управления с запаздыванием. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2007. 76 с.
3. Янушевский Р. Т. Управление объектами с запаздыванием. М.: Наука, 1978. 416 с.
4. Филимонов А. Б. Спектральная декомпозиция систем с запаздыванием. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 288 с.
5. Легов А. М. Динамика полета и управление. М.: Наука, 1969. 359 с.
6. Филимонов Н. Б. Проблема качества процессов управления: смена оптимизационной парадигмы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 12. С. 2—10.
7. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 287 с.
8. Ким Д. П. Алгебраический метод синтеза линейных непрерывных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 1. С. 9—15.
9. Ким Д. П. Определение желаемой передаточной функции при синтезе систем управления алгебраическим методом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 5. С. 15—21.
10. Ким Д. П. Алгебраические методы синтеза непрерывных систем управления. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 74 с.

Таблица 2

Характеристика	Значение		
	0,5	0,25	0,1
α	0,5	0,25	0,1
Переходный процесс	Моно-тонный	Колеба-тельный	Незатухающие колебания
Время регулирования	5	4,25	—
Перерегулирование	0	7	—

И. В. Некрасов,канд. техн. наук, ведущий специалист,
ivannekr@mail.ru,ООО "НИИ Транспорта нефти
и нефтепродуктов", г. Москва

Многошаговая оптимизация дискретного процесса управления методом ограниченного перебора возможных состояний системы

Обсуждаются методы синтеза оптимального управления дискретными динамическими объектами с использованием управляющих микропроцессорных устройств. Проведен синтез программно-позиционной стратегии, лежащей в основе программы управляющего микропроцессора. Для реализации процедуры вычисления оптимального управления разработан метод ограниченного перебора возможных состояний объекта, реализующий принцип последовательного улучшения текущего приближенного решения на каждой итерации.

Ключевые слова: дискретные системы, оптимальное управление, программно-позиционная стратегия, методы перебора, метод деления отрезка пополам

Введение

В настоящее время подавляющее большинство систем управления строятся с применением вычислительных средств: всевозможные промышленные контроллеры, управляющие ЭВМ, бортовые вычислительные машины и пр. широко используются для реализации алгоритмов управления, учитывающих информацию о фактическом состоянии управляемого объекта. При этом генерируемое в реальном масштабе времени дискретное управление представляет собой многошаговый процесс циклического регулирования, характеризующийся на каждом шаге управляющим воздействием и соответствующим состоянием [1]. Оптимальный закон управления составляется из управляющих воздействий, найденных непосредственно во время переходного процесса для малых интервалов времени.

Оптимизация законов управления микропроцессорными средствами требует разработки алгоритмов, способных обеспечить качественный синтез дискретных управляющих воздействий [2]. В общем случае процедура синтеза подобных алгоритмов оптимального управления опирается на аппарат описания дискретных систем в пространстве состояний [20], а конкретная реализация вычислительной программы управляющего микропроцессора определяется постановкой задачи и спецификой управляемого объекта. Приведем основные стратегии управления дискретными системами, предложенные в последние годы.

Одним из наиболее развитых средств решения задач дискретного управления является метод динамического программирования и его вариации. В частности, данный подход развит в алгоритмах управления, предложенных в работах [2, 3]. Схожая задача оптимального управления дискретной нелинейной системой с накопительным критерием качества была решена в статье [4] с помощью разработанного автором метода конечного состояния.

В работе [5] был разработан алгоритм вычисления оптимального управления линейной дискретной системой по критерию максимального быстродействия с использованием псевдообратной матрицы. В статье [6] был предложен метод синтеза управлений по локальным критериям оптимальности. На его основе автором синтезирован динамический закон локально-оптимального дискретного управления по смешанному критерию.

В связи с тем, что задача оптимального управления в дискретной постановке может быть сведена к задаче об экстремуме функции многих переменных [16, 17], большой популярностью пользуются стратегии управления, осуществляющие расчет текущего управляющего воздействия методами математического программирования. В частности, в работе [7] рассмотрена задача позиционного управления в линейно-выпуклой системе. Алгоритм дискретного управления нелинейной системой, основанный на решении задачи полиэдрального программирования, представлен в статье [8]. Аналогичная задача оптимального управления дискретной системой относительно квадратичного критерия качества решена в работе [9] градиентным методом.

Общая идеология всех перечисленных решений проявляется в том, что управляющий микропроцессор на каждом такте своей работы решает локальную задачу оптимального управления, учитывающую текущее состояние объекта. При этом формируется локальная целевая функция, аргументами которой являются искомые значения управляющего воздействия на каждом из рассматриваемых тактов управления, а текущие и целевые значения переменных состояния объекта входят в нее в качестве числовых параметров [6, 8, 9].

Постановка и формализация задачи управления дискретной системой

Обратимся к классической задаче терминального дискретного управления динамической системой. Пусть динамика объекта описывается разностными уравнениями вида [20]

$$\mathbf{x}(N) = \Phi^N \mathbf{x}(0) + \sum_{k=0}^{N-1} \Phi^{N-k-1} \Gamma u(k), \quad (1)$$

где $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$ — вектор состояния системы; $u(k)$, $k = \overline{0, N-1}$, — скалярное управляющее воздействие системы; N — номер конечного такта управления, рассматриваемого в локальной задаче

дискретного оптимального управления, часто имеваемый горизонтом прогноза; Φ — $(n \times n)$ -матрица перехода; Γ — $(n \times 1)$ -матрица управления; n — порядок объекта.

Задача терминального управления представляет собой задачу перевода объекта из текущего состояния $\mathbf{x}(0)$ в целевое состояние \mathbf{x}^* . В качестве критерия оптимальности примем минимум отклонения от целевого состояния системы, представленный в виде невязки:

$$J(k) = |x_1(k) - x_1^*| + \dots + |x_n(k) - x_n^*| \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $x_i(k)$ — текущие значения переменных состояния объекта, $i = \overline{1, n}$; x_i^* — целевые значения переменных состояния объекта; k — номер текущего такта управления; n — порядок объекта управления.

Задачу управления будем рассматривать в условиях ресурсных ограничений, накладываемых на управляющее воздействие $u \in [-M; +M]$.

Применение перебора для решения задачи цифрового оптимального управления

Согласно описанной методике сформулируем задачу цифрового оптимального управления дискретной системой: найти последовательность управляющих воздействий $u(k)$, $k = \overline{0, N-1}$, которая в соответствии с уравнением (1) переводит объект управления из текущего состояния $\mathbf{x}(0)$ в целевое состояние \mathbf{x}^* , доставляя минимум целевой функции (2).

При решении данной задачи на каждом такте управления k осуществляется поиск значения управляющего сигнала $u(k)$. Схема управления в данном случае имеет вид, представленный на рис. 1. Здесь ОУ — объект управления; ЦУУ — цифровое управляющее устройство, осуществляющее на каждом такте функционирования выработку управляющего воздействия согласно заложенной в него программной реализации закона управления; k — номер текущего такта управления; N — номер конечного такта управления, рассматриваемого в локальной задаче дискретного оптимального управления; \mathbf{x}^* — вектор целевого состояния системы; $\mathbf{x}(k-1)$ — вектор состояния системы, измеренный на предшествующем такте управления; $u(k)$ — управляющее воздействие на текущем такте.

Очевидно, что способ решения локальной задачи оптимального дискретного управления на каждом такте определяется в основном видом целевой функции J . В частности, в работе [8] задача диск-

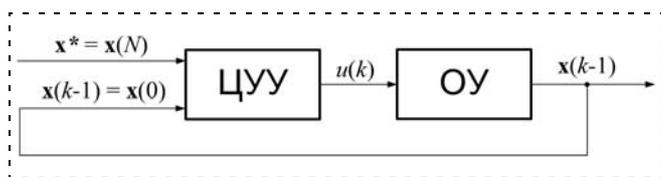


Рис. 1. Схема оптимального управления с использованием цифрового устройства

ретного оптимального управления относительно модульного критерия решена с помощью аппарата полиэдрального программирования. В статье [9] задача управления по состоянию рассматривается как задача минимизации квадратичной функции в каждый момент времени, а для ее решения привлекается градиентный метод. В данной статье предлагается метод ограниченного перебора возможных состояний системы, предназначенный для решения задачи дискретного оптимального управления с любым критерием качества.

Метод перебора может применяться для решения любых оптимизационных задач вне зависимости от вида целевой функции J , а также наличия фазовых и ресурсных ограничений. Приведем краткий обзор решений подобного типа. В работе [10] процедуры и алгоритмы с элементами перебора применяются для уточнения параметров релейного экстремального управления, найденного на основе принципа максимума. Автором предложен метод оценки моментов переключений для релейного управления с критерием максимального быстродействия. В работе [11] данная задача сведена к эквивалентной задаче перебора значений амплитуды финитного управления, форма которого в предельном случае стремится к релейному оптимальному закону.

Более сложный случай обсуждается в статье [12]: рассматривается оптимизация управляющего воздействия по критерию максимизации нормы выходного сигнала системы. Определение моментов переключения релейного управляющего сигнала осуществляется тремя способами — методом прямого поиска, итерационным методом, а также с использованием генетического алгоритма.

Противоположный случай, показывающий невыполнение принципа максимума для дискретных систем, рассмотрен в статье [13]. Автором предложен итерационный алгоритм, обеспечивший улучшение переходного процесса за счет отклонения от экстремали Понтрягина. В работе [14] автором предложена рекуррентная процедура вычисления адаптивного управляющего воздействия, каждый шаг которой основывается на методах нелинейной фильтрации и выпуклого программирования.

Все перечисленные решения с использованием элементов стратегии перебора предложены авторами для улучшения базового решения задачи оптимального управления. В данной статье рассматривается случай, в котором осуществляется многошаговый ограниченный перебор амплитуды управляющих дискретных воздействий, рассматриваемых на некотором горизонте прогноза. Предложенный алгоритм использует схожий принцип последовательного улучшения приближенного решения задачи. Отличительной особенностью предложенной методики является тот факт, что вычисление первого приближения оптимальной фазовой траектории объекта и ее последующее уточнение осуществляются с помощью единого вычислительного алгоритма ограниченного перебора. В отличие от перечис-

ленных решений применение перебора позволяет отказаться от упрощения исходной постановки задачи в части критерия оптимальности и ограничений на переменные состояния.

Синтез алгоритма оптимального управления методом ограниченного перебора

Согласно соотношению (1) состояние объекта на горизонте прогноза N является функцией текущего состояния $x(0)$ и последовательности управляющих воздействий $u(k)$, $k = \overline{0, N-1}$, подаваемых на вход объекта на каждом такте управления. Ограничив множество значений управляющего воздействия двухпозиционным реле с максимально возможной амплитудой $u \in [-M; +M]$, получим множество альтернативных равновозможных историй управления:

$$\begin{cases} u^1(0) \in \{-M, +M\}; \\ \vdots \\ u^1(N) \in \{-M, +M\}. \end{cases} \quad (3)$$

Воспользуемся дискретностью заданного множества управляющих воздействий и построим граф [18] возможных изменений состояния системы (рис. 2).

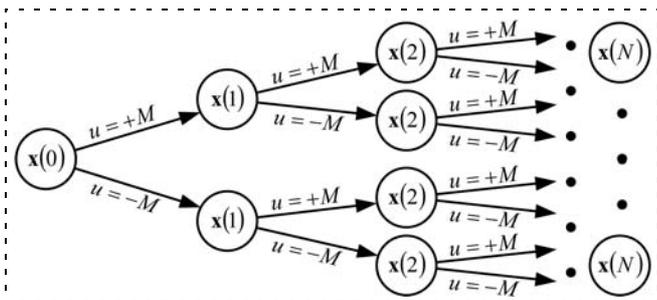


Рис. 2. Дерево вариантов управления в релейном режиме

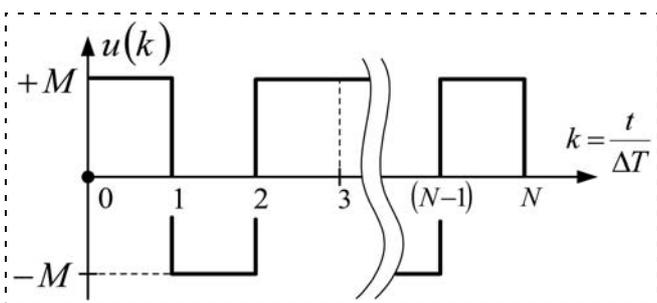


Рис. 3. Решение локальной задачи оптимального управления после первой итерации алгоритма

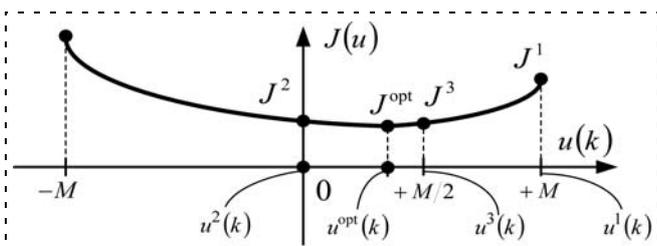


Рис. 4. Применение метода деления отрезка пополам для вычисления $u(k)$

Сравнив значения целевой функции J в листьях дерева, выберем последовательность управляющих воздействий, соответствующую минимальному значению J . Таким образом, полученное прямым перебором приближенное решение локальной задачи оптимального управления представляет собой последовательность из N импульсов¹ фиксированной длительности, равной периоду квантования системы по времени. Управляющие воздействия полученной последовательности могут принимать граничные значения допустимого диапазона, т.е. $u(k) = +M$ или $u(k) = -M$, где $k = \overline{0, N-1}$. Вид управляющего сигнала представлен на рис. 3.

Для уточнения полученного приближения необходимо сузить область поиска оптимальных управляющих воздействий $u(k)$, $k = \overline{0, N-1}$, обновив множество альтернатив (3). Воспользуемся хорошо изученным методом деления отрезка пополам [19] и найдем новые приближения управляющих воздействий на всех рассматриваемых тактах $k = \overline{0, N-1}$. Для этого сократим отрезок поиска каждого $u(k)$ вдвое и вновь ограничим область его определения до двух точек: середина отрезка поиска и приближенное значение $u^1(k)$, найденное на предыдущей итерации алгоритма. При этом множество значений, на котором проводится перебор управляющих воздействий, примет вид

$$\begin{cases} u^2(0) \in \left\{ u^1(0), \frac{-M+M}{2} \right\}; \\ \vdots \\ u^2(N) \in \left\{ u^1(N), \frac{-M+M}{2} \right\}. \end{cases} \quad (4)$$

Заметим, что за одну итерацию длина отрезка поиска $u(k)$, $k = \overline{1, N-1}$, сократилась вдвое. Таким образом, повторив данную процедуру уточнения необходимое число раз, можно достигнуть любой наперед заданной точности определения последовательности оптимальных $u(k)$, $k = \overline{1, N-1}$. На рис. 4 показано, что модуль изменения приближения $u(k)$ на каждой итерации уменьшается в два раза.

При этом общая формула для определения новых границ отрезков поиска $u(k)$ на текущем i -м этапе приближения будет иметь вид

$$\begin{cases} u^{i+1}(0) \in \left\{ u^i(0), \frac{u^i(0)_{\min} + u^i(0)_{\max}}{2} \right\}; \\ \vdots \\ u^{i+1}(N) \in \left\{ u^i(N), \frac{u^i(N)_{\min} + u^i(N)_{\max}}{2} \right\}, \end{cases} \quad (5)$$

¹ N — фиксированный горизонт прогноза локальной задачи оптимального управления.

где

i — номер итерации вычисления управляющих воздействий $u(k)$;

k — номер такта управления, $k = \overline{1, N-1}$;

N — номер конечного такта управления;

$u^i(k)$ — i -е приближение оптимального управляющего воздействия;

$u^i(k)_{\min}, u^i(k)_{\max}$ — нижняя и верхняя границы поиска $u^{\text{opt}}(k)$ на i -й итерации, соответственно.

Общее число итераций, необходимое для достижения некоторой заданной точности вычисления $u^{\text{opt}}(k)$ на каждом такте регулирования, определяется из соотношения

$$\frac{2M}{2^{i_{\max}}} \leq \varepsilon \Rightarrow \frac{2M}{\varepsilon} \leq 2^{i_{\max}},$$

$$\text{откуда } i_{\max} = \log_2\left(\frac{2M}{\varepsilon}\right), \quad (6)$$

где

$2M$ — длина отрезка поиска $u^{\text{opt}}(k)$, $k = \overline{1, N-1}$;

ε — заданная точность определения $u^{\text{opt}}(k)$,

$k = \overline{1, N-1}$;

i_{\max} — число итераций поиска $u^{\text{opt}}(k)$,

$k = \overline{1, N-1}$.

Анализ эффективности предложенного алгоритма методом компьютерного моделирования

Реализуем работу предложенного алгоритма на примере. Рассмотрим задачу управления угловым положением выходного вала электропривода по критерию максимальной точности. Динамическая модель привода задана передаточной функцией и представлена на рис. 5, где $u = M_{\text{упр}}$ — сигнал управления, $u \in [-M; +M]$; $\varphi, \dot{\varphi}$ — угол и угловая скорость поворота выходного вала, соответственно; y — выходной сигнал; k, T, ξ — параметры колебательного звена скоростного контура: коэффициент усиления, постоянная времени, показатель колебательности, соответственно.

Критерий максимальной точности задан функцией $J = |\varphi - \varphi^*| \rightarrow \min$. В качестве переменных состояния выберем выходной сигнал углового положения привода $x_1 = y = \varphi$, а также его первую и вторую производные (сигнал угловой скорости $x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\varphi}$ и углового ускорения $x_3 = \dot{x}_2 = \ddot{x}_1 = \ddot{\varphi}$). Запишем непрерывные уравнения системы в пространстве состояний²:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u,$$

где $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$ — вектор состояния системы; u — скалярное управляющее воздействие системы, $u \in [-M; +M]$; \mathbf{A} — $(n \times n)$ -матрица системы; \mathbf{B} — $(n \times 1)$ -матрица управления; n — порядок объекта.

² Вычисление матриц непрерывной системы \mathbf{A} и \mathbf{B} подробно описано в работе [20].

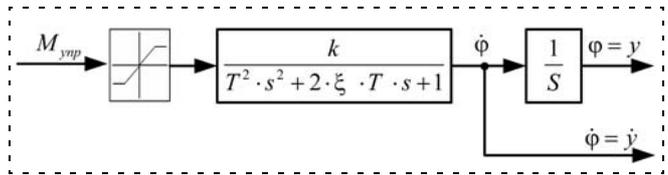


Рис. 5. Структурная схема электропривода

Зададим частоту дискретизации $\nu = 100$ Гц и запишем разностные уравнения системы³:

$$\mathbf{x}(N) = \Phi^N \mathbf{x}(0) + \sum_{k=0}^{N-1} \Phi^{N-k-1} \Gamma u(k),$$

где \mathbf{x} — вектор состояния системы; Φ — матрица системы; Γ — матрица управления; k — номер такта управления; N — горизонт прогноза задачи; $u(k)$ — скалярное управляющее воздействие, ограниченное на каждом такте $u \in [-M; +M]$.

Моделирование проводили для двух вариаций алгоритма перебора возможных состояний: перебор управляющих значений максимальной амплитуды (грубый вариант, рассмотренный в работе [15]), и перебор на переменных альтернативах (вариант с последовательным уточнением фазовой траектории).

Условия моделирования и числовые параметры системы следующие:

$T = 0,1$ с — постоянная времени колебательного звена;

$\xi = 0,3$ — показатель колебательности;

$\nu = 100$ Гц — частота дискретизации системы;

$M = 20$ В — ресурсные ограничения $u \in [-M; +M]$

$\varepsilon = 0,05^\circ$ — точность алгоритма по выходному сигналу привода.

Результаты математического моделирования процессов отработки угловых рассогласований различной амплитуды представлены на рис. 6–9.

На рис. 6, а–г представлены результаты математического моделирования процессов отработки углового рассогласования $\Delta\varphi_0 = 100^\circ$. По результатам моделирования получены следующие показатели:

- для алгоритма перебора максимальной амплитуды $\tau_{\text{пп}} = 5,42$ с, $\Delta\varphi(\tau) = 0,015^\circ$, $\dot{\varphi}(\tau) \approx 1^\circ/\text{с}$;

- для алгоритма перебора на переменных альтернативах $\tau_{\text{пп}} = 5,43$ с, $\Delta\varphi(\tau) = 0,05^\circ$, $\dot{\varphi}(\tau) \approx -0,5^\circ/\text{с}$.

На рис. 7, а–г представлены результаты математического моделирования процессов отработки углового рассогласования $\Delta\varphi_0 = 10^\circ$. По результатам моделирования получены следующие показатели:

- для алгоритма перебора максимальной амплитуды $\tau_{\text{пп}} = 1,02$ с, $\Delta\varphi(\tau) = -0,02^\circ$, $\dot{\varphi}(\tau) \approx -1,3^\circ/\text{с}$;

- для алгоритма перебора на переменных альтернативах $\tau_{\text{пп}} = 0,94$ с, $\Delta\varphi(\tau) = -0,05^\circ$, $\dot{\varphi}(\tau) \approx -0,6^\circ/\text{с}$.

На рис. 8, а–г представлены результаты математического моделирования процессов отработки

³ Вычисление матриц дискретной системы Φ и Γ подробно описано в работе [20].

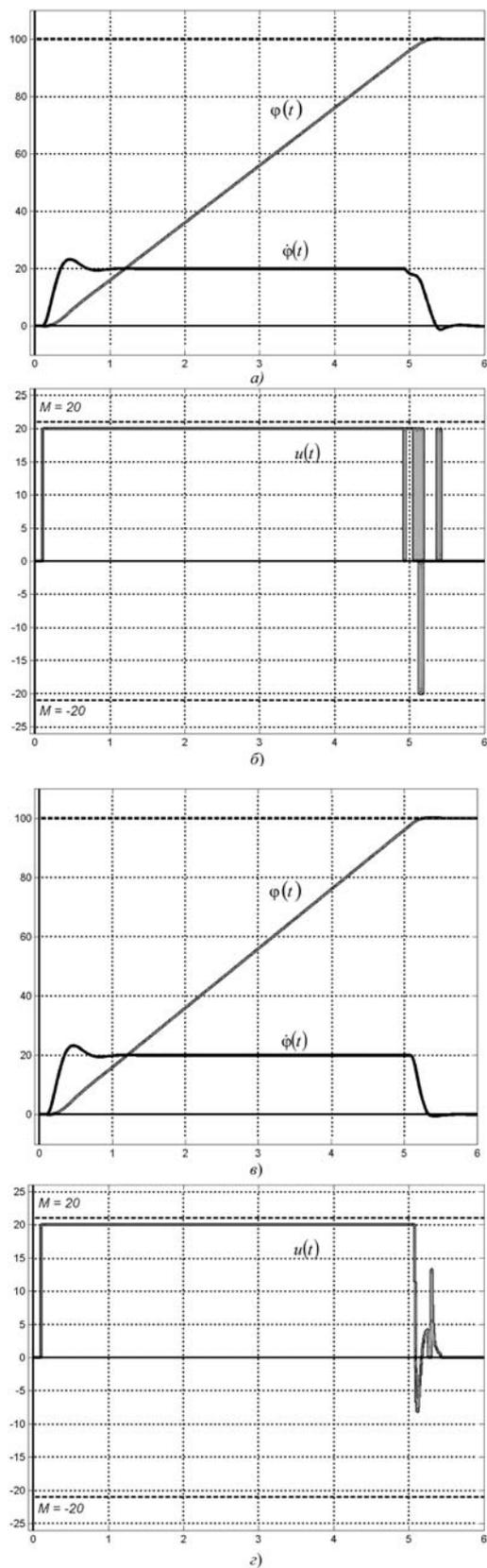


Рис. 6. Результаты математического моделирования процессов обработки углового рассогласования $\Delta\varphi_0 = 100^\circ$:

a — перебор максимальной амплитуды (выходные сигналы);
b — перебор максимальной амплитуды (сигнал управления);
в — перебор на переменных альтернативах (выходные сигналы);
г — перебор на переменных альтернативах (сигнал управления)

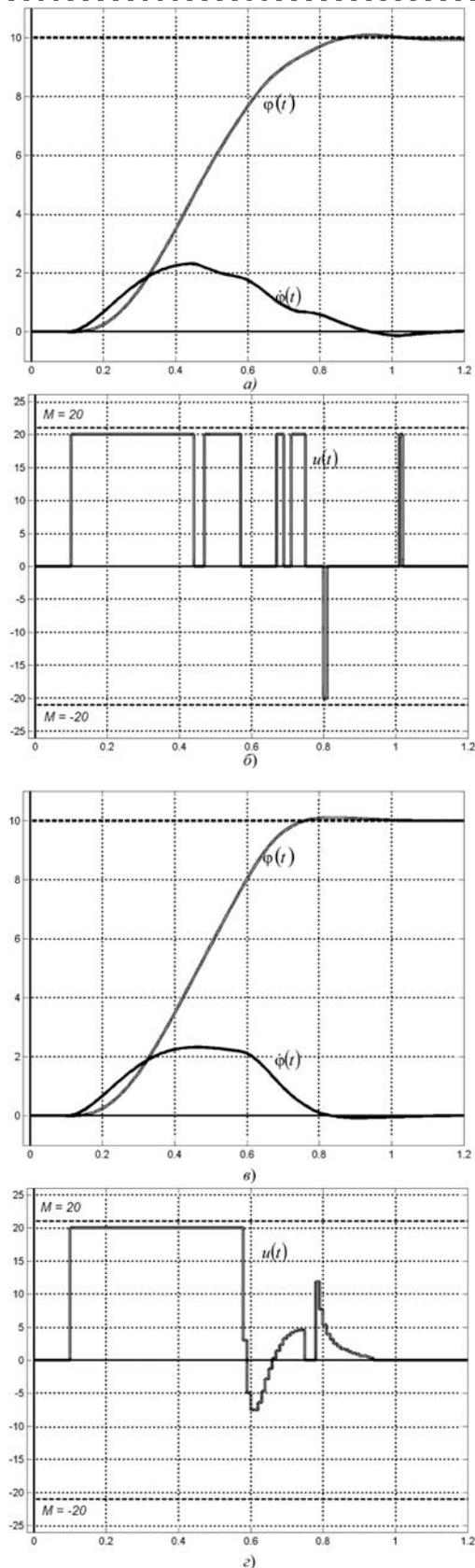


Рис. 7. Результаты математического моделирования процессов обработки углового рассогласования $\Delta\varphi_0 = 10^\circ$:

a — перебор максимальной амплитуды (выходные сигналы);
b — перебор максимальной амплитуды (сигнал управления);
в — перебор на переменных альтернативах (выходные сигналы);
г — перебор на переменных альтернативах (сигнал управления)

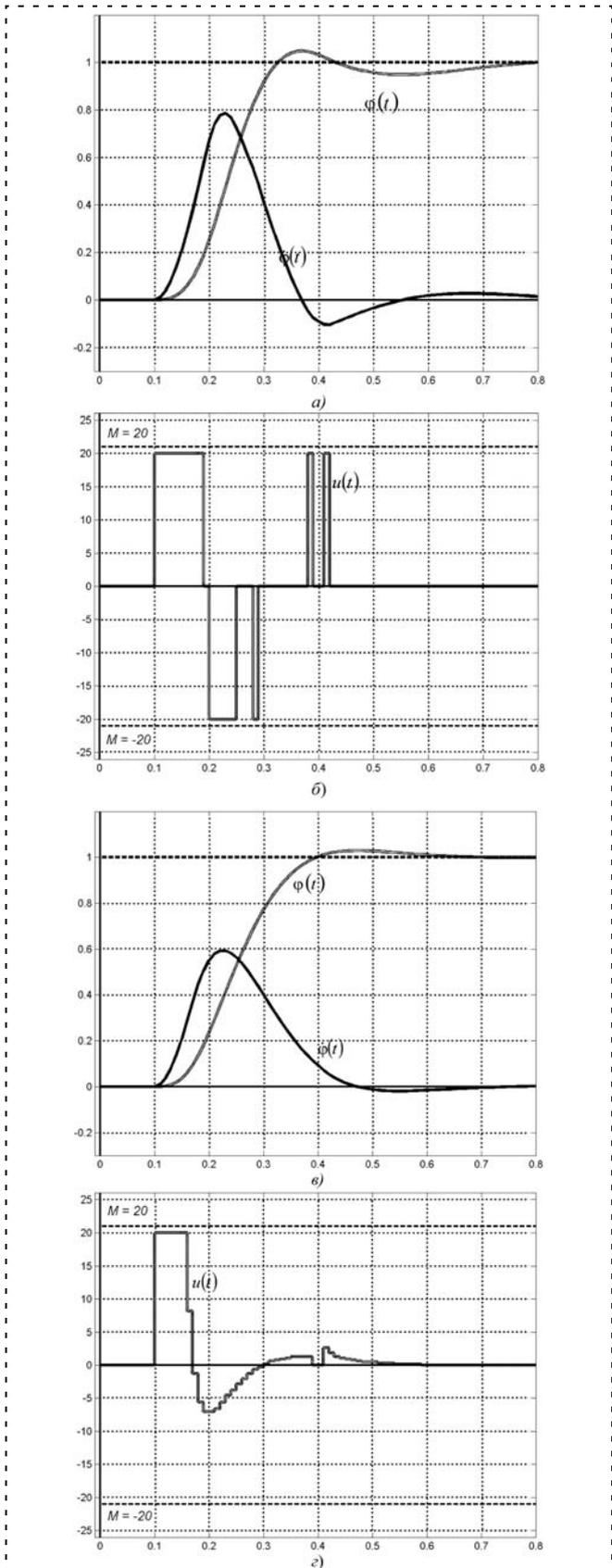


Рис. 8. Результаты математического моделирования процессов отработки углового рассогласования $\Delta\varphi_0 = 1^\circ$:
a — перебор максимальной амплитуды (выходные сигналы);
б — перебор максимальной амплитуды (сигнал управления);
в — перебор на переменных альтернативах (выходные сигналы);
г — перебор на переменных альтернативах (сигнал управления)

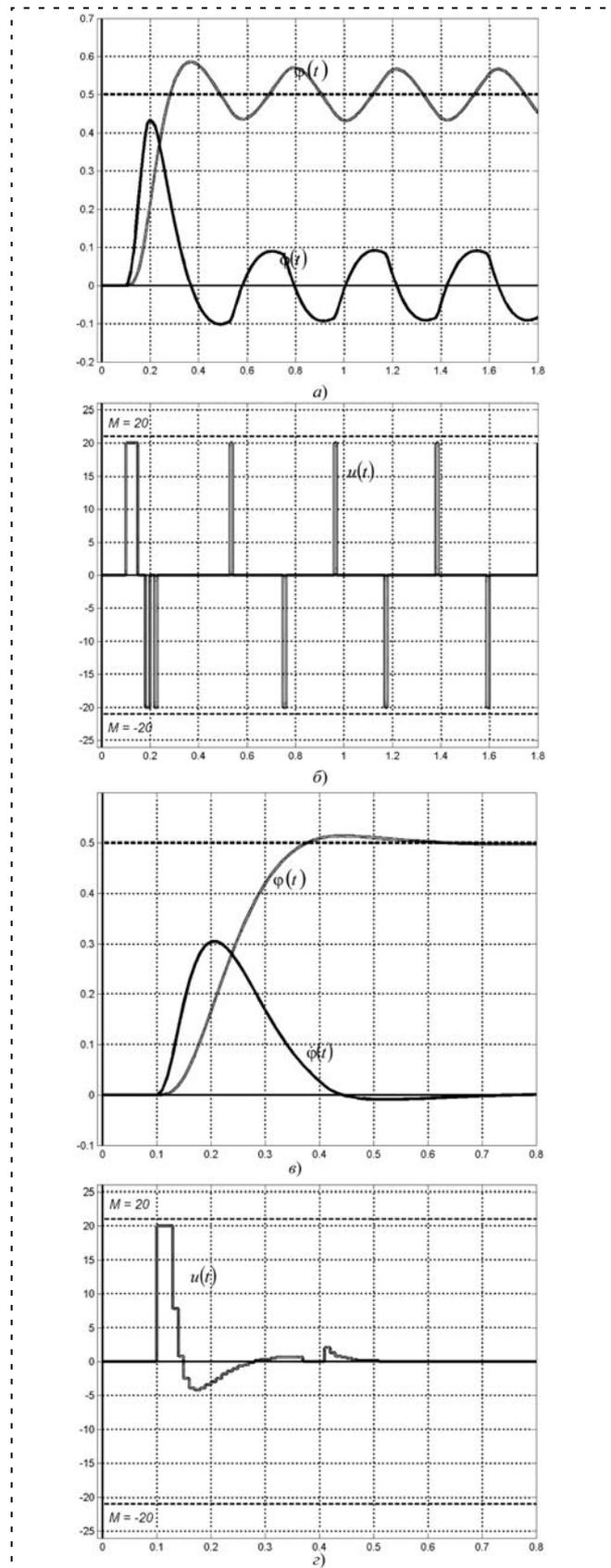


Рис. 9. Результаты математического моделирования процессов отработки углового рассогласования $\Delta\varphi_0 = 0,5^\circ$:
a — перебор максимальной амплитуды (выходные сигналы);
б — перебор максимальной амплитуды (сигнал управления);
в — перебор на переменных альтернативах (выходные сигналы);
г — перебор на переменных альтернативах (сигнал управления)

углового рассогласования $\Delta\varphi_0 = 1^\circ$. По результатам моделирования получены следующие показатели:

- для алгоритма перебора максимальной амплитуды $\tau_{\text{пп}} = 0,42$ с, $\Delta\varphi(\tau) = -0,02^\circ$, $\dot{\varphi}(\tau) \approx -1^\circ/\text{с}$;
 - для алгоритма перебора на переменных альтернативах $\tau_{\text{пп}} = 0,59$ с, $\Delta\varphi(\tau) = -0,01^\circ$, $\dot{\varphi}(\tau) \approx -0,2^\circ/\text{с}$.
- На рис. 9, а–г представлены результаты математического моделирования процессов отработки углового рассогласования $\Delta\varphi_0 = 0,5^\circ$. По результатам моделирования получены следующие показатели:
- для алгоритма перебора максимальной амплитуды автоколебания $T \approx 0,4$ с, $\Delta\varphi = 0,07^\circ$, $\Delta\dot{\varphi} \approx 1^\circ/\text{с}$;
 - для алгоритма перебора на переменных альтернативах $\tau_{\text{пп}} = 0,51$ с, $\Delta\varphi(\tau) = -0,01^\circ$, $\dot{\varphi}(\tau) \approx -0,1^\circ/\text{с}$.

Заключение

Предложенный метод относится к классу алгоритмов оптимизации дискретных многошаговых процессов циклического управления. В работе предложенного алгоритма реализован принцип последовательного улучшения приближенного решения локальной задачи оптимального управления. На каждой итерации алгоритма осуществляется выбор одного из нескольких возможных решений задачи управления, находящихся в узловых точках сетки разбиения. При этом уточнение предыдущего приближения последовательности оптимальных управляющих воздействий осуществляется путем постепенного сужения окрестности поиска с одновременным уменьшением шага сетки. Синтезированный алгоритм представляет собой комбинацию метода прямого перебора с методом деления отрезка пополам.

Как видно из результатов моделирования, предложенный алгоритм ограниченного перебора возможных состояний на переменном множестве альтернатив обеспечивает высокую точность и плавность регулирования (рис. 6–9), в особенности при малых отклонениях системы от целевого состояния.

Список литературы

1. Филимонов Н. Б. Локальный и глобальный аспекты в задачах управления нелинейными объектами // Тр. МВТУ № 513. Системы автоматического управления / Под ред. В. В. Солодовникова. М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1988. С. 3–11.
2. Яковенко П. Г. Методика последовательного многошагового синтеза оптимальных управлений // Известия Томского политехнического университета. 2003. Т. 306. № 2. С. 95–98.

3. Трошина Н. Ю. О решении дискретной линейно-квадратичной задачи оптимального управления // Известия Саратовского университета. 2009. Т. 9. Сер. "Математика. Механика. Информатика". Вып. 4. Ч. 1. С. 52–60.
4. Шушляпин Е. А., Подольская О. Г. Управление терминальными нелинейными дискретными системами методом конечного состояния // Радиотехника, информатика, управление. 2003. № 2 (10). С. 138–143.
5. Сазанова Л. А. Синтез оптимального управления в линейных дискретных системах // Тр. института математики и механики УрО РАН. 2000. Т. 6. № 2. С. 477–496.
6. Смагин С. В. Динамические следящие системы управления выходом объекта при неизвестных возмущениях // Вестник Томского государственного университета. Сер. "Управление, вычислительная техника и информатика". 2008. № 1 (2). С. 28–32.
7. Габасов Р., Кириллова Ф. М., Хомицкая Т. Г. Программное и позиционное решения терминальной линейно-выпуклой задачи оптимального управления // Известия вузов. Математика. 2004. № 12 (511). С. 3–16.
8. Филимонов Н. Б. Оптимизация дискретных процессов управления с полиэдральными критериями качества // Вестник МГТУ. Сер. "Приборостроение". 2000. № 1.
9. Некрасов И. В. Минимизация ошибки управления динамическим объектом по неинтегральному квадратичному критерию качества // Сб. докладов XIX науч.-техн. конф. ОАО "Научно-исследовательский институт приборостроения им. В. В. Тихомирова", г. Жуковский. 2008. С. 287–296.
10. Александров В. М. Оптимальное по быстрдействию управление одним классом нелинейных систем // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2004. № 4. С. 20–57.
11. Александров В. М. Оптимальное по быстрдействию позиционно-программное управление линейными динамическими системами // Сибирские электронные математические известия. 2009. Т. 6. С. 385–439.
12. Мироновский Л. А., Петрова К. Ю. Генетический подход к оптимизации входного сигнала динамической системы // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. Санкт-Петербург. 25–28 мая 1999 г.
13. Бельшев Д. В. Алгоритм улучшения дискретного управления с временным регулятором и его программная реализация // Программные системы: теория и приложения. 2004. С. 349–368.
14. Шориков А. Ф. Адаптивное минимаксное управление процессом преследования в дискретных динамических системах с несколькими преследователями // Тр. института математики и механики УрО РАН. 2005. Т. 11. № 1. С. 225–240.
15. Кукин Н. С., Некрасов И. В. Применение стратегии перебора состояний при оптимизации релейного управления дискретной системой // Известия института инженерной физики. № 20/2011 (Т. 2). Издательство МОУ ИИФ. Серпухов, 2011. С. 28–32.
16. Болтянский В. Г. Оптимальное управление дискретными системами. М.: Наука, 1973. 448 с.
17. Пропой А. И. Элементы теории оптимальных дискретных процессов. М.: Наука, 1973. 256 с.
18. Белоусов А. И., Ткачев С. Б. Дискретная математика. М.: МГТУ им. Баумана, 2006. 744 с.
19. Хемминг Р. В. Численные методы: пер. с англ. под ред. Р. С. Гутера. М.: Наука, 1968. 400 с.
20. Стрейтс В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления: Пер. с англ. под ред. Я. З. Цыпкина. М.: Наука, 1985. 295 с.

УДК 004.82

И. А. Ходашинский, д-р техн. наук, проф.,
hodashn@rambler.ru,

И. В. Горбунов, аспирант,
noby.Ardor@gmail.com,

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Оптимизация параметров нечетких систем на основе модифицированного алгоритма пчелиной колонии¹

Представлен анализ использования алгоритма пчелиной колонии для оптимизации параметров нечетких систем. Выполнена оценка влияния параметров на результаты работы алгоритма. Выявлена зависимость между временем работы алгоритма и его параметрами. Работоспособность и эффективность алгоритма успешно подтверждена серией имитационных экспериментов и рядом тестов.

Ключевые слова: нечеткие системы, оптимизация параметров, алгоритм пчелиной колонии

Введение. Нечеткие системы находят широкое применение при решении задач автоматического управления, распознавания образов, прогнозирования, принятия решений и др. Общеизвестной проблемой при построении нечетких систем является формирование нечеткой базы правил [1]. Часто только экспертного знания бывает недостаточно для автоматизации проектирования нечетких систем. В последнее время для этих целей применяются методы роевого интеллекта, в частности метод роящихся частиц [2–4], методы муравьиной колонии [5–7] и перемещения бактерий [8].

В данной работе для оптимизации параметров нечеткого аппроксиматора применяется алгоритм пчелиной колонии. Алгоритм пчелиной колонии (АПК) — сравнительно новый, но хорошо зарекомендовавший себя инструмент решения сложных, нелинейных проблем оптимизации, основанный на моделировании специфического поведения роя медоносных пчел [9]. Для оптимизации параметров нечетких систем этот алгоритм используется часто. В работе [10] АПК используется для обучения рекуррентной нейронной сети на основе нечеткой системы вывода. Авторы работы [11] при-

менили АПК для настройки параметров нечеткого регулятора. В работе [12] АПК используется для настройки нечетких классификаторов на основе таблиц наблюдений.

Нечеткая система. Базовая концепция нечеткого моделирования заключается в использовании степени принадлежности, которая является эффективным средством описания поведения плохо формализованных объектов, систем и процессов. Построение нечетких моделей возможно на основе наблюдаемых данных, а также с использованием априорного знания и опыта. Основная задача нечеткого моделирования заключается в нахождении конечного множества локальных отношений вход-выход, которые описывают систему или процесс в виде нечетких "IF — THEN" правил.

Предметная область может быть описана посредством лингвистических переменных и правил естественного языка, содержащих качественную оценку ситуации. Основой для описания ситуации является нечеткое высказывание следующего вида:

$$x_i \text{ есть } A_i \text{ или } x_i = A_i,$$

где x_i — некоторая величина; A_i — элемент терм-множества лингвистической переменной из исследуемой предметной области [13].

Кратко опишем работу обобщенной нечеткой системы. На вход поступает вектор четких значений входных переменных, которые преобразуются в нечеткие значения (этап фаззификации). С помощью нечеткой базы правил и машины логического вывода из фаззифицированных значений формируется функция принадлежности выходной переменной, которая операцией дефаззификации преобразуется в действительное число.

Нечеткие правила имеют следующую структуру:

IF <нечеткое описание входных переменных>
THEN <описание выходной переменной>.

В зависимости от того, как представлено описание выходной переменной, различают три основных типа нечетких систем "много входов — один выход".

Нечеткая система типа *сингтон* задается правилами следующего вида:

$$\text{IF } x_1 = A_{1i} \text{ AND } x_2 = A_{2i} \text{ AND } \dots \\ \dots \text{ AND } x_n = A_{ni} \text{ THEN } y = r_i, \quad (1)$$

где A_{ij} — лингвистический терм, которым оценивается входная переменная x_j ; r_i — действительное число, которым оценивается выход y .

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-07-00055).

Модель типа синглтон осуществляет отображение $f: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$, заменяя оператор нечеткой конъюнкции произведением, а оператор агрегации нечетких правил — сложением. Отображение f определяется следующей формулой:

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^R \mu_{A1i}(x_1) \mu_{A2i}(x_2) \cdot \dots \cdot \mu_{Ani}(x_n) r_i / \sum_{i=1}^R \mu_{A1i}(x_1) \mu_{A2i}(x_2) \cdot \dots \cdot \mu_{Ani}(x_n),$$

где \mathbf{x} — входной вектор, R — число правил; n — число входных переменных; μ_{Aij} — функция принадлежности i -й входной переменной.

В нечеткой системе типа Такаги—Сугено правая часть правила задается как линейная функция, определенная на входных переменных. Нечеткая система типа Мамдани в правой части правила содержит нечеткое описание выходной переменной.

Постановка задачи. Рассматривается нечеткая система типа синглтон, которая может быть представлена как

$$y = f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}),$$

где $\boldsymbol{\theta} = \|\theta_1, \dots, \theta_M\|$ — вектор параметров нечеткой системы, y — скалярный выход системы.

Пусть дано множество обучающих данных (таблица наблюдений) $\{(\mathbf{x}_p; t_p), p = 1, \dots, m\}$, тогда среднеквадратические функции ошибки, являющиеся численным критерием адекватности модели, вычисляются по формулам

$$MSE(\boldsymbol{\theta}) = \frac{\sum_{p=1}^m (t_p - f(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\theta}))^2}{m}, \quad (2)$$

$$RMSE(\boldsymbol{\theta}) = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^m (t_p - f(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\theta}))^2}{m}}. \quad (3)$$

Проблема оптимизации параметров нечеткой системы сводится к поиску минимума заданной функции в многомерном пространстве, координаты которого соответствуют параметрам нечеткой системы. В силу того, что поверхность поиска в указанном пространстве может иметь сложный рельеф, методы поиска, основанные на производных, здесь не всегда эффективны. Для решения проблемы минимизации предлагается использовать метаэвристический АПК.

Алгоритм пчелиной колонии относится к классу методов, получивших название "роевой интеллект" и сочетающих в себе биологические и социальные эвристики. Основной задачей данного направления является создание децентрализованных самоорганизующихся систем с приложениями в робототехнике, кибернетике, информатике. Роевой интеллект основан на обратной связи, адаптации к изменяющейся окружающей среде и децентрализованном

взаимодействии между особями. С вычислительной точки зрения роевые алгоритмы — это стохастические методы поиска, в которых эффективно сочетаются нахождение новых решений и улучшение существующих решений. Указанные свойства позволяют избежать ранней сходимости к локальному решению и найти глобальный оптимум. Идея этих метаэвристик основана на том, что каждая особь находится в пространстве поиска возможных решений задачи. Особь меняет свое положение, основываясь на знании трех факторов: текущего положения или приспособленности, предыдущих состояний данной особи, предыдущих состояний соседей данной особи. Для поведения роя характерны следующие признаки: автономность, распределение функций и самоорганизация [14, 15].

Разработка формальных средств оптимизации основана на таких аспектах поведения медоносных пчел в природе, как коммуникативный танец, поиск пищи, коллективное принятие решений, спаривание и выбор местоположения нового улья.

При создании алгоритмов оптимизации наиболее часто имитируют коммуникативный танец и поиск пищи, в частности, эти аспекты поведения пчел лежат в основе таких алгоритмов, как Bees Algorithm [11], Bee colony optimization [16], Artificial Bee Colony (ABC) [17], Virtual Bee Algorithm [18], Bee Hive algorithm [19].

Для описания поведения пчел в природе используются следующие понятия: источник нектара, пчелы-фуражиры, пчелы-разведчики, пчелы-наблюдатели. Источник нектара характеризуется значимостью, определяемой различными факторами, такими как удаленность от улья, концентрация нектара, удобство добычи нектара. Пчелы-фуражиры закреплены за отдельным источником, на котором они добывают нектар. Фуражиры владеют такой информацией о данном источнике нектара, как расстояние и направление от улья, полезность источника. Разведчики ищут новые источники нектара. Пчелы-наблюдатели могут полететь к источнику нектара, следуя за пчелой-разведчиком. Это достигается за счет того, что каждый улей имеет так называемую закрытую площадку для танца, на которой пчелы, обнаружившие источники нектара, выполняют специфический танец, пытаясь привлечь других, незанятых пчел последовать за ними. Механизмы, в соответствии с которыми пчела решает следовать за другой пчелой, исследованы недостаточно, но предполагается, что вербовка пчел с математической точки зрения является функцией качества источника нектара [15].

Представленный далее в статье алгоритм основан на поведении пчел во время добычи пищи и соединяет в себе поисковый подход алгоритма BCO [16], особенности поиска каждого типа пчел алгоритма ABC [17] и элементы их лучших модификаций, таких как вербовка в соответствии с методами селекции генетического алгоритма и выбор решения методом имитации отжига. Алгоритм применяется для

настройки нечеткого аппроксиматора. В качестве источника нектара выступают параметры θ нечеткого правила (1), пригодность которых оценивается среднеквадратической ошибкой.

Алгоритм пчелиной колонии для настройки нечеткого аппроксиматора (АПКНА) настраивает antecedentes (IF-части) нечетких правил, оптимизация консеквентов (THEN-части) выполняется методом наименьших квадратов (МНК) [20].

Ниже приведен собственно алгоритм оптимизации параметров нечеткой системы.

Вход: число итераций *IterMax*, требуемая точность *E*, тип алгоритма формирования популяции *Alg*, тип алгоритма инициализации нечеткой базы правил *Init*.

Выход: вектор θ оптимальных параметров нечеткой системы.

BS — случайные векторы-решения пчел разведчиков.

W — архив решений.

best — лучший вектор-решение.

NW — векторы-решения, формируемые пчелами-фуражирами на основе архива решений.

NB — векторы-решения, формируемые пчелами-наблюдателями на основе **best**-решения.

Шаг 1. Инициализация базы правил нечеткой системы алгоритмом *Init*. Сохранение вектора-решения в **BS**.

Шаг 2. Поиск нектара пчелами-разведчиками — случайный поиск параметров antecedентов на всей области решений задачи. Найденные решения сохраняются в **BS**.

Шаг 3. Оптимизация консеквентов правил из **BS** алгоритмом МНК.

Шаг 4. Танец пчел-разведчиков — формирование алгоритмом отжига из **BS** решений **W**.

Шаг 5. Добыча нектара пчелами-фуражирами — локальный поиск параметров antecedентов на основе архива **W**. Сохранение решений в **NW**.

Шаг 6. Добыча нектара пчелами-наблюдателями — локальный поиск параметров antecedентов на основе лучших решений из архива **W** и **best**-решения. Сохранение решений в **NB**.

Шаг 7. Формирование нового архива решений **W** алгоритмом *Alg* из векторов **NW**, **NB**, **W**.

Шаг 8. ЕСЛИ точность *E* достигнута или превышено число итераций *IterMax*

ТО поиск лучшего решения в **W**, сохранение его как θ , **ВЫХОД**

ИНАЧЕ переход на шаг 2.

В качестве алгоритма *Init* можно использовать инициализацию antecedентов равномерным покрытием, методом экстремумов, методом диффузии и соответствующей инициализацией консеквентов методом ближайшего соседа или МНК [21].

В качестве алгоритма *Alg* можно использовать любой оператор селекции генетического алгоритма. В данной работе используются следующие опера-

торы: бинарные турниры, рулетка, элитарный отбор и случайный выбор.

Исследование алгоритма. Исследование алгоритма оптимизации параметров нечетких систем проводили при решении задач аппроксимации. В качестве тестовых функций были выбраны следующие:

$$1) f(x_1, x_2) = x_1 \sin(x_2), -\pi/2 < x_1, x_2 < \pi/2;$$

$$2) f(x_1, x_2) = \sin(2x_1/\pi) \sin(2x_2/\pi), -5 < x_1, x_2 < 5;$$

$$3) f(x) = (1 + 10 \exp(-100(x - 0,7)^2)) \left(\frac{\sin\left(\frac{125}{x + 1,5}\right)}{x + 0,1} \right),$$

$$0 < x < 1;$$

$$4) f(x_1, x_2) = (1 + x_1^{-2} + x_2^{-1,5})^2, x_1, x_2 \in [1, 5];$$

$$5) f(x_1, x_2, x_3) = 1 + x_1^{0,5} + x_2^{-1} + x_3^{-1,5},$$

$$x_1, x_2, x_3 \in [1, 5].$$

На основе каждой тестовой функции формировали таблицу наблюдений, по которой строили нечеткую систему, аппроксимирующую данную функцию. Критерием качества аппроксимации была среднеквадратическая ошибка вывода.

По умолчанию нечеткая система при исследовании алгоритма пчелиной колонии имеет следующие параметры: равномерное покрытие пятью треугольными термами каждой входной переменной, кроме пятой тестовой функции, переменные которой покрыты тремя термами; на этапе инициализации функции принадлежности двух соседних треугольных термов пересекаются на уровне 0,5. Параметры алгоритма по умолчанию следующие: начальная температура в алгоритме отжига равна 70, коэффициент охлаждения 0,95, алгоритм формирования популяции — бинарные турниры, размер улья — 100, процент пчел разведчиков — 50, число итераций — 100. Для каждого набора параметров тест выполнен 10 раз.

В процессе исследования АПКНА изменяли следующие параметры алгоритма: число итераций, размер улья, процент пчел-разведчиков, начальная температура в алгоритме отжига, коэффициент охлаждения, алгоритм формирования популяции.

На рис. 1 показано динамическое распределение среднеквадратической ошибки (3) лучшего решения в зависимости от процента пчел-разведчиков в улье. При малом проценте пчел-разведчиков алгоритм работает быстрее, однако и ошибка решения в этом случае большая. Большой процент пчел-разведчиков обеспечивает быстрое нахождение перспективных решений, однако в силу того, что пчел-фуражиров недостаточно, улучшить эти решения не всегда удастся. Когда пчел-разведчиков в улье приблизительно столько же, сколько и пчел-фуражиров, алгоритм находит лучшие решения.

Были исследованы четыре алгоритма формирования новой популяции: tournament — бинарные турниры, roulette — рулетка, elite — элитарный и

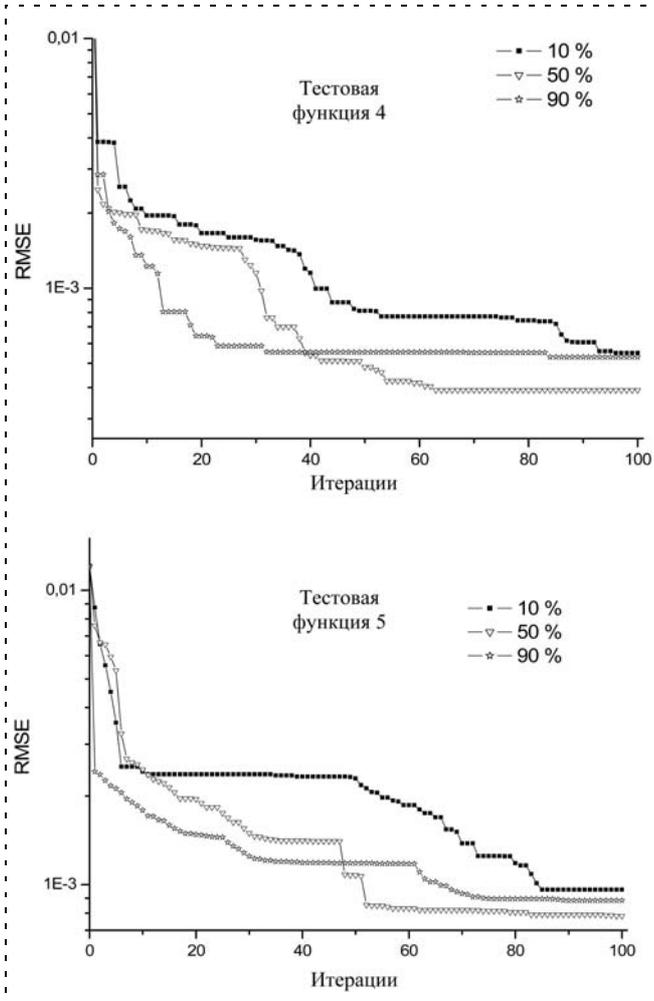


Рис. 1. Динамика изменения ошибки в зависимости от числа разведчиков в популяции

random — случайный. На рис. 2 показано динамическое распределение среднеквадратической ошибки лучшего решения в зависимости от алгоритма формирования популяции. Выделить лучший алгоритм формирования популяции на данных тестовых функциях не представляется возможным. Худшие позиции занимает алгоритм формирования популяции методом случайной выборки. Для настройки нечеткого аппроксиматора немультимодальных тестовых функций (типичный представитель — тестовая функция 1) требуется не более 50 итераций. А для аппроксимации мультимодальных тестовых функций (функция 3) необходимо более 90 итераций.

Размер популяции играет важную роль в ровых алгоритмах, оказывая влияние на точность и время вычисления. Малая популяция приводит к сходимости в локальный оптимум, большая популяция увеличивает время вычисления и ухудшает сходимость. Эксперимент показал, что при аппроксимации второй и третьей тестовых функций этот параметр оказывает влияние только на значениях до 100, для четвертой и пятой тестовых функций влияние параметра незначительно. Разумный компромисс между точностью и временем выполнения для тес-

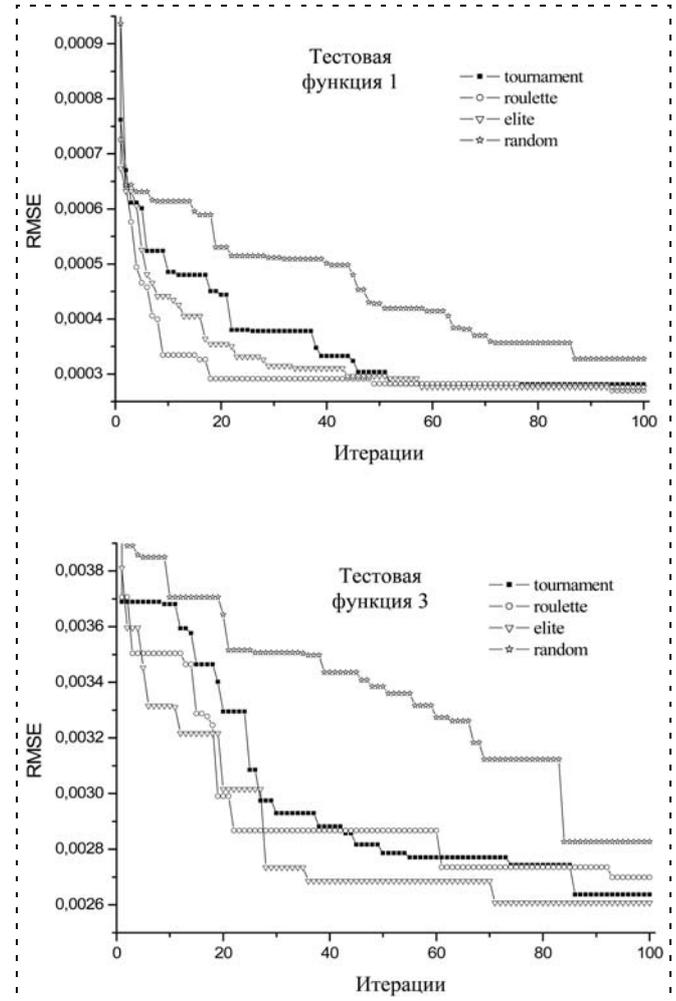


Рис. 2. Динамика изменения ошибки в зависимости от алгоритма формирования популяции

тируемых функций достигается в среднем при 100 единицах.

Эксперимент показал, что такие параметры, как начальная температура и коэффициент охлаждения, существенного влияния на качество решения не оказывают.

Таблица 1
Зависимость времени оптимизации нечеткой системы от параметров алгоритма

Функция	Время от числа итераций i	Время от размера улья s	Время от процента p числа разведчиков в улье
1	$-0,425486 + 0,02661i$ ($R^2 = 0,9986$)	$0,05s$ ($R^2 = 1$)	$0,05p$ ($R^2 = 1$)
2	$-0,1406 + 0,02622i$ ($R^2 = 0,9981$)	$0,05s$ ($R^2 = 1$)	$0,05p$ ($R^2 = 1$)
3	$-0,4778 + 0,007833i$ ($R^2 = 0,9775$)	$-0,21428 + 0,01357s$ ($R^2 = 0,9377$)	
4	$-0,32678 + 0,02623i$ ($R^2 = 0,9988$)	$0,05s$ ($R^2 = 1$)	$0,05p$ ($R^2 = 1$)
5	$-0,535 + 0,05385i$ ($R^2 = 0,9997$)	$-0,47024 + 0,1068s$ ($R^2 = 0,9991$)	$0,1p$ ($R^2 = 1$)

Компьютерный эксперимент позволил установить, что зависимость времени настройки нечеткой системы от параметров алгоритма носит линейный характер. В табл. 1 приведены регрессионные модели зависимости времени оптимизации нечеткой системы, в скобках указаны квадраты коэффициентов корреляции R^2 как мера точности полученных зависимостей.

Сравнение разработанного алгоритма с аналогами.

Для сравнения разработанного алгоритма с существующими подходами построения нечетких баз правил было проведено исследование результатов аппроксимации нескольких нелинейных функций. Сравнение проводили со следующими алгоритмами: прямой алгоритм муравьиной колонии [5], непрерывный алгоритм муравьиной колонии [7], алгоритм Mitaim-Kosko [22], алгоритм Lisin-Gennert [22], алгоритм Teng-Wang-Chiu [23], алгоритм Aliyari-Teshnehlab-Sedigh [24]. Критерием сравнения выступала ошибка $RMSE$ (3). Результаты аппроксимации показали превосходство АПКНА над всеми другими алгоритмами для функций 2, 3, 4 со значениями $RMSE$ $3,86E-04$; $2,17E-03$; $4,33E-04$, соответственно. АПКНА уступил по результатам аппроксимации функции 5 прямому алгоритму муравьиной колонии, показав результат $5,72E-04$ против $4,93E-06$.

Исследование было проведено также на реальных данных, представленных в репозитории KEEL (Knowledge Extraction Evolutionary Learning) [25]. Характеристики аппроксимируемых данных представлены в табл. 2. Все входные и выходные переменные — вещественные числа. Каждая выборка, кроме *Kinematics*, разделена на пять наборов, из которых строятся обучающая и тестовая выборки, содержащие 80 % и 20 % данных, соответственно. Для *Kinematics* разделение было на десять наборов, в каждом по 90 % и 10 % для обучающей и тестовой выборок, соответственно. Разделение проводилось

таким образом, чтобы каждый набор попал во все тестовые выборки ровно один раз.

Результаты работы АПКНА сравнивали с результатами других алгоритмов глобальной оптимизации [26], такими как Wang-Mendel, COR-BWAS, Thrift, Pittsburgh, Fuzzy-GAP, Pitts-DNF min, Pitts-DNF med, Pitts-DNF max. Критерием сравнения выступала ошибка MSE (2). На выборке *Diabetes* по результатам аппроксимации обучающей выборки лучшим был Thrift с результатом 0,0745 против результата АПКНА 0,1235, но среднее число правил для Thrift 46,2, что говорит о том, что на каждый образец обучающей выборки приходится более одного правила. Именно это привело к переобучению. На тестовой выборке ошибка аппроксимации алгоритма Thrift составила 0,8783, что более чем на порядок больше показателя обучающейся выборки. АПКНА показал лучший результат со значением 0,1018. При обработке данных *ELE 2* АПКНА показал лучшие результаты со значениями 41 778 и 10 571 для обучающей и тестовой выборок, соответственно. На выборке *DEE* АПКНА показал худший результат среди конкурентов с результатом 0,48662 против лучшего результата 0,11267, показанного Pitts-DNF max. Однако на тестовой выборке АПКНА показал результат 0,13767 против результата COR-BWAS, равного 0,20513.

Результаты исследований, проведенных на наборах данных *Delta ailerons* и *Kinematics*, сравнивали с результатами алгоритмов для задачи глобальной оптимизации, основанных на подходах, отличных от нечетких систем. По большей части здесь представлены нейронные сети и статистические методы и SVR подход. Описание каждого из алгоритмов можно найти в соответствующих статьях: SMOTI, MS, RETIS [27]; SLFN sigmoid, SLFN RBF, SLFN sin, RAN, MRAN [28]; SVR [29]; FF-SVESMS, SVR-SMO [30].

В работах [28—30] для расчета $RMSE$ использовали формулу

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^m (t_p - f(x_p, \theta))^2}{m}},$$

поэтому для проведения сравнения значения $RMSE$, приведенные в указанных работах, были умножены на значение $\frac{1}{\sqrt{m}}$, где m — число образцов в наборе.

По обучающей выборке *Delta ailerons* АПКНА уступил лишь MS, показав результат $RMSE$ $2,5304E-06$ против $2,4886E-06$. На тестовой выборке АПКНА показал лучший результат, равный $6,9734E-06$. На самой большой и по числу данных и входных параметров выборке *Kinematics* АПКНА на обучающей выборке показал средний из всех сравниваемых алгоритмов результат $2,3131E-03$ против лучшего результата SMOTI $1,8411E-03$. Сравнение по тестовой выборке не проводили,

Таблица 2

Описание данных

Название данных	Число образцов	Число входных переменных	Краткое описание
<i>DEE</i>	365	6	Прогнозирование среднесуточной цены на электроэнергию
<i>Delta Ailerons</i>	7129	5	Формирование управляющего воздействия на элероны воздушного судна
<i>Diabetes</i>	43	2	Прогнозирование развития сахарного диабета у инсулинозависимых детей
<i>ELE2</i>	1066	4	Прогнозирование оценки стоимости обслуживания городских электрических сетей
<i>Kinematics</i>	8192	8	Прогнозирование расстояния от датчика робота до цели

в силу отсутствия этих значений у сравниваемых алгоритмов.

Результаты экспериментов показали, что модифицированный АПК имеет высокую прогностическую способность. По результатам видно, что АПКНА в некоторых тестах показывает лучшие результаты, по другим более скромные, но в подавляющем большинстве случаев входит в тройку лидеров. Особого внимания заслуживает факт устойчивости к переобучению, во многом полученный благодаря сбалансированному числу правил по сравнению с аналогами, позволяющий победить на тестовой выборке и показать неплохие результаты на обучающей выборке.

Заключение

В работе описан эффективный алгоритм оптимизации параметров нечетких систем, основанный на моделировании поведения медоносных пчел. Эксперименты, проведенные на классических тестовых задачах, а также сравнительный анализ показали, что предложенный алгоритм имеет достаточно хорошие характеристики по сравнению с другими методами формирования нечетких баз правил. Особо отметим его высокие прогностические возможности.

Список литературы

1. **Espinosa J., Vandewalle J., Wertz V.** Fuzzy logic, identification and predictive control. London: Springer-Verlag, 2005. 263 p.
2. **Zhao L., Qian F., Yang Y., Zeng Y., Su H.** Automatically extracting T-S fuzzy models using cooperative random learning particle swarm optimization // *Applied Soft Computing*. 2010. V. 10. N 3. P. 938–944.
3. **Ходашинский И. А.** Идентификация параметров нечетких моделей типа синглтон на основе алгоритма роящихся частиц // *Информационные технологии*. 2009. № 6. С. 8–11.
4. **Ходашинский И. А., Синьков Д. С.** Идентификация параметров нечетких систем на основе адаптивного алгоритма роящихся частиц // *Информационные технологии*. 2011. № 8. С. 2–5.
5. **Ходашинский И. А., Дудин П. А.** Идентификация нечетких систем на основе прямого алгоритма муравьиной колонии // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2011. № 3. С. 26–33.
6. **Juang C.-F., Chang P.-H.** Designing Fuzzy-Rule-Based Systems Using Continuous Ant-Colony Optimization // *IEEE Transactions Fuzzy Systems*. 2010. V. 18. N 1. P. 138–149.
7. **Ходашинский И. А., Дудин П. А.** Идентификация нечетких систем на основе непрерывного алгоритма муравьиной колонии // *Автоматрия*. 2012. Т. 48. № 1. С. 63–71.
8. **Ходашинский И. А., Земцов Н. Н., Мещеряков Р. В.** Построение нечетких аппроксиматоров на основе метода перемещения бактерий // *Известия вузов. Физика*. 2012. Т. 55. № 3. С. 57–61.
9. **Karaboga D., Akay B.** A survey: algorithms simulating bee swarm intelligence // *Artificial Intelligence Review*. 2009. V. 31. P. 61–85.
10. **Khanmirzaei Z., Teshnehlab M.** Prediction Using Recurrent Neural Network Based Fuzzy Inference System by the Modified Bees

Algorithm // *International Journal of Advancements in Computing Technology*. 2010. V. 2. P. 42–55.

11. **Pham D. T., Darwish A. H., Eldukhri E. E.** Optimisation of a Fuzzy Logic Controller using the Bees Algorithm // *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*. 2009. V. 1. P. 250–264.

12. **Ходашинский И. А., Горбунов И. В.** Построения нечетких классификаторов на основе алгоритма пчелиной колонии // *Матер. Всеросс. Конф. с междунар. участием ЗОНТ-2011*. М.: Институт математики им. С. Л. Соболева, 2011. Т. 2. С. 117–125.

13. **Ходашинский И. А.** Оценивание величин: подход на основе мягких вычислений // *Информационные технологии*. 2006. № 4. С. 13–21.

14. **Karaboga D., Akay B.** A survey: algorithms simulating bee swarm intelligence // *Artificial Intelligence Review*. 2009. V. 31. P. 61–85.

15. **Alatas B.** Chaotic bee colony algorithms for global numerical optimization // *Expert Systems with Applications*. 2010. V. 37. P. 5682–5687.

16. **Teodorović D.** Bee Colony Optimization (BCO) // *Innovations in Swarm Intelligence*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. P. 39–60.

17. **Karaboga D., Basturk B.** On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm // *Applied Soft Computing*. 2008. V. 8. P. 687–697.

18. **Yang X.-S.** Engineering optimizations via nature-inspired virtual bee algorithms // *IWINAC 2005, LNCS 3562*. Berlin: Springer-Verlag, 2005. P. 317–323.

19. **Wedde H. F., Farooq M., Zhang Y.** BeeHive: an efficient fault-tolerant routing algorithm inspired by honey bee behavior // *Ant colony optimization and swarm intelligence, LNCS 3172*. Berlin: Springer-Verlag, 2004. P. 83–94.

20. **Катаев М. Ю., Лавыгина А. В., Ходашинский И. А., Эпштейн Д. А.** Нечеткий аппроксиматор атмосферных температурных полей // *Автоматрия*. 2010. Т. 46. № 2. С. 39–48.

21. **Ходашинский И. А.** Идентификация нечетких систем: методы и алгоритмы // *Проблемы управления*. 2009. № 4. С. 15–23.

22. **Lisin D., Gennert M. A.** Optimal Function Approximation Using Fuzzy Rules // *Proc. 18th Int. Conf. North American Fuzzy Information Processing Society*. 1999. P. 184–188.

23. **Teng Y.-W., Wang W.-J., Chiu C.-H.** Function approximation via particular input space partition and region-based exponential membership functions // *Fuzzy Sets and Systems*. 2004. V. 142. P. 267–291.

24. **Aliyari M., Teshnehlab M. Sh., Sedigh A. K.** Novel Hybrid Learning Algorithms for Tuning ANFIS Parameters Using Adaptive Weighted PSO // *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. 2007. P. 111–116.

25. **Data-mining software Tool: data, set repository.** URL: <http://www.keel.es>.

26. **Alcala-Fdez J., Fernandez A., Luengo J., Derrac J., Garcia S., Sanchez L., Herrera F.** KEEL Data-mining software Tool: data, set repository, integration of algorithms and experimental analysis framework // *Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing*. 2011. V. 17. P. 255–287.

27. **Malerba D., Esposito F., Ceci M., Appice A.** Top-Down Induction of Model Trees with Regression and Splitting Nodes // *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 2004. V. 26. N 6. P. 1–13.

28. **Guang-Bin H., Lei C., Chee-Kheong S.** Universal Approximation Using Incremental Constructive Feedforward Networks With Random Hidden Nodes // *IEEE Transactions on Neural Networks*. 2006. V. 17. N 4. P. 879–892.

29. **Yongping Z., Jianguo S.** Improved scheme to accelerate support vector regression // *Journal of Systems Engineering and Electronics*. 2009. V. 20. N 5. P. 1086–1090.

30. **Zhiwei S., Min H.** γ -C plane and robustness in static reservoir for nonlinear regression estimation // *Neurocomputing Advances in Machine Learning and Computational Intelligence*. 2009. V. 72. P. 1732–1743.

А. А. Машенко, аспирант,
В. Ю. Мусатов, канд. техн. наук, доц.,
В. В. Сысоев, д-р техн. наук, проф.,
 robsii@sstu.ru,

Саратовский государственный
 технический университет

ПЛИС-реализация нейросетевого алгоритма идентификации газа по векторному отклику хеморезистивной мультисенсорной микросистемы

Рассматривается возможность аппаратной реализации искусственных нейронных сетей на ПЛИС для обработки векторного сигнала, генерируемого мультисенсорным чипом при воздействии различных газов. Обосновывается выбор типа микросхемы, представлена архитектура и структурная схема вычислительного устройства, обрабатывающего алгоритм нейронной сети Хебба.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, программируемые логические интегральные схемы, "электронный нос", газовый сенсор, мультисенсорная микросистема, анализ газов

Введение. Особенности нейросетевых алгоритмов идентификации газов

В последнее время вызывает большой интерес развитие газоаналитических устройств, работающих согласно принципам биологической обонятельной системы. Такие устройства, часто называемые "электронный нос" [1], включают набор датчиков газа, или мультисенсорную систему, которая генерирует первичный сигнал при воздействии газа или газовой смеси, и алгоритмы распознавания образов, обрабатывающие совокупный мультисенсорный сигнал в виде вектора (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

Так же, как и в случае биологического аналога, анализ газовой смеси проводится не путем разложения на составные части, как в традиционных спектрометрах, а в результате распознавания образа запаха, сформированного сигналами набора датчиков, объединенных в мультисенсорную систему.

Для выполнения задачи распознавания векторного отклика мультисенсорной системы на классы, соответствующие газам, возможно применение алгоритмов, реализуемых на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) [2]. Принципы работы ИНС близки к принципам природного интеллекта и основаны на параллельном анализе данных и способности создавать обобщения, т.е. самообучаться [3]. ИНС состоят из большого числа простых элементов (ячеек) обработки сигнала, каждая из которых взаимодействует с другими ячейками

с помощью межсоединений (рис. 2, см. вторую сторону обложки).

Важным аспектом в параллельной обработке информации является то, что каждая отдельная ячейка не выполняет сложные операции, и весь основной анализ связан с работой межсоединений. Все ИНС состоят из:

1) набора ячеек (или нейронов, по аналогии с биологическими системами);

2) схемы связей между ячейками, где входные сигналы i индивидуально "взвешиваются", т. е. умножаются на некоторое значение w , называемое весом: $i' = wi$ или $i' = \text{const} + wi$ (где постоянная const называется смещением) и являются аргументом функции активации;

3) набора правил модификации связей через обучение и последующее распространение по сети [4].

Нейрон может иметь разное число входов и выходов, а также промежуточные ("скрытые") нейронные слои. Основной принцип работы ИНС состоит в настройке параметров нейронов, веса и смещения, таким образом, чтобы отклик сети соответствовал заданному [3]. Нередко сеть сама корректирует параметры для достижения требуемого результата. Топология ИНС может быть различна: нейроны могут располагаться в один и более слоев, и их соединения могут быть устроены в прямом направлении (от входа к выходу) или иметь обратную связь. Кроме того, возможны различные виды архитектуры нейронной сети.

При решении прикладных задач с помощью искусственных нейронных сетей, в частности для обработки сигнала мультисенсорных систем, необходимо собрать достаточный объем данных для ее обучения. Обучающий набор данных — это набор наблюдений, содержащих признаки изучаемого объекта. В случае мультисенсорной системы это многократная экспозиция сенсоров в атмосфере тестового газа. Первоначальный выбор признаков осуществляется эвристически на основе имеющегося опыта. Сначала следует включить все признаки, которые по мнению аналитиков или экспертов являются существенными. На последующих этапах это множество можно сократить.

Основу самоорганизации искусственных нейронных сетей составляет выявленная закономерность глобального упорядочения сети, которое становится возможным в результате самоорганизующихся операций, независимо друг от друга проводящихся в различных локальных сегментах сети [2]. Среди механизмов самоорганизации можно выделить два основных класса: самоорганизацию, основанную на ассоциативном правиле Хебба, и механизм конкуренции между нейронами на базе обобщенного правила Кохонена [3]. Независимо от способов обучения самоорганизующихся сетей большое значение имеет избыточность обучающих данных, без которой обучение просто невозможно. Широкий спектр обучающих данных, включающий многократные повторения близких друг к другу выборок, образует

"базу знаний" для обучения сети, из которой на основе соответствующих сопоставлений выводятся решения по формированию на входе сети определенного классифицированного вектора.

Схемотехническая реализация нейросетевых алгоритмов. Особенности ПЛИС-реализации специализированного вычислителя

Как правило, моделирование ИНС осуществляется на персональных компьютерах. При этом возможности применения специализированных процессоров для отмеченных задач мало изучены. Ранее нами была показана успешная реализация на базе нейропроцессора NM6403 [5] алгоритмов распознавания векторных мультисенсорных сигналов на основе корреляционных, или хеббовских, ИНС с самоорганизацией [6, 7]. В рамках развитых алгоритмов ИНС генерирует главные компоненты разложения по обобщенному правилу Сенгера [2]:

$$y_i = \sum_{j=0}^{N-1} w_{ij}x_j, \quad (1)$$

где x_j , y_i , w_{ij} — входы, выходы и веса ИНС, соответственно. Уточнение весов выполняется по формуле

$$w_{ij} = w_{ij} + \eta y_i \left[x_j \sum_{h=0}^{i-1} w_{hj} y_h \right], \quad (2)$$

где i — номер нейрона; j — номер веса; w_{ij} — j -й вес i -го нейрона; y_i — выход i -го нейрона.

Реализация различных архитектур ИНС возможна также на основе других приборов программи-

руемой логики, представителями которых являются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Эти устройства применяются для построения разнообразных интерфейсных узлов, устройств управления и контроля и т. д. Для примера на рис. 3 приведена блок-схема ПЛИС серии MAX II.

В связи с появлением быстродействующих ПЛИС сверхвысокой интеграции, работающих на высоких тактовых частотах, их область применения значительно расширилась. Современные образцы ПЛИС, выполненные по новым технологиям с разрешением 0,22 мкм, способны работать на частотах до 300 МГц и более, реализуют до 3 млн эквивалентных логических вентилей. Такие мощности ПЛИС позволяют использовать их не только для реализации простых контроллеров и интерфейсных узлов, но и для цифровой обработки сигналов, сложных интеллектуальных контроллеров и нейрочипов. В данной статье рассматривается возможность реализации на ПЛИС вычислительного устройства, обеспечивающего распознавание образов — векторных сигналов, генерируемых мультисенсорной системой [8—10].

Выбор архитектуры обрабатывающего элемента для реализации ИНС с помощью ПЛИС направлен на оптимальное использование аппаратных ресурсов чипов CPLD (complex programmable logic device). Затраты аппаратных ресурсов во многом зависят от разрядности операндов, а также от архитектуры арифметико-логического устройства (АЛУ) для умножения чисел с фиксированной точкой. Как правило, операция умножения чисел с фиксированной точкой сводится к операциям сложения и сдвига.

Произведение двух $(n - 1)$ -разрядных чисел может иметь $2(n - 1)$ значащих разрядов. Поэтому необходимо предусмотреть возможность формирования в АЛУ произведения, имеющего по сравнению с сомножителями двойную длину.

Для выполнения операции умножения АЛУ должно содержать регистры множителя, множителя и схемы формирования суммы частичных произведений. Операция умножения состоит из $n - 1$ циклов, где n — число цифровых разрядов множителя. В зависимости от способа формирования суммы частичных произведений различают четыре основных метода выполнения умножения и, соответственно, четыре структуры АЛУ для этой операции [11]:

1) умножение, начиная с младших разрядов множителя, со сдвигом суммы частичных произведений вправо и при неподвижном множимом;

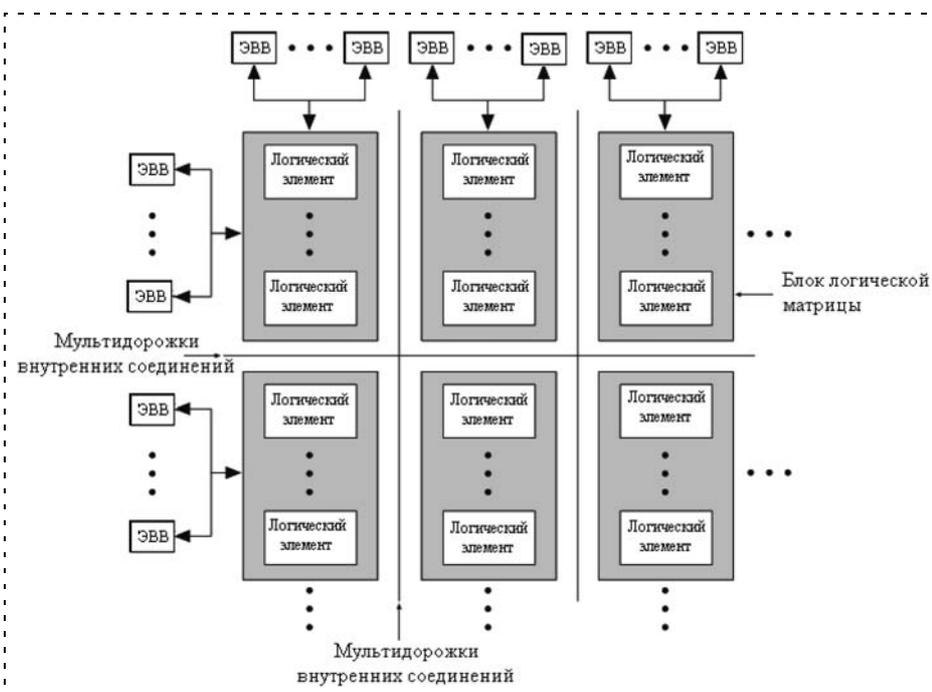


Рис. 3. Блок-схема ПЛИС серии MAX II

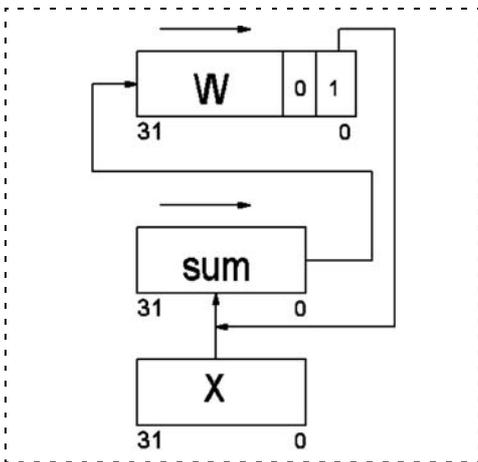


Рис. 4. Структурная схема реализованного АЛУ

2) умножение, начиная с младших разрядов множителя, при сдвиге множимого влево и неподвижной сумме частичных произведений;

3) умножение, начиная со старших разрядов множителя, при сдвиге суммы частичных произведений влево и неподвижном множимом;

4) умножение, начиная со старших разрядов множителя, при сдвиге вправо множимого и неподвижной сумме частичных произведений.

Архитектура АЛУ, используемая для реализации нейронов моделируемой ИНС, была выполнена по первому способу. На рис. 4 представлена структура 32-разрядного АЛУ, включающая: X — регистр множимого, в который загружается значение входа ИНС; sum — регистр частичных сумм произведения; W — регистр множителя, в который загружается весовой коэффициент, соответствующий входу. Результат умножения по истечении 32 тактов находится в регистрах sum (старшие 32 разряда) и W (младшие 32 разряда).

Архитектура вычислительного устройства разработана на основе чипа CPLD серии MAX II с 1270 эквивалентными логическими элементами. Структурная схема вычислительного устройства представлена на рис. 5.

По переднему фронту сигнала START происходит загрузка данных в регистры X1 и X2, а также в регистр W каждого АЛУ (см. рис. 4), соответственно. При наличии логической единицы на входе CALC набор АЛУ одновременно выполняет операцию умножения над данными, поступающими с соответствующих регистров. При наличии логической единицы на входе L происходит загрузка данных со входа DATA в "теневой" регистр TX1, кото-

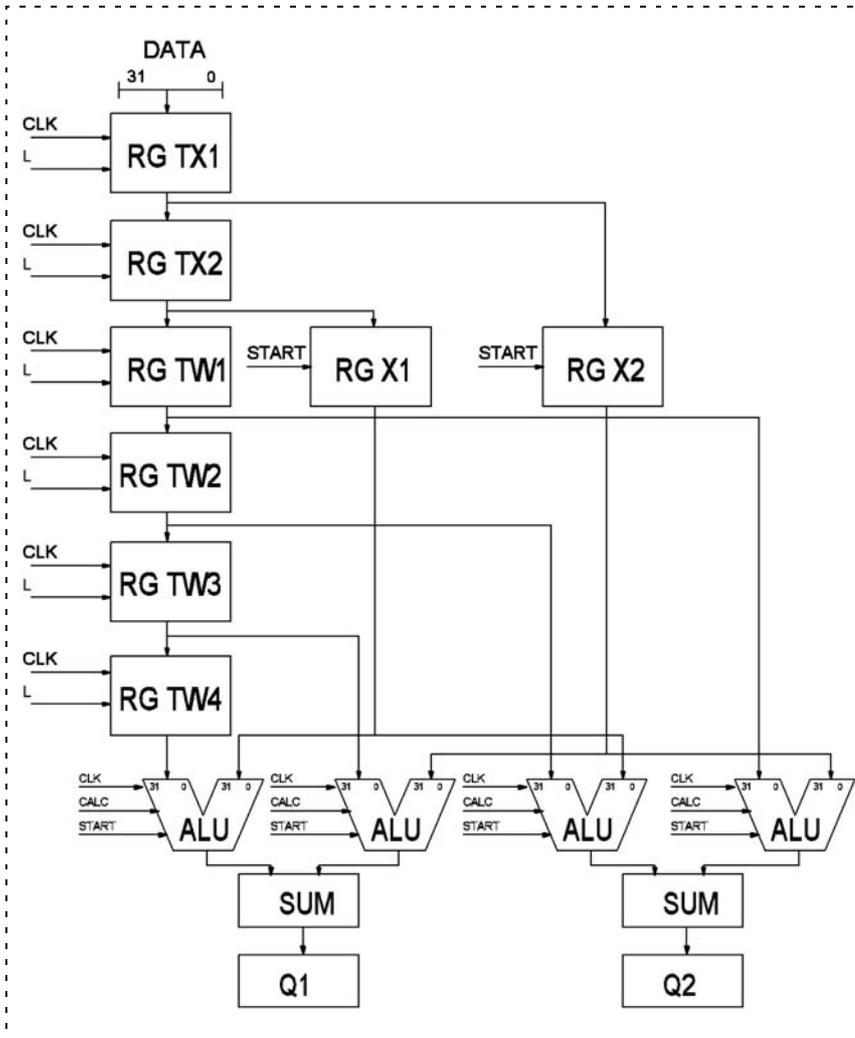


Рис. 5. Структурная схема разработанного устройства. Обозначения: RG TX1, RG TX2, RG TW1, RG TW2, RG TW3, RG TW4 — "теневые" регистры для хранения загружаемых данных со входа устройства; Q1, Q2 — регистры для хранения результата; SUM — сумматор результатов АЛУ; CLK, CALC, L, START — управляющие сигналы

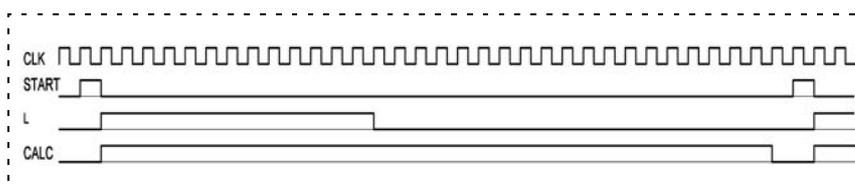


Рис. 6. Временная диаграмма работы разработанного устройства. Обозначения: CLK — тактовый сигнал; START — сигнал начала работы; L — сигнал разрешения загрузки данных; CALC — сигнал разрешения вычисления новых значений

рый выгружает свое значение в "теневой" регистр TX2 и т. д. Временная диаграмма работы устройства приведена на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что на один рабочий цикл необходимо 33 такта. В то время, как АЛУ выполняет умножение значений данных с входов ИНС на вводимые значения ее весов, происходит загрузка новых данных в "теневые" регистры. За один рабочий цикл вычисляется произведение двух входов ИНС

на четыре соответствующих веса. Таким образом, после выполнения 16 рабочих циклов в регистрах результата будут находиться значения первой и второй главных компонент, вычисленные ИНС, имеющей 32 входа и 2 нейрона. Синтез устройства в системе автоматизированного проектирования ©Quartus II 9.0 показал, что для его реализации потребуется 768 логических элементов, составляющих 60 % от общего объема используемой ПЛИС. Тактовая частота устройства составляет 66 МГц. Это позволяет получать результат вычисления каждые 7,92 мкс.

Моделирование работы разработанного специализированного вычислителя

Моделирование работы устройства проводили с помощью программного обеспечения ©ModelSim-Altera 6.6с. Для проверки работы разработанного устройства использовали данные, генерируемые прибором KAMINA [12, 13] на основе однокристалльного мультисенсорного чипа с хеморезистивными элементами из тонкой пленки оксида олова, сегментированного 39 компланарными электродами [14]. Общее число сенсорных сегментов позволяло получить 38-мерный векторный сигнал.

Мультисенсорный чип экспонировали к смеси с воздухом паров эфирного масла лимона и сложной газовой смеси, содержащей толуол, бутилацетат, (изо)бутиловый спирт, ацетон в условиях, приближенных к естественным, при которых концентрация запаха меняется в широких пределах (рис. 7).

Опрос 38 сенсоров мультисенсорного чипа проводили за время, равное 1 с. Для анализа работоспособности развитого устройства применяли выборку мультисенсорных сигналов, полученных при воздействии 209 напусков каждой газовой смеси, из которых 120 использовались для обучения ИНС, а 89 — для тестирования ее работоспособности. Концентрации газов специальным образом не

контролировались и менялись в широких пределах в целях моделирования условий, близких к практическому применению газоаналитического устройства.

Число эпох обучения ИНС было выбрано равным 15, коэффициент обучения — 0,001. Моделирование ИНС осуществляли на основе Хеббовской функции (1), (2). Полученные результаты моделирования разработанного устройства представлены на рис. 8 (см. вторую сторону обложки).

По оси абсцисс отложена первая главная компонента, а по оси ординат — вторая главная компонента. Из рис. 8 видно, что кластеры данных, соответствующих тестовым газовым смесям, уверенно разделяются, что позволяет провести их распознавание.

Заключение

В работе проведен анализ возможности реализации на основе ПЛИС алгоритма распознавания образов векторного сигнала, генерируемого мультисенсорной системой при воздействии различных газов. Разработана архитектура и структурная схема аппаратной реализации алгоритма на микросхеме CPLD серии MAX II, имеющей 1270 эквивалентных логических элементов. Проведенное моделирование показало, что развитое вычислительное устройство может применяться для цифровой обработки сигналов мультисенсорной системы в целях идентификации газовых смесей.

Список литературы

1. Gardner J. W., Bartlett P. N. A brief history of electronic noses // *Sensors & Actuators B*. 1994. V. 18. N 1–3. P. 211–221.
2. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации: Пер. с польского И. Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2004. 344 с.
3. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд.: Пер. с англ. М.: Изд. дом "Вильямс", 2006. 1104 с.
4. Gardner J. W., Bartlett P. N., Dodd G. H., Shurmer H. V. The design of an artificial olfactory system // *Chemosensory information processing* / D. Schild (ed.). Berlin : Springer-Verlag, 1989. P. 131–172.
5. НТЦ Модуль. ПО процессора NeuroMatrix® NM6403: Справочное руководство. М.: НТЦ Модуль, 1999. 130 с.
6. Мусатов В. Ю., Сысоев В. В., Машенко А. А., Варежников А. С., Христомов А. А. О возможности применения нейропроцессора для обработки отклика однокристалльной мультисенсорной микросистемы идентификации газов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2008. № 1. С. 17–22.
7. Sysoev V. V., Musatov V. Yu., Maschenko A. A., Varegnikov A. S., Chri-zostomov A. A., Kiselev I., Schneider T., Bruns M., Sommer M. Could we apply a neuroprocessor for analyzing a gas response of multisensor Aarrays? // *AIP Conf. Proc.* 2009. V. 1137. P. 539–542.

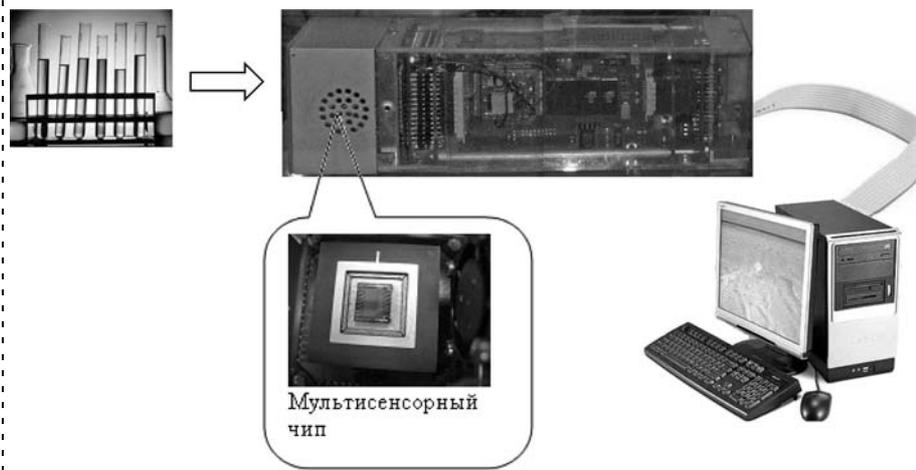


Рис. 7. Схема экспериментальной установки по исследованию отклика мультисенсорного чипа к воздействию газов

8. Musatov V. Yu., Sysoev V. V., Sommer M., Kiselev I. Assessment of meat freshness with metal oxide sensor microarray electronic nose: a practical approach // *Sensors and Actuators B*. 2010. V. 144. P. 99–103.

9. Сысоев В. В., Мусатов В. Ю., Силаев А. В., Залялов Т. Р., Машенко А. А. Применение метода нейронных сетей для анализа отклика однокристалльной мультисенсорной системы идентификации газов // *Вестник СГТУ*. № 1 (21). Вып. 1. 2007. С. 80–87.

10. Musatov V. Yu., Varegnikov A. S., Sysoev V. V., Kolmakov A., Sommer M. The application of self-organising neural networks for processing the response of single-crystal multisensor arrays // *Technical Digest of IMCS-13 conference*. 11–14 July, 2010. Perth, Australia. 2010. P. 292.

11. Каран Б. М. Электронные вычислительные машины и системы: Учеб. пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 592 с.

12. Goschnick J. An electronic nose for intelligent consumer products based on a gas analytical gradient microarray // *Microelectronic Engineering*. V. 57–58. 2001. P. 693–704.

13. Sysoev V. V., Kiselev I., Frietsch M., Goschnick J. The temperature gradient effect on gas discrimination power of metal-oxide thin-film sensor microarray. // *Sensors*. 2004. T. 4. C. 37–46.

14. Сысоев В. В., Кучеренко Н. И., Кисин В. В. Текстурированные пленки оксида олова для микросистем распознавания газов // *Письма в Журнал технической физики*. 2004. Т. 30. Вып. 18. С. 14–20.

УДК 681.51.011:004.896

И. С. Кабак, канд. техн. наук, проф.,
А. М. Гаделев, аспирант,
agadelev@mail.ru,
МГТУ "Станкин", г. Москва

Система диагностики технологического процесса резания с использованием аппарата нейронных сетей

Предлагается метод построения системы технической диагностики состояния режущего инструмента при токарной обработке, использующий генетические алгоритмы и нейронные сети. Рассмотрена нейронная сеть с особой архитектурой, выполненной в виде унифицированных аппаратных модулей. Каждый модуль решает отдельную подзадачу и содержит фрагмент обученной нейронной сети. В процессе работы можно добавлять или удалять, переобучать модули методом генетических алгоритмов.

Ключевые слова: нейронные сети, генетические алгоритмы, прогнозирование, износ, система диагностики, мониторинг

Введение

Во время процесса токарной обработки режущий инструмент подвергается воздействию со стороны обрабатываемой детали, вследствие чего происходит износ его режущих поверхностей, что может привести к снижению точности обработки и/или поломке инструмента. Компенсировать влияние износа можно путем своевременного корректирования положения исполнительного органа станка на величину износа, путем оптимизации параметров обработки или своевременной замены инструмента до наступления критического износа или поломки, используя для этого оперативную информацию о текущем состоянии инструмента и динамике развития его износа. При этом должно быть обеспечено максимальное использование ресурса режущего инструмента.

Поэтому повышение надежности процесса токарной обработки и улучшение качества обрабаты-

ваемых деталей путем использования подсистемы оперативной диагностики состояния режущего инструмента является в настоящее время актуальной задачей.

Состояние проблемы и постановка задачи

Задачу диагностики состояния режущего инструмента при токарной обработке можно разделить на две подзадачи: определение текущего состояния и прогнозирование динамики износа.

Основной проблемой при диагностике является нелинейность и нестационарность процесса резания. В значительной мере это обусловливается случайным характером параметров начального состояния инструмента и заготовки. Также сложность вызывает недоступность зоны резания, а следовательно, и режущей части для непосредственного измерения, в результате чего контроль состояния режущего инструмента невозможно осуществить прямыми методами. В связи с этим применимы только косвенные методы определения износа инструмента с помощью измерения косвенных параметров, имеющих корреляцию с износом. Наибольшее распространение получили методы измерения интенсивности износа на основании анализа сигналов акустической эмиссии и виброакустических сигналов, электропроводимости контакта "инструмент — деталь", анализа постоянной и переменной составляющих термоЭДС, мощности привода главного движения, силы резаний.

В настоящий момент существует множество методов построения систем диагностики процесса токарной обработки [1, 2]. В работе [1] прогнозирование основывается на анализе показаний датчиков сил резания, установленных на инструменте. В работе разработан алгоритм анализа сигналов с датчиков сил резания, позволяющий выделить составляющие, влияющие на износ инструмента. К достоинствам данной методики можно отнести простоту алгоритмов, но применение линейной аппроксимации функции износа не в полной мере учитывает нестационарность условий механической

обработки, режимов резания, свойств инструмента и заготовки.

В работе [2] предложен более универсальный метод построения системы мониторинга и прогнозирования состояния режущего инструмента, основанный на анализе сигнала виброакустической эмиссии и электропроводимости контакта "инструмент — деталь". К достоинствам данной методики можно отнести применение синтеза методов контроля на основе электрических и виброакустических сигналов, за счет чего достигается высокая точность определения текущего состояния режущего инструмента. Также преимуществом является то, что используемый алгоритм прогнозирования износа режущего инструмента учитывает нелинейность функции износа режущего инструмента во времени и вариацию стойкости инструментов в партии. Но применение данного метода требует трудоемких исследований и экспериментов для формирования и пополнения базы данных моделей процесса резания.

Анализ методов построения систем диагностики выявил тот факт, что выбор косвенных диагностических параметров, которые наиболее точно описывали бы характер износа инструмента, является одной из главных проблем при создании алгоритмов диагностики. Это приводит к тому, что алгоритм диагностики состояния режущего инструмента сильно зависит от свойств косвенных диагностических признаков, каждый из которых имеет свои недостатки и ограниченность применения. Поэтому более эффективным будет анализ нескольких, различных по типу, косвенных параметров. Еще одним общим недостатком методов построения систем диагностики является то, что текущее состояние определяется только на основе анализа текущих косвенных параметров, и при этом не учитываются значения износа в предыдущие моменты времени. Поэтому одними из основных параметров системы должны быть глубина просмотра предыдущих значений износа и число косвенных диагностических параметров.

В данной статье предлагается метод построения системы диагностики на базе одной нейронной сети, реализующей алгоритм идентификации и прогнозирования износа режущего инструмента с возможным использованием всех возможных косвенных диагностических параметров $X = \{X_1, X_2, \dots, X_L\}$, извлекаемых из зоны резания, и предыдущих значений износа, полученных сетью.

В качестве горизонта прогнозирования принимается максимальное время выполнения одного перехода обработки, причем период прогнозирования T определяется следующим соотношением:

$$t_1 \geq T \geq t_2, \quad (1)$$

где t_1 — время, допустимое для принятия решения системой ЧПУ на основе результатов диагностики;

t_2 — время опроса датчиков и их первичной обработки.

В качестве критерия износа примем величину площадки износа на задней поверхности режущего инструмента h_3 .

Следует отметить, что не существует единой теории для определения оптимальной структуры многослойной нейронной сети. Заранее точно невозможно определить, какое число скрытых слоев необходимо, и какой временной интервал K выбрать для составления прогноза. Чем больше параметров обрабатывает нейронная сеть, тем большее число нейронов в скрытых слоях и число скрытых слоев требуется, что не может не сказаться на скорости работы нейронной сети и ее обучения.

Поэтому при применении нейронной сети для задачи определения текущего состояния и прогнозирования износа режущего инструмента при токарной обработке необходимо решить следующие проблемы:

- 1) минимизация размера сети без потери производительности;
- 2) увеличение скорости обучения сети без потери качества.

Создание нейронной сети для системы диагностики можно разделить на следующие основные этапы:

- формирование исходной нейронной сети и ее первичное обучение;
- обучение нейронной сети во время работы системы диагностики.

Формирование исходной нейронной сети и ее первичное обучение

Изначально берется многослойная нейронная сеть (рис. 1), состоящая из n слоев: входного слоя, выходного слоя и $n - 2$ скрытых слоев. Значения весовых коэффициентов связей между нейронами

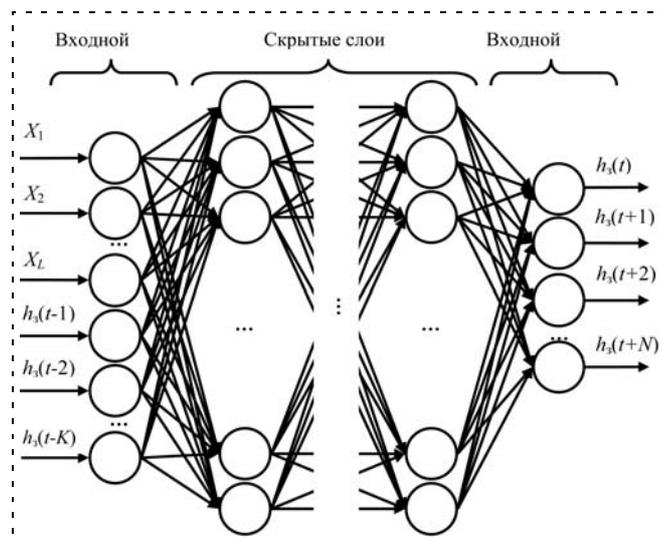


Рис. 1. Представление нейронной сети в традиционном виде

устанавливаются малыми случайными величинами с равномерным распределением в заданном диапазоне изменения. Выходными значениями нейронной сети являются значение износа $h_3(t)$ в текущий момент времени t и прогнозируемое значение износа в последующие периоды $h_3(t+1), h_3(t+2), \dots, h_3(t+N)$. В качестве входных значений выступают косвенные диагностические параметры X_1, X_2, \dots, X_L и значения износа в предыдущие моменты времени $h_3(t-1), h_3(t-2), \dots, h_3(t-K)$. При этом предполагается возможность того, что глубина просмотра предыдущих значений износа K может быть равна числу периодов N , которые будет покрывать прогноз. Таким образом, в начальном такте работы сети текущее состояние и прогноз износа будут определяться на основе косвенных параметров, а в конце перехода будут строиться на основе анализа всех значений износа, полученных во время этого перехода.

Матрицу связей многослойной нейронной сети W можно представить в виде блочно-диагональной матрицы:

$$W = \begin{pmatrix} W_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & W_{n-1} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $W_k = (w_{i,j}), i = 1 \dots p, j = 1 \dots h; p$ — число нейронов в слое k , передающем информацию; h — число нейронов в слое $(k+1)$, принимающем информацию; $w_{i,j}$ — весовой коэффициент связи нейрона k -го слоя с нейроном слоя $(k+1)$.

Далее выполняется первичное обучение нейронной сети с помощью метода обратного распространения ошибки.

Целью первичного обучения является формирование начальной общей матрицы весовых коэффициентов, на основе которой выполняется фрагментация сети и последующее ее обучение с помощью генетических алгоритмов (ГА). Первичное обучение осуществляется до тех пор, пока не образуется $N+1$ фрагментов вокруг выходных групп нейронов, и значение целевой функции ошибки E не будет меньше заданного допустимого значения E_0 (рис. 2). Выделение фрагментов нейронной сети происходит по алгоритму, предложенному в работе [3].

Таким образом, можно условно выделить фрагменты нейронной сети — домены, решающие отдельные подзадачи [4]. Под фрагментом нейронной сети будем понимать группу нейронов, в которой находятся все нейроны выходного слоя, отвечающие за определенную подзадачу. Для этого в сеть вводят условные связи между этими нейронами, при этом весовые коэффициенты этих связей ставят максимальными. При первоначальном обучении и последующей работе сети эти связи не учитываются.

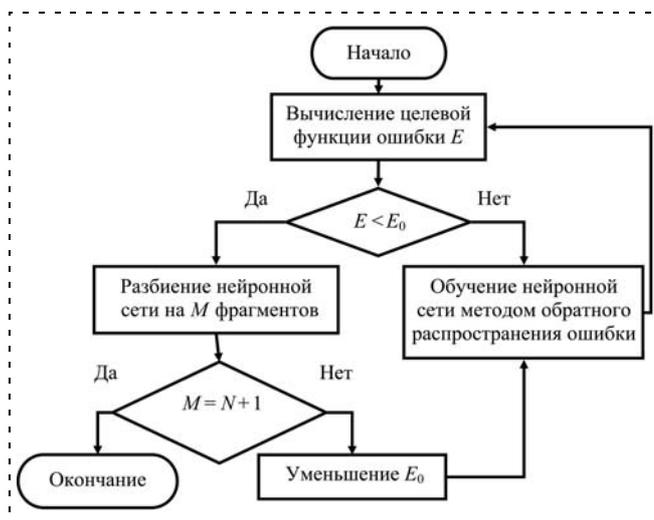


Рис. 2. Формирование начальной структуры сети

Домены можно разделить на две группы: один домен A , решающий задачу определения текущего значения износа, и N доменов $B = \{B_1, B_2, \dots, B_N\}$, решающих задачу прогнозирования износа режущего инструмента в каждый период прогнозирования.

Домен, отвечающий за определение текущего состояния инструмента, обучается до рабочего состояния. После этого данный домен изолируется от входных сигналов от других доменов, вследствие чего при последующем дополнительном обучении доменов подсистемы прогнозирования не оказывается влияние на подсистему определения текущего износа режущего инструмента.

Весовые коэффициенты связей нейронов, находящихся в разных доменах, будут иметь малые значения, и их можно будет заменить усредненными весовыми коэффициентами:

$$z_{i,j} = \frac{1}{S} \sum_{l=1}^h \sum_{k=1}^h w_{l,k}, \quad (3)$$

где S — число ненулевых весовых коэффициентов связи между нейронами доменов B_i и B_j . При этом нейрон с номером l находится в домене B_i , а нейрон с номером k находится в домене B_j .

Аналогично определяются усредненные весовые коэффициенты связи между нейронами домена A и нейронами доменов B . Тем самым получаем следующую матрицу связей между доменами Z :

$$Z = \begin{pmatrix} 0 & z_{1,2} & z_{1,3} & \dots & z_{1,N} & z_{1,N+1} \\ z_{2,1} & 0 & z_{2,3} & \dots & z_{2,N} & z_{2,N+1} \\ z_{3,1} & z_{3,2} & 0 & \dots & z_{3,N} & z_{3,N+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ z_{N,1} & z_{N,2} & z_{N,3} & \dots & 0 & z_{N,N+1} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

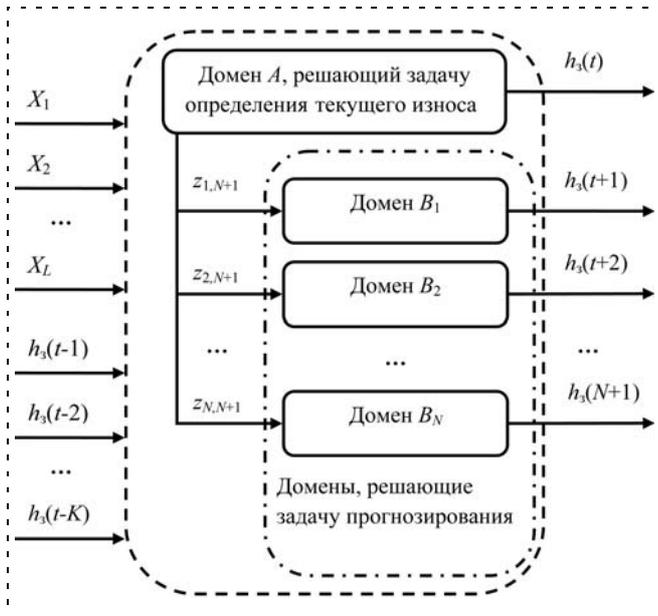


Рис. 3. Условное описание структуры нейронной сети в доменном представлении

В итоге, после фрагментации нейронной сети и приведения ее к доменной архитектуре многослойную нейронную сеть можно представить в виде, представленном на рис. 3.

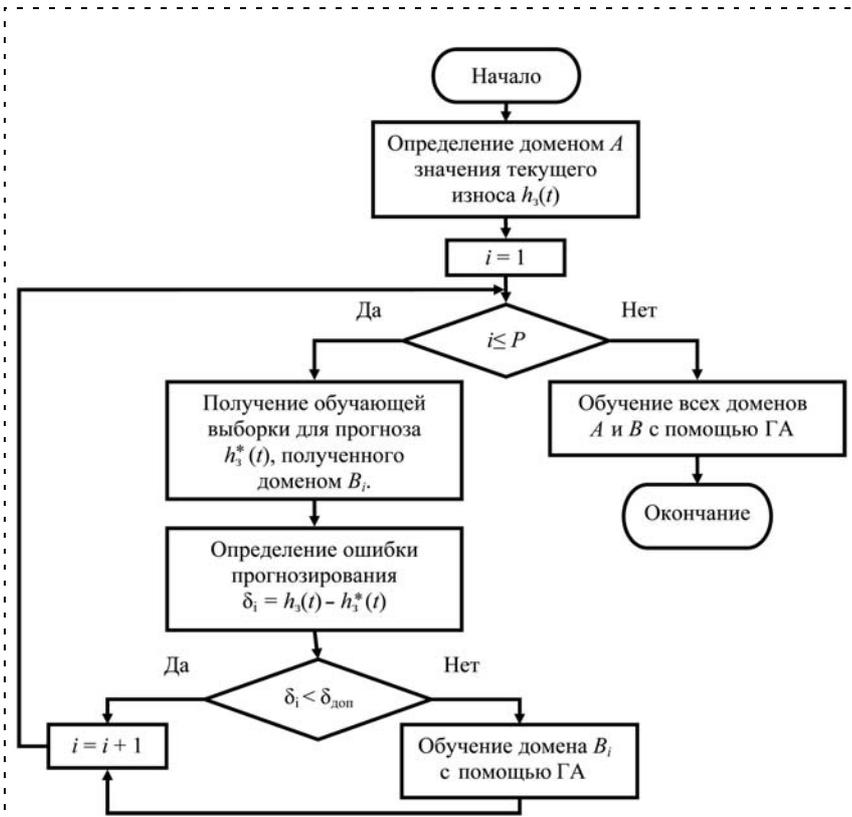


Рис. 4. Обучение доменов нейронной сети во время работы системы диагностики: P — номер домена B , на котором было получено $h_3^*(t)$ на предыдущем этапе прогнозирования ($t - 1$); $\delta_{\text{доп}}$ — допустимая ошибка прогнозирования

Обучение доменов нейронной сети во время работы системы диагностики

Дополнительное обучение нейронной сети с помощью генетических алгоритмов проводится в два этапа (рис. 4): обучение каждого домена B в отдельности, когда для формирования начальной популяции в качестве базовой матрицы весовых коэффициентов берется B_i , и обучение всех доменов целиком, когда каждый домен рассматривается как отдельный нейрон, и в качестве базовой матрицы весовых коэффициентов берется Z .

Непосредственно работу самого генетического алгоритма можно разделить на два этапа: формирование начальной популяции для каждого домена и поиск наиболее приспособленной особи популяции.

Начальная популяция формируется на основе приращения ненулевых $w_{i,j}$ элементов базовой матрицы весовых коэффициентов W на заданное значение дискреты приращения $\Delta\epsilon$ (%) в положительном и отрицательном направлении до максимального значения приращения ϵ_{max} (%). В результате формируется начальная популяция, состоящая из G особей:

$$G = 2 \frac{\epsilon_{\text{max}}}{\Delta\epsilon} D, \quad (5)$$

где D — число ненулевых элементов базовой матрицы.

Далее происходит поиск наиболее приспособленной особи популяции [5]:

- 1) выполняем кодирование начальной популяции;
- 2) оцениваем приспособленность каждой особи популяции

$$F(y_j) = \sum_j (y_j^{\text{ид}} - y_j^{\text{реал}}) \rightarrow \min; \quad (6)$$

- 3) отбираем родительские пары с помощью "рулетки";
- 4) применяем к каждой родительской паре оператор скрещивания с определенной вероятностью (если скрещивание не произошло, то потомки повторяют родителей);
- 5) применяем оператор мутации с определенной вероятностью;
- 6) формируем новую популяцию;
- 7) если ни одна из особей не соответствует заданным параметрам точности, то повторяем шаги 2—6.

Заключение

Приведение сети к доменному виду и применение генетических алгоритмов позволит выполнять параллельное обучение доменов, что существенно сокращает время обучения.

Дополнительное обучение во время работы сети обеспечивает повышение качества прогнозирования остаточного ресурса режущего инструмента при каждом такте работы системы.

Далее нейронная сеть переносится на аппаратную базу, состоящую из связанных между собой унифицированных элементов, реализующих фрагменты сети [6]. При этом во время работы системы формируется обучающая выборка для последующего дополнительного обучения доменов прогнозирования.

Экспериментальная проверка методики проводилась с помощью компьютерного моделирования, вследствие чего была выбрана наиболее упрощенная модель. В качестве косвенных диагностических параметров были выбраны значение радиальной силы резания и температуры в зоне резания. Глубина просмотра предыдущих значений была выбрана равной 10. Была сформирована нейронная сеть с двумя скрытыми слоями по 200 нейронов в каждом. Входной слой состоял из 12 нейронов, выходной слой из 11 нейронов. После первоначального обучения и фрагментации сети в течение 14 тактов проводили дополнительное обучение доменов прогнозирования, после чего сеть полноценно функционировала.

Выводы:

1. Применение нейронной сети повышает качество процесса диагностики.

2. Использование поэтапного обучения нейронной сети на 32 % увеличивает скорость по сравнению с применением только метода обратного распространения ошибки и на 36 % — по сравнению с применением только генетических алгоритмов.

Список литературы

1. **Мartiнов Г. М., Синопальников В. А., Григорьев А. С.** Устройство контроля износа и прогнозирование остаточной стойкости режущего инструмента для системы ЧПУ станка. Патент на изобретение № 2417140 от 27.04.2011.

2. **Сидоров А. С.** Мониторинг и прогнозирование износа режущего инструмента в мехатронных станочных системах. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. по спец. 05.13.06, Уфа-2007.

3. **Кабак И. С., Суханова Н. В.** Доменная нейронная сеть. Патент на полезную модель № 72084 от 03.12.2007.

4. **Кабак И. С., Степанов С. Ю.** Разработка алгоритма разбиения нейронной сети на фрагменты и исследование его схожимости // Тр. междунар. научно-техн. конф. "Информационные средства и технологии". Т. 3. М.: Изд. МЭИ. С. 122—128.

5. **Кабак И. С., Васенко С. М.** Обучение больших нейронных сетей с помощью генетических алгоритмов // Тр. междунар. науч.-техн. конф. "Информационные средства и технологии". Т. 3. М.: МЭИ. С. 115—121.

6. **Кабак И. С., Суханова Н. В.** Модульная вычислительная система. Патент на ПМ № 75247 (27.07.2008).

ИНФОРМАЦИЯ



23—24 марта 2013 г. в Ханчжоу (Китай) состоится

Международная конференция по мехатронике и системам автоматического управления — 2013

2013 International Conference on Mechatronics and Automatic Control Systems (ICMS 2013)

Конференция представляет собой форум для исследователей, преподавателей, инженеров и официальных лиц, имеющих отношение к мехатронике и системам автоматического управления, а также способствует распространению последних результатов научных исследований и обмену мнениями о будущих направлениях исследований в этих областях.

Тематика конференции:

Системы механизации и автоматизации производства

- Моделирование производственных процессов
- Компьютеризированные производственные системы
- CAD/CAM/CIM моделирование механической динамики
- Измерение вибрации и анализ надежности
- Диагностика неисправностей и теория технического обслуживания
- Интеллектуальная мехатроника и робототехника
- Элементы, конструкции, механизмы и применение микро- и наносистем
- PDM/ERP системы, логистика и управление поставками
- Разработка подвижных устройств и безопасность

Обработка сигналов

- Теория обработки сигналов, методы адаптивной и слепой обработки сигналов
- Обработка изображений, видео и речевых сигналов
- Многоканальная обработка сигналов
- Обработка сигналов для анализа временных рядов
- Теория и анализ ошибок

Теория управления

- Искусственный интеллект, интеллектуальная оптимизация и управление
- Моделирование систем управления
- Автоматизация взаимодействия системы "человек—машина"
- Промышленная автоматизация, управление технологическими процессами
- Управление компьютерными сетями
- Автомобильные системы управления и автономные транспортные средства

Подробная информация на сайте: www.myicms.org

УДК 62-40; 681.324

А. С. Максименко¹, инженер,
Б. Е. Федун^{1,2}, д-р техн. наук, проф., нач. сектора,
Р. В. Чучвага¹, инженер,
¹ ФГУП "ГосНИИАС",
² Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

Компьютерная система "Динамический граф" для оценки реализуемости алгоритмов деятельности оператора

Рассмотрена компьютерная система "Динамический граф", созданная для поддержки инженеров-проектировщиков, разрабатывающих спецификации бортовых алгоритмов системообразующего ядра антропоцентрического объекта. Дается ее описание и пример ее использования при построении графа решений оператора.

Ключевые слова: глобальный уровень управления антропоцентрического объекта, граф решения оператора, компьютерная система, временные задержки

Введение

Под *антропоцентрическим объектом* (Антр/объект) понимается объект, у которого задачи оперативного целеполагания (*первый глобальный уровень управления объектом* (ИГЛУУ)) и задачи определения способа достижения оперативно назначенной цели (*второй глобальный уровень управления объектом* (ПГЛУУ)) решаются экипажем [1, 2]. Отметим, что задачи ИГЛУУ и ПГЛУУ — это задачи системообразующего ядра Антр/объекта.

На этапе разработки *алгоритмов бортового алгоритмического и индикационного обеспечения* (АиИО) системообразующего ядра Антр/объекта возникает необходимость, прежде всего, в определении их состава (спецификации). В АиИО входят *алгоритмы деятельности экипажа* (АДЭ) Антр/объекта и *алгоритмы, реализуемые в бортовых цифровых вычислительных машинах* (БЦВМ-алгоритмы). На стадии проектирования бортового АиИО возникает необходимость проводить экспресс-оценки реализуемости каждым членом экипажа (оператором) его АДЭ [3] и реализуемости определившегося состава БЦВМ-алгоритмов на выбранных типах БЦВМ в предлагаемой конфигурации *бортовой цифровой вычислительной сети* (БЦВС).

При решении задач ИГЛУУ оператор использует главным образом *эвристические алгоритмы*, и поэтому при проектировании АиИО этого ГЛУУ инженеры ориентированы только на создание информационной модели внешней и внутрибортовой обстановки Антр/объекта на *информационно управляющем поле* (ИУП) кабины оператора. Время принятия решений в эвристических алгоритмах оценивается только на основе полунатурного эксперимента.

Задачи ПГЛУУ операторы решают, используя *перцептивно-опознавательные* (π -решения) и *речемыслительные решения* (ρ -решения). На эти алгоритмы и ориентируются инженеры при проектировании АиИО этапов функционирования (типовых ситуаций (ТС)) проектируемого Антр/объекта. Временные затраты оператора на принятие π - и ρ -решений поддаются аналитической оценке, которая базируется на результатах опытов психологов по оценке элементов процедуры восприятия человеком информации в поступающих к нему речевых сообщениях, восприятию информации с экранов ИУП (в π - и ρ -решениях) и выполнении оператором элементарных актов принятия ρ -решения на основе воспринятой информации.

Для оценки временных затрат оператора на выполнение в ТС всех разработанных для него АДЭ была создана компьютерная система "ГРО-оценка" [4]. Система позволяет строить граф решений оператора (ГРО), в вершины которого помещены АДЭ, а дуги показывают причинно-следственное отношение между АДЭ.

Опытная эксплуатация системы "ГРО-оценка" выявила ряд ее неудобств (недостатков), необходимость устранения которых привела к необходимости разработки второй версии этой системы "ГРО-оценка.V-2.0".

1. Облик технологии разработки спецификаций бортовых алгоритмов системообразующего ядра и состав поддерживающих ее компьютерных систем

Сложившаяся в настоящее время технология разработки спецификаций бортовых алгоритмов системообразующего ядра Антр/объекта включает в себя следующие этапы (рис. 1):

А) разработку естественно-языкового технического документа "Логика работы системы "экипаж — бортовая аппаратура". Текст документа обычно структурируется по ТС функционирования проектируемого Антр/объекта и по их *проблемным субситуациям* (ПрС/С). Семантическая целостность этого технического документа контролируется компьютерной системой "Логика — Текст — Анализ", облик которой описан в работе [5];

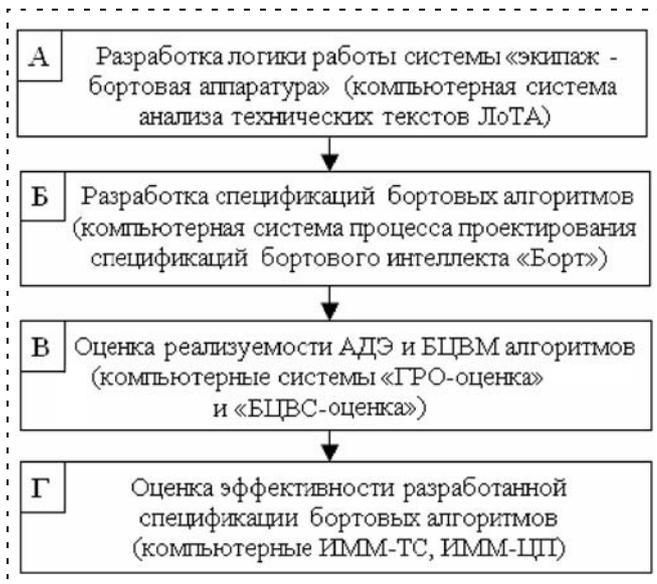


Рис. 1. Этапы разработки спецификаций бортовых алгоритмов системообразующего ядра антропоцентрического объекта и компьютерные системы поддержки их проектирования

Б) разработку спецификаций бортовых алгоритмов системообразующего ядра Антр/объекта, включающих в себя БЦВМ-алгоритмы и АДЭ. Этап проектирования поддерживается компьютерной системой "Борт", облик которой описан в работе [6];

В) оценку реализуемости спроектированной спецификации бортовых алгоритмов:

- для БЦВМ-алгоритмов — реализуемость на бортовой цифровой вычислительной системе (БЦВС — сеть БЦВМ);
- для АДЭ — реализуемость экипажем.

Этап разработки спецификаций частично обеспечивается компьютерными системами "ГРО-оценка" [4] и "БЦВС-оценка";

Г) оценку эффективности разработанной спецификации бортовых алгоритмов. Этап обеспечивается системой компьютерных имитационных математических моделей типовых ситуаций (ИММ-ТС) функционирования Антр/объекта и имитационной математической моделью алгоритмов уровня оперативного целеполагания (ИММ-ЦП), в которой обязательно задействован экипаж [7].

2. Компьютерная система "ГРО-оценка" и направления ее развития

Находящаяся в эксплуатации компьютерная система "ГРО-оценка" [4] разрабатывалась как для работы совместно с упомянутыми выше компьютерными системами, так и для автономного режима работы. В последнем случае инженер-проектировщик (пользователь) вводит в систему "ГРО-оценка" необходимую информацию вручную.

С помощью средств системы "ГРО-оценка" инженер:

- строит ГРО для каждой ТС функционирования проектируемого Антр/объекта;

- вводит в ГРО временные оценки выполнения оператором элементов его деятельности;
- получает из системы "ГРО-оценка" общее время, затрачиваемое оператором на выполнение всех алгоритмов деятельности оператора, по каждой ветви графа с оценкой выдерживания временных ограничений на выполнение. Система "ГРО-оценка" проводит расчеты временных затрат не только для каждой ветви графа, но и для любых заданных отрезков внутри любой ветви ГРО;
- подготавливает исходные данные для интерпретации спроектированных АДЭ в компьютерных системах ИММ-ТС.

В систему "ГРО-оценка" пользователь вводит по каждой ветви ГРО:

- оптимальное размещение участков слежения оператора;
- время, затрачиваемое оператором на каждый алгоритм деятельности оператора, и среднеквадратическое отклонение этого времени.

Система "ГРО-оценка":

- рассчитывает для каждой ветви ГРО общее время (и среднеквадратическое отклонение этого времени), затрачиваемое оператором на все алгоритмы деятельности оператора, входящие в эту ветвь;

- полученные оценки времени, затрачиваемого оператором на выполнение всех алгоритмов деятельности, сравниваются с указанными для них временными ограничениями максимально допустимого времени работы оператора. По результатам оценок выносится решение о реализуемости оператором за заданное время спроектированного состава алгоритмов деятельности, и выделяются наиболее напряженные участки работы оператора (узкие места ГРО).

В процессе эксплуатации программы "ГРО-оценка" был выявлен ряд ее недостатков и направлений ее совершенствования. Все полученные недостатки и направления были проанализированы и разбиты на подгруппы:

- технические недостатки (ошибки работы ПО, исключительные ситуации);
- эргономичность (удобство интерфейса);
- функциональность (возможности).

Остановимся на них подробнее.

Технические недостатки системы "ГРО-оценка":

а) если система "ГРО-оценка" получает входную информацию из системы "Борт", то информация должна поступать в виде текстового файла. Необходимо реализовать потоковую загрузку входной информации в программное обеспечение (ПО) в режиме реального времени;

б) при загрузке проекта на персональный компьютер, который использует разделитель дробной части в виде точки, а не запятой, возникает ошибка работы ПО. Соответственно, отсутствует возможность корректно открыть любой проект, в котором использовалась точка в виде разделителя дробной части числа.

Недостатки эргономичности и функциональности системы "ГРО-оценка":

а) для построения ГРО с помощью встроенных средств в "ГРО-оценка" реализованы необходимые графические примитивы и существует возможность редактирования некоторых свойств этих примитивов. Однако набор редактируемых свойств очень ограничен: отсутствует масштабируемость используемых примитивов; ограничена длина текста в примитиве, нет настройки цвета, шрифта; нет возможности расширения набора компонентов;

б) при построении ГРО: ограничена область построения ГРО, слабая система настройки связей (настройка связей проводится только по утвержденному алгоритму); нет возможности визуально определить, к какому типу относится решение (π -решение, ρ -решение или π - ρ -решение); нет возможности оперативного добавления кадров индикации и используемых оператором органов управления;

в) расчет временных затрат экипажа на реализацию каждого АДЭ следует внести в систему вместе с возможностью оперативно предъявлять оператору по его запросу таблицы временных затрат человека на выполнение отдельных элементов АДЭ;

г) предоставляется возможность проведения анализа только одной ветки ГРО за раз. Необходимо реализовать автоматический анализ всех существующих ветвей графа с наглядным выводом результатов по каждой проанализированной ветви с указанием расчетных данных и прочей статистической информацией;

д) необходимо реализовать автоматическое оптимальное размещение участков слежения по всем веткам ГРО [8];

е) одновременно с построением ГРО пользователь должен иметь возможность строить сопутствующую ему схему бортовых алгоритмов с автоматическим контролем полноты взаимного информационного обмена между ней и ГРО.

3. Компьютерная система "Динамический граф"

Для поэтапного устранения отмеченных недостатков системы "ГРО-оценка" разработана для опытной эксплуатации автономно работающая компьютерная система "Динамический граф", являющаяся элементом системы "ГРО-оценка.V2.0".

В ней предусматривается:

- построение ГРО различной направленности;
- внесение изменений в граф на любом из этапов проектирования внутри системы;
- добавление в ГРО и проект дополнительной информации (индикация, используемые органы управления на информационно управляющем поле кабины оператора);
- сохранение проекта, открытие проекта из файла;
- печать информации в графическом виде;
- построение отчета по ГРО с возможностью указания дополнительных параметров;

- получение справочной информации о работе программного обеспечения (ПО);
- построение отчета по ГРО с возможностью указания дополнительных параметров;
- вывод отчета по графу и сохранение в файл;
- получение справочной информации о работе программного обеспечения (ПО).

3.1. Функциональные требования, предъявляемые к компьютерной системе "Динамический граф"

Главной задачей при разработке системы "Динамический граф" являлось обеспечение удобства работы пользователя, которое достигается за счет наглядного графического представления ГРО и возможности создания детального отчета.

Предполагается, что первоначальный этап проектирования ГРО будет происходить в ПО "Динамический граф". Существует возможность динамического изменения данных в процессе проектирования ГРО, что в значительной мере сокращает время на разработку ГРО.

Система "Динамический граф" создана для максимального упрощения процесса построения ГРО и обладает достаточно большим набором инструментов для реализации и изменения данных. Существует возможность экспорта данных, сохранения информации. Разработано средство анализа графа, которое дает наглядную информацию о проектируемом ГРО. Данную информацию можно получить на любом из этапов его проектирования.

Реализация перечисленных выше возможностей была осуществлена с помощью среды программирования Delphi 7.

В ПО "Динамический граф" выделим следующие блоки:

1) модули для рисования графических объектов, а именно вершин графа (примитивов), связей (дуг) и т. д. Название модулей:

- **DrawObjects1.pas**;
- **DrawObjects2.pas**;

2) модуль главной формы и модуль свойств объекта, через которые в большей мере осуществляется управление объектами. Название модулей:

- **main.pas**;
- **ObjInspector.pas**;

3) модуль анализа и вывода отчета:

- **Unit2.pas**.

Для работы ПО "Динамический граф" необходимо, чтобы вычислительная и аппаратная среда удовлетворяла следующим требованиям:

- операционная система — Windows 98 и более старые версии;
- процессор 500 МГц;
- RAM 128 Мбайт;
- ROM 15 Мбайт для самой программы;
- графическая карта 128 Мбайт;
- наличие средств ввода и вывода информации.

Для обеспечения полной функциональности ПО требуется наличие установленных программ Micro-

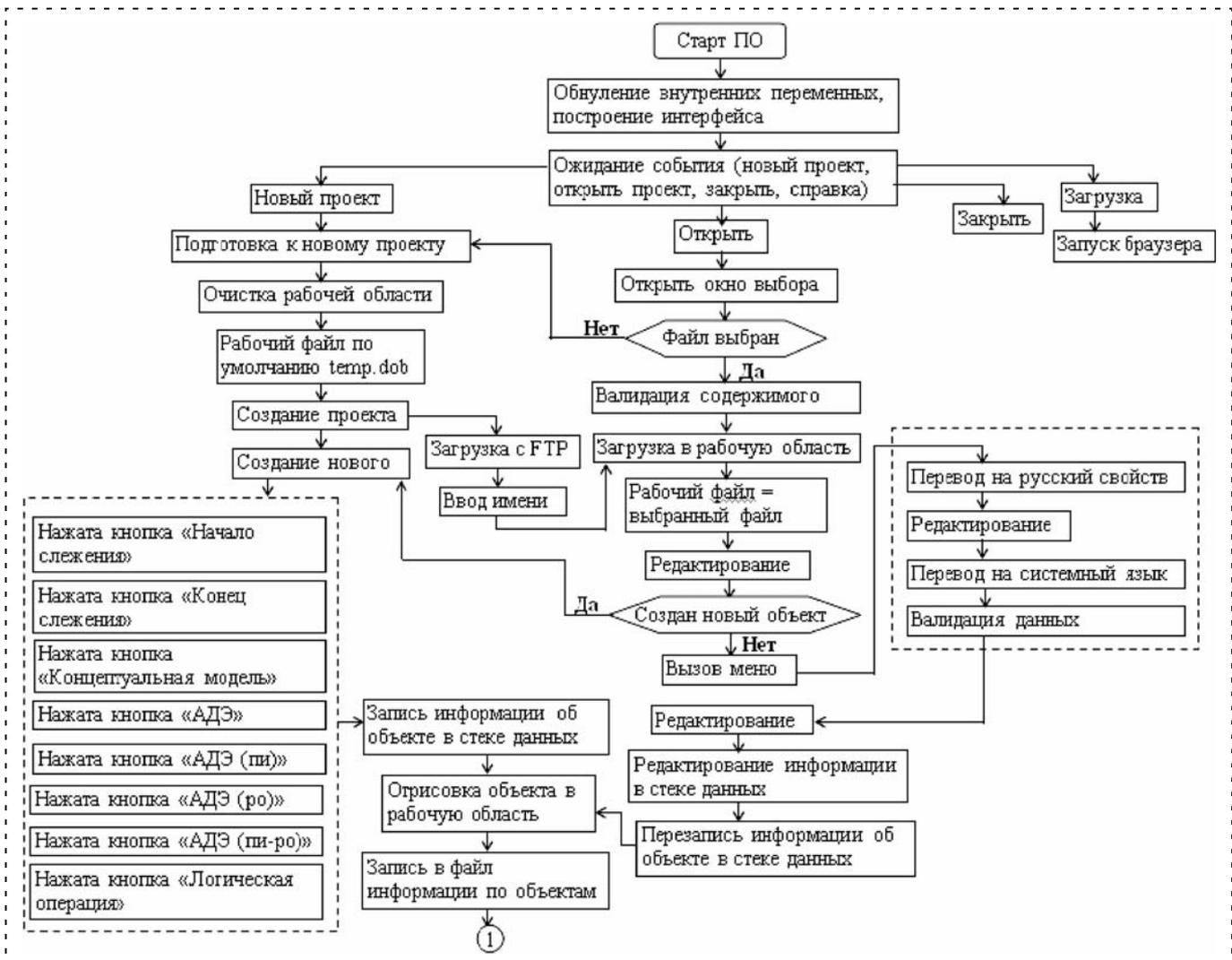


Рис. 2. Блок-схема компьютерной системы "Динамический граф" (часть 1)

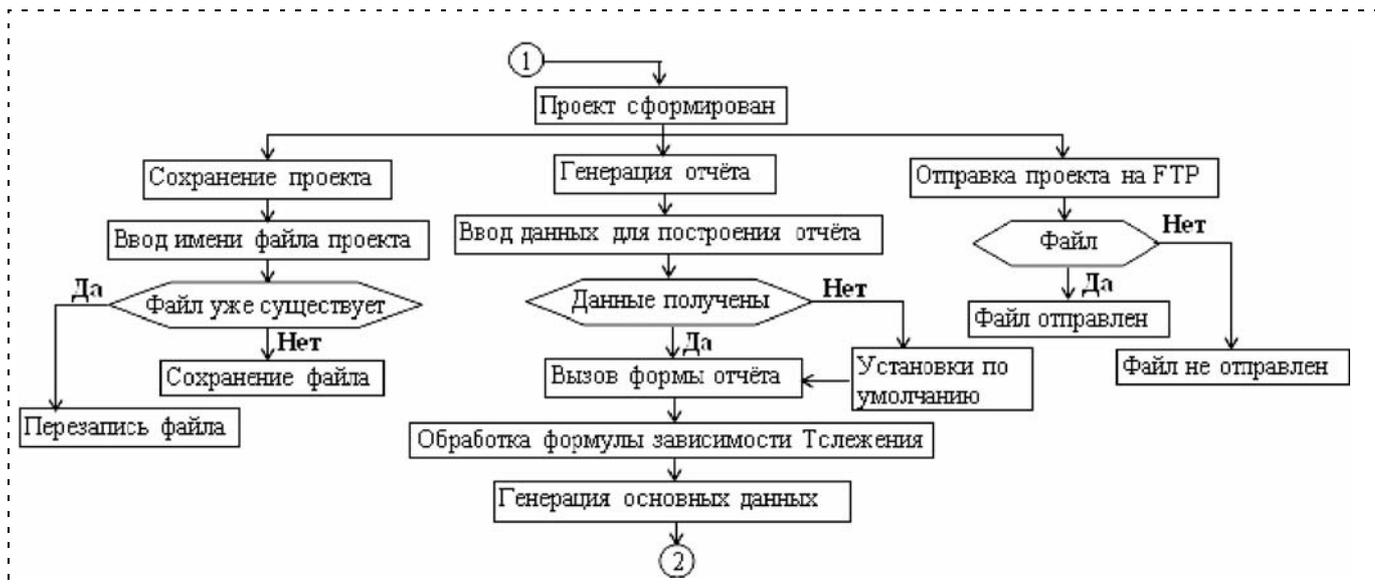


Рис. 3. Блок-схема компьютерной системы "Динамический граф" (часть 2)

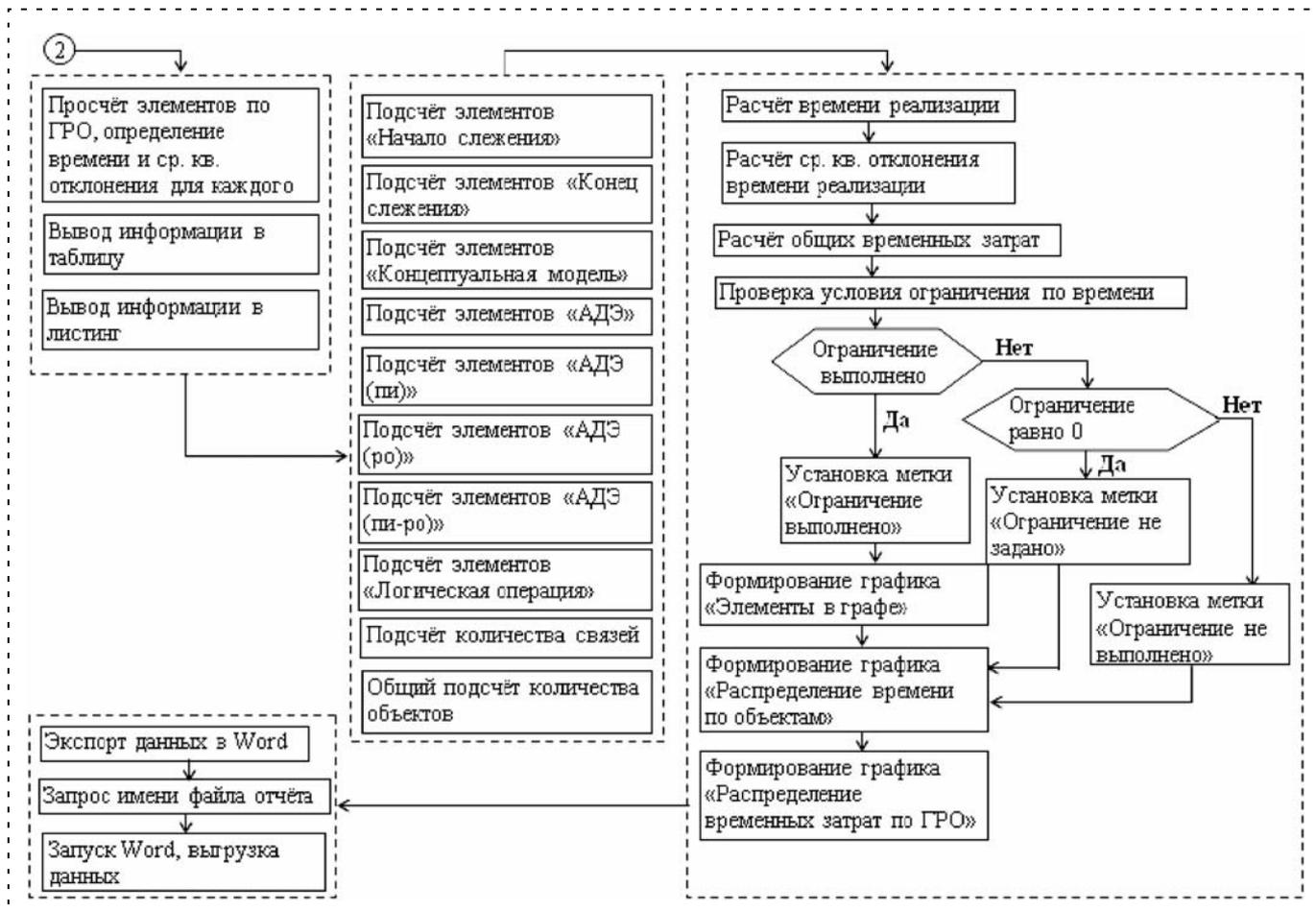


Рис. 4. Блок-схема компьютерной системы "Динамический граф" (часть 3)

soft Excel, Microsoft Word, а также настроенного соединения с FTP-сервером для сетевого обмена данными. Следует отметить, что ПО способно работать и без перечисленных выше программ, но в этом случае функционал будет ограничен.

Схема компьютерной системы "Динамический граф" приведена на рис. 2–4.

3.2. Процедура построения ГРО с использованием программы "Динамический граф"

Процесс построения ГРО можно разбивать на несколько этапов:

1. Создание рабочего поля. Нажимаем кнопку "Новый проект" или идем в меню "Файл" и выбираем "Новый".

2. Непосредственное построение ГРО. Доступные, по умолчанию, объекты (рис. 5):

- начало слежения (прямоугольник с боковыми стрелками, направленными вниз);
- конец слежения (прямоугольник с боковыми стрелками, направленными вверх);
- решение оператора (прямоугольники с обозначением в левом верхнем углу типа решения: π , ρ , $\pi-\rho$);
- реализация принятого решения (прямоугольник);

- смена концептуальной модели поведения оператора (прямоугольник с двойными сторонами);
- логическая операция (ромб).

3. Редактирование свойств созданных объектов. Следует отметить, что набор свойств объектов может меняться в зависимости от выбранного объекта, часть свойств является постоянными для всех категорий объектов.

Набор доступных свойств представлен на рис. 6.

4. Расстановка связей между объектами.

5. Добавление индикации к ГРО.

Индикацию можно добавлять в проект в виде любой картинки в формате "*.bmp".

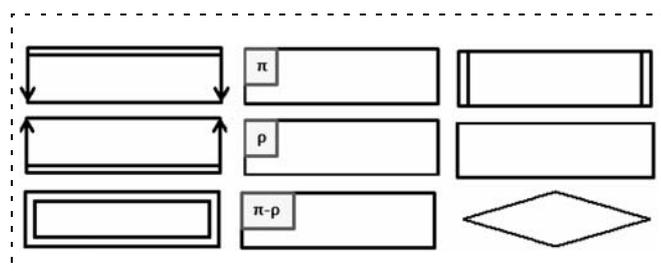


Рис. 5. Объекты системы "Динамический граф"

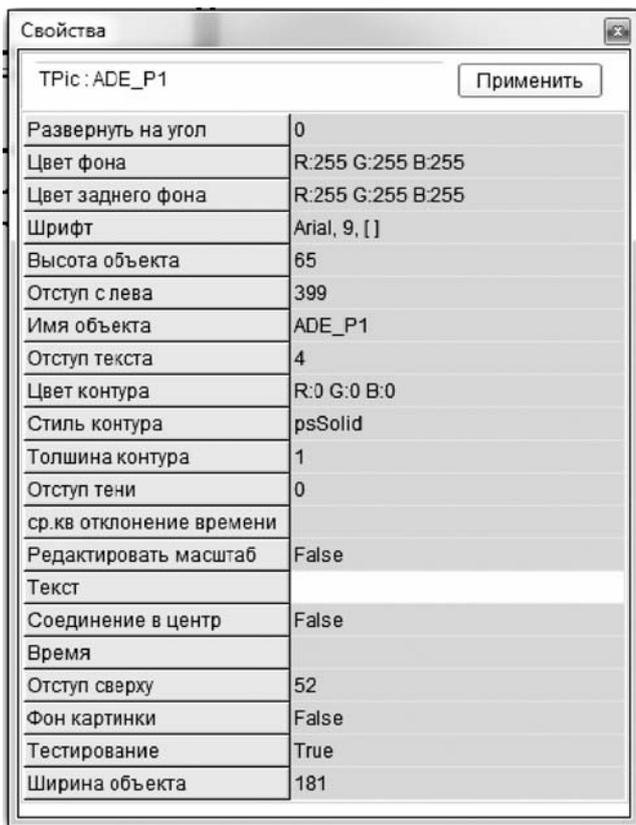


Рис. 6. Редалируемые свойства объектов

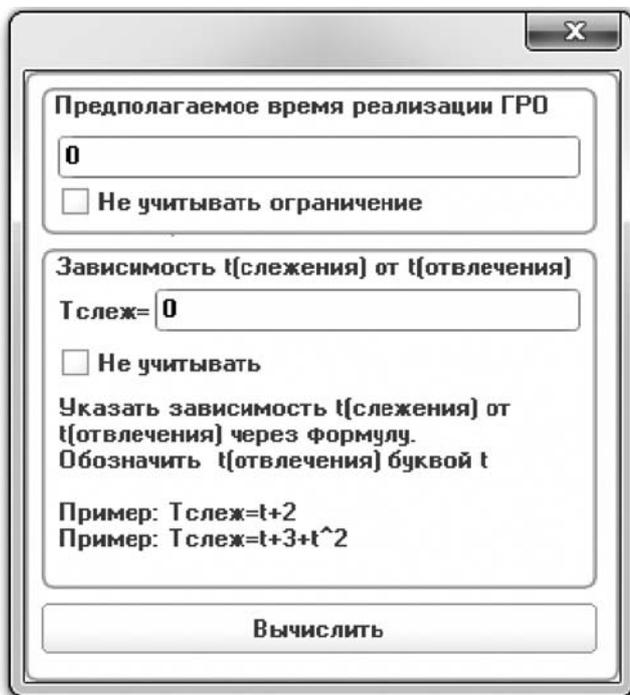


Рис. 7. Доступные временные ограничения

Если в ПО нет необходимой индикации, ее можно создать самостоятельно в программе Paint, либо воспользоваться встроенной функцией запроса индикации с FTP-сервера.

6. Выбор необходимой ветви ГРО для построения отчета.

Строим отдельную ветвь для анализа либо для всех объектов, которые не должны участвовать в анализе, в их свойствах изменяем значение параметра "Тестирование" на "False".

7. Задание ограничений и зависимостей.

Существует возможность задать ограничение по времени для рассматриваемой ветви ГРО, а также указать зависимость $t_{\text{слеж}} = f(t_{\text{отвлечения}})$ (рис. 7).

8. Анализ данных отчета (рис. 8, см. третью сторону обложки).

9. При необходимости можно внести изменения в ГРО, экспортировать данные из отчета в Word, сохранить проект, а также отправить его на FTP-сервер.

Примечание. Стоит отметить, что существуют весьма мощные системы для построения блок-схем (графов), такие как Microsoft Visio. Они предоставляют всю необходимую функциональность для построения ГРО, но они не предоставляют возможность выполнения специфических расчетов, связанных с временными задержками, и соответствующего анализа построенного ГРО. Поэтому разработка ПО, которое автоматизирует расчеты, выполняет анализ, необходимый для повышения качества и скорости построения ГРО. Как раз для этих целей и была разработана система "Динамический граф".

3.3. Примеры построения ГРО и оценка временных затрат на его реализацию

На основании описания работы летчика истребителя F-16 [9–14] в ТБС "Дальний воздушный бой" построен с помощью системы "Динамический граф" ГРО (рис. 9), отражающий работу летчика в ее проблемной субситуации "Нападение".

Расчет временных затрат летчика на каждый АДЭ, вошедший в ГРО. По методике оценки временных затрат оператора на реализацию его АДЭ, приведенной в работе [3], рассчитаем затраты по каждому АДЭ, вошедшему в ГРО. Согласно этой методике [3] выполнение действия оператора состоит из трех этапов: появление стимул-сигнала (слуховое, зрительное или тактильное раздражение), осознание какой-либо информации, связанной с этим стимул-сигналом, и непосредственно выполнение ручных операций. Реакция на стимул-сигнал для различных органов чувств (анализаторов) и операторов различна, поэтому в расчетах возьмем усредненное значение реакции для зрительного анализатора 0,18 с и усредненное значение реакции оператора 0,1 с. Для оценки восприятия информации также воспользуемся следующими усредненными данными:

- восприятие транспаранта — 0,2 с;
- восприятие условного знака — 0,3 с;
- восприятие одной цифры — 0,2 с;
- восприятие одной буквы — 0,2 с.

Задержку на выполнение одной ручной операции примем равной 0,5 с.

Согласно указанной методике [3] для обычных условий максимальное среднеквадратичное отклонение времени восприятия информации рассчитывается как

$$\sigma = 0,3\tau,$$

где $\tau = \tau_{\text{реакции}} + \tau_{\text{восприятия}}$

Полное время, затрачиваемое оператором на выполнение действия (время отвлечения), рассчитывается как

$$\tau_{\text{отвл}} = \tau_{\text{ручные операции}} + (\tau + 3\sigma).$$

1. *Принятие решения о пуске ракеты:*

- зрительный анализатор — 0,18;
 - время инерции — 0,1;
 - восприятие транспаранта ДДП на ИЛС — 0,2;
 - восприятие условного знака текущей дальности — 0,3.
- Таким образом, имеем

$$\tau_1 = 0,18 + 0,1 + 0,2 + 0,3 = 0,78;$$

$$\sigma_{1\text{max}} = 0,30 \cdot 0,78 = 0,234.$$

2. *Подготовка пуска ракеты с оптимальной дистанции:*

- восприятие LoftAngle:
 - зрительный анализатор — 0,18;
 - время инерции — 0,1;
 - две цифры — 0,2 + 0,2;
- восприятие вспомогательной информации:
 - зрительный анализатор — 0,18;
 - время инерции — 0,1;
 - A/F-role две цифры и буква — 0,2 + 0,2 + 0,2;
- коррективировка Loft Angle с помощью РУС:

исходное положение рук летчика: левая — на РУД, правая — на РУС, поэтому задержки на реализацию операции не учитывается. Время данной операции зависит от расположения цели относительно самолета.

Таким образом, имеем

$$\tau_{1,2} = 0,18 + 0,1 + 0,2 + 0,2 + 0,18 + 0,1 + 0,2 + 0,2 + 0,2 = 1,56;$$

$$\sigma_{1,3\text{max}} = 0,30 \cdot 1,56 = 0,468.$$

3. *Реализация пуска:*

- нажатие кнопки Weapon Release — 0,5 с.

4. *Оставшееся время до попадания ракеты в цель:*

- восприятие времени:
 - зрительный анализатор — 0,18;
 - время инерции — 0,1;
 - буква и две цифры — 0,2 + 0,2 + 0,2;
- восприятие вспомогательной информации:
 - зрительный анализатор — 0,18;
 - время инерции — 0,1;
 - A/F-role две цифры и буква — 0,2 + 0,2 + 0,2.

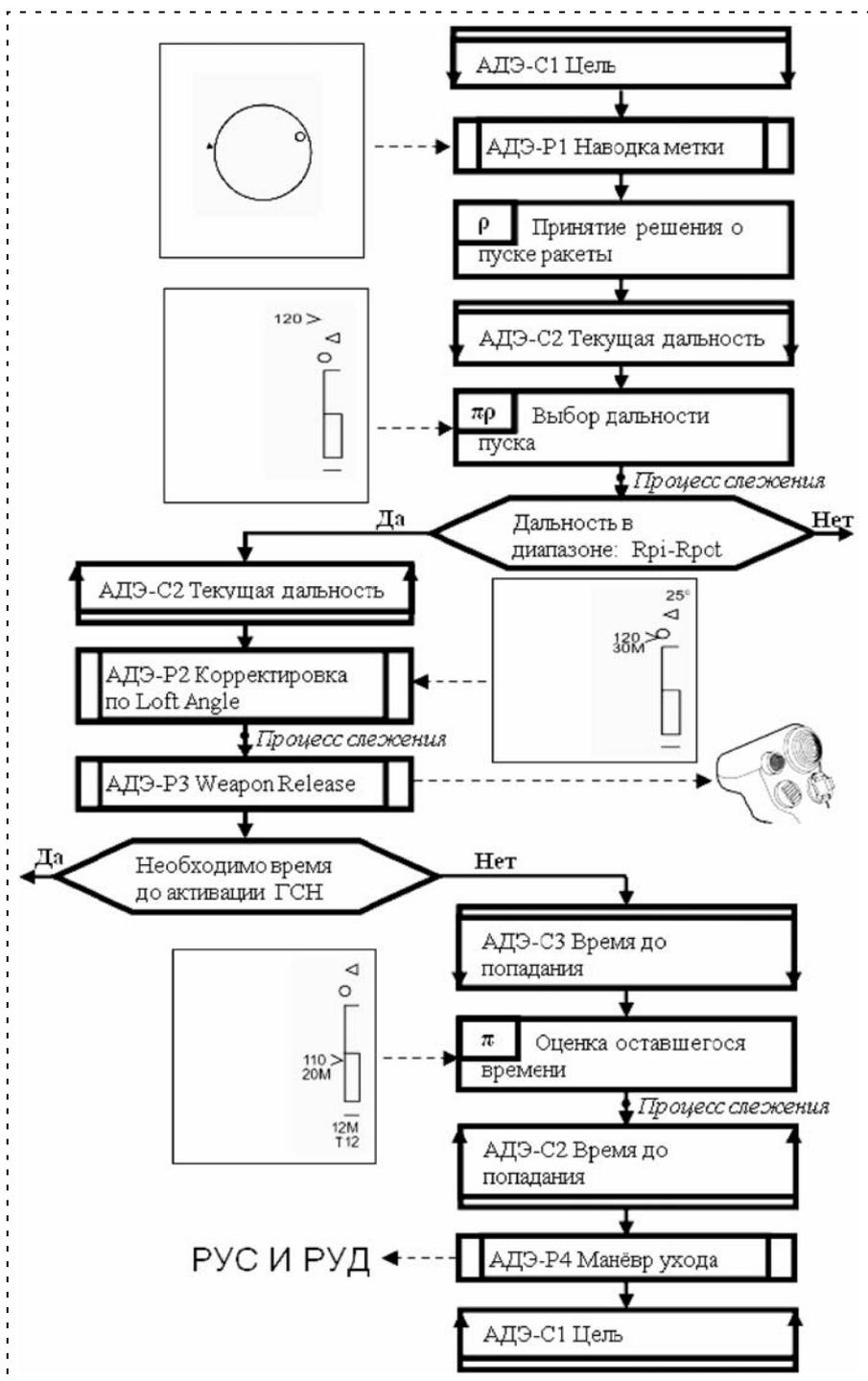


Рис. 9. ГРО для проблемной ситуации "Нападение"



Рис. 10. Кусочно-линейная аппроксимация экспериментальной зависимости времени слежения от времени отвращения

Таким образом, имеем

$$\tau_{1,2} = 0,18 + 0,1 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,18 + 0,1 + 0,2 + 0,2 + 0,2 = 1,76;$$

$$\sigma_{1,2 \max} = 0,30 \cdot 1,76 = 0,528.$$

Рассчитаем время, которое летчик тратит в процессе слежения, связанного с управлением самолета. На рис. 9 точками обозначены моменты, когда летчик может обратиться к процессу слежения. Для расчетов воспользуемся экспериментальной зависимостью времени слежения от времени отвращения (рис. 10). Время отвращения — это, в данном случае, время на реализацию всех решений и действий летчика между двумя последовательными слежениями.

Обращение к слежению № 1:

$$\tau_{\text{отвл}1} = (0,78 + 3 \cdot 0,234) = 1,482;$$

$$\tau_{\text{слеж}1} = 1,241.$$

Обращение к слежению № 2:

$$\tau_{\text{отвл}2} = (1,56 + 3 \cdot 0,468) = 2,964;$$

$$\tau_{\text{слеж}2} = 1,982.$$

Обращение к слежению № 3:

$$\tau_{\text{отвл}3} = 0,5 + (1,76 + 3 \cdot 0,528) = 3,844;$$

$$\tau_{\text{слеж}3} = 2,844.$$

Полное время, которое потратит оператор на выполнение всех АДЭ, вошедших в представленный на рис. 9 ГРО, составит:

$$\tau_{\max} = \tau_{\text{отвл}1} + \tau_{\text{слеж}1} + \tau_{\text{отвл}2} + \tau_{\text{слеж}2} + \tau_{\text{отвл}3} + \tau_{\text{слеж}3} = 1,482 + 1,241 + 2,964 + 1,982 + 3,844 + 2,844 = 14,357.$$

Элементы итогового отчета, полученного из системы "Динамический граф", по которым можно судить о временных затратах, показаны на рис. 11 (см. третью сторону обложки).

Заключение. Компьютерная система "ГРО-оценка V2.0:Динамический граф" позволяет оперативно строить граф решений оператора (ГРО) и проводить по нему оценку временных затрат оператора на выполнение им его алгоритмов деятельности, проверять выполнение временных ограничений, наложенных на ветки ГРО и внутри их; генерировать отчет по облику ГРО и оценке его реализуемости.

Список литературы

1. **Федунов Б. Е.** Оценка эффективности спецификаций алгоритмов бортового интеллекта антропоцентрических объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2002. № 5. С. 21—24.
2. **Федунов Б. Е.** Макромодель пилотируемых летательных аппаратов для разработки алгоритмов бортового интеллекта // Мехатроника, автоматизация, управление. Приложение "Управление и информатика в авиакосмических системах". 2006. № 3. С. 13—16.
3. **Федунов Б. Е.** Методика экспресс-оценки реализуемости графа решений оператора антропоцентрического объекта на этапе разработки спецификаций алгоритмов бортового интеллекта // Изв. РАН. ТиСУ. № 3. 2002.
4. **Абрамов А. П., Выдрук Д. Г., Федунов Б. Е.** Компьютерная система оценки реализуемости алгоритмов деятельности экипажа // Изв. РАН. ТиСУ. № 4. 2006. С. 122—134.
5. **Невзорова О. А., Федунов Б. Е.** Система анализа технических текстов "ЛоТА": основные концепции и проектные решения // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2001. № 3. С. 138—149.
6. **Кондрикова Т. А., Федунов Б. Е.** "Борт" — компьютерная система процесса проектирования спецификаций "бортового интеллекта" // Изв. РАН. ТиСУ. 1999. № 3.
7. **Романенко А. В., Федунов Б. Е.** Компьютерные системы имитационного моделирования для отработки баз знаний бортовых интеллектуальных систем системообразующего ядра антропоцентрического объекта // Изв. РАН. ТиСУ. 2010. № 6. С. 102—121.
8. **Федунов Б. Е.** Оптимальные порожденные числовые последовательности в задачах размещения участков слежения при оценке алгоритмов деятельности оператора. I. // Изв. РАН. ТиСУ. 2012. № 2. С. 160—183.
9. URL: <http://www.lockheedmartin.com/data/assets/aeronautics/products/f16/F-16Brochure.pdf>
10. URL: http://www.geoconnections.org/developersCorner/situational_awareness/MASAS_Architecture_V1.pdf
11. URL: <http://www.fas.org/programs/ssp/man/uswpns/air/fighter/f16.html>
12. URL: http://www.militaryparitet.com/perevodnie/data/ic_perevodnie/776/
13. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/General_Dynamics_F16_Fighting_Falcon#Cockpit_and_ergonomics
14. URL: <http://www.famousplanes.info/f-16-fighting-falcon.php#3>

Ву Дык Лунг, канд. техн. наук, декан факультета вычислительной техники, Университет информационных технологий Вьетнамского национального университета, Хо Ши Мин, Вьетнам,

П. И. Падерно, д-р техн. наук, проф., pipaderno@list.ru,

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина),

Ф. Э. Сатторов, канд. техн. наук, Председатель РОО "МОСТ", Душанбе, Таджикистан

Человеческий фактор в корпоративных сетях

Часть 1. Модели и оценки

Описана проблема оценки качества функционирования корпоративных сетей с учетом деятельности человека-оператора, решающего различные задачи. Представлен ряд моделей, описывающих решение задач оператором в корпоративной сети. Разработаны критерии и подходы, направленные на получение аналитических оценок качества (безошибочности, своевременности, дохода) решения задач, как отдельным оператором, так и всеми операторами, выполняющими свои функции с использованием корпоративной сети.

Ключевые слова: оператор, корпоративная сеть, модели, оценки, задачи, качество функционирования

Введение

При проектировании корпоративных сетей следует обращать внимание на специфику задач и особенности работы персонала, который будет с ними взаимодействовать. Ввиду того, что в корпоративных сетях выполняются задачи на базе дискретных алгоритмов, в качестве критериев для оценки функционирования сети целесообразно выбрать показатели безошибочности, быстродействия и дохода как на уровне отдельного оператора, так и на уровне всей корпоративной сети в целом (с учетом интенсивностей потоков задач).

Описание процесса решения задач в корпоративной сети

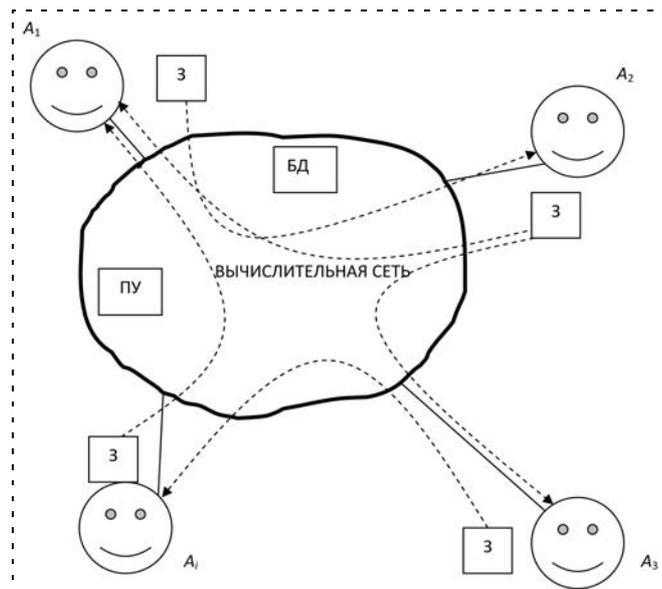
Корпоративная сеть (КС) представляет собой совокупность взаимодействующих элементов, включающую в себя не только логические, информационные и физические каналы, обеспечивающие реализацию вычислительных процессов, но и персонал, работающий в данной сети. Типовой пример процесса решения задач, обработки информации и передачи ее между операторами КС представлен на рис. 1.

Пусть в некоторый момент времени оператор A_1 решает некую задачу, причем в процессе решения данной задачи оператор A_1 может

- использовать свой компьютер, чтобы получить доступ к базам данных (БД) других компьютеров или серверов для получения нужной информации, обеспечивающей его дальнейшую работу (решение следующей задачи);
- использовать свой компьютер, чтобы получить доступ к различным периферийным устройствам (ПУ) (например, к принтерам для печати);
- отправить задачу через КС другому оператору (A_2) и дождаться от него ответа, чтобы продолжить свою работу (решать *эту же* задачу);
- отправить задачу через КС другому оператору (A_2) и дождаться от него ответа, чтобы продолжить свою работу (решать *следующую* задачу);
- отправить задачу через КС другому оператору (A_2) и, не дожидаясь ответа, продолжать свою работу (решать следующую задачу);
- оставить задачу на локальном компьютере и решать другие задачи, при этом решенная задача может быть доступна для других пользователей.

Этот процесс может продолжаться в течение всего рабочего дня как для оператора A_1 , так и для других операторов, взаимодействующих с ним в рамках КС.

Таким образом, процесс решения задач оператором в КС (процесс функционирования эрготехнической системы) является дискретным, и для оценки показателей эффективности, качества и надежности можно использовать обобщенный структурный метод [1, 2, 3]. Поскольку оператор A_i во время работы может получать задачи от различных источников, то ему необходимо (практически постоянно) принимать решение о том, какую задачу



Пример процесса решения задач в КС:

A_i — i -й оператор, работающий в данной КС; 3 — некоторая задача; БД — база данных; ПУ — периферийные устройства

решать раньше, а какую позже. При этом он может последовательно решать поступившие задачи, а может параллельно решать несколько задач сразу.

Для решения каждой из множества задач, предписанных некоторому оператору, требуется выполнение заданной последовательности операций. Отдельная операция является основным элементом деятельности оператора. Операция может состоять из одного или нескольких элементарных действий в зависимости от характеристик (индивидуальных особенностей, опыта работы и др.) оператора, так как определенную операцию один оператор может выполнить как одно действие, а другой оператор — за несколько действий. Необходимо заметить, что индивидуальный стиль деятельности оператора в значительной степени зависит от обучения, в процессе которого закладываются основные стереотипы действий. Каждая операция может характеризоваться вероятностью правильного выполнения и средним временем выполнения.

Модель функционирования корпоративной сети с учетом деятельности человека

Укрупненное описание КС (A) достаточно полно можно представить следующим кортежем:

$$A = \langle S, Q, F(B), G, C \rangle, \quad (1)$$

где S — описание состава и структуры системы; Q — информационное и программное обеспечение, необходимые для обеспечения функционирования КС и решения необходимых задач; F — множество функций, возлагаемых на систему (B — множество решаемых системой задач); G — персонал, работающий в организации и взаимодействующий с КС непосредственно или опосредованно; C — множество правил и инструкций, по которым функционирует корпоративная сеть, являющаяся составной частью некоторой надсистемы.

Кортеж (1) отражает структурное и функциональное описание КС, а также комплекс правил, организующих ее функционирование. Описанные компоненты могут быть представлены в более детализированном виде.

Структура КС также может быть представлена в виде кортежа

$$S = \langle S_1, S_2, S_3 \rangle,$$

где S_1 — перечень узлов и подсистем (рабочие станции, серверы и др.); S_2 — взаимосвязи между подсистемами и узлами (кабельные, оптоволоконные и беспроводные каналы связи); S_3 — множество автоматизированных (типовых или различных) рабочих мест операторов.

Информационное и программное обеспечение приобретает для обеспечения решения задач внешнего и внутреннего характера, которые по предварительному представлению Заказчика будут решаться с применением КС. После начала эксплуатации

множество задач существенно корректируется (расширяется), что приводит к необходимости приобретения и установки дополнительных программных средств.

Информационно-программное обеспечение может быть представлено в виде следующего кортежа:

$$Q = \langle J, Q_1, Q_2, Q_3 \rangle,$$

где J — информационное обеспечение, необходимое для обеспечения решения конкретных задач, характерных для данной КС; Q_1 — сетевое системное программное обеспечение, предназначенное для поддержки сетевого решения необходимых задач (операционная система, протоколы, драйверы и т. д.); Q_2 — системное программное обеспечение, предназначенное для обеспечения каждого компьютера в отдельности и поддержки решения на конкретном компьютере необходимых задач (операционная система и др.); Q_3 — прикладное программное обеспечение, предназначенное для обеспечения и поддержки решения необходимых задач.

Функции и задачи. Все множество функций, предназначенных для выполнения с помощью КС,

можно разбить на отдельные функции $F = \bigcup_{j=1}^k f_j$,

где под функциями f_j будем понимать множество недостаточно формализованных указаний, которые распадаются на комплексы задач, решаемые

оператором: $f_j = \bigcup_{i=1}^{k_j} c_{ij}$. Под задачами c_{ij} следует

понимать полностью определенные (полностью алгоритмизированные) наборы действий и операций, выполняемые как оператором, так и программно-техническими средствами КС и приводящие при правильном выполнении к требуемой цели. Действия оператора в КС обычно носят дискретный характер, так как отсутствует слежение и непрерывное управление.

Тогда $c_{ij} = \bigcup_{l=1}^{m_{ij}} d_{ijl}$, где d_{ijl} — дискретные алгоритмы решения для всего комплекса подзадач, входящих в задачу c_{ij} .

В идеальном случае должно выполняться соотношение $B = C = \bigcup_{i=1}^n \bigcup_{j=1}^{k_i} c_{ij}$, выполнение которого означает, что множество задач, предполагаемых к решению в КС, совпадает с множеством задач, решение которых является *необходимым в действительности*.

Персонал. Под персоналом, взаимодействующим с КС в процессе своей трудовой деятельности, следует понимать лицо (группу лиц), принимающее решение, операторов, непосредственно работающих на АРМ, входящих в состав КС, сотрудников организации, которые используют результаты решения задач, полученные с использованием КС, т.е.

общаются с КС опосредованно, а также лиц, обеспечивающих нормальное функционирование КС.

Персонал также может быть представлен в виде следующего кортежа:

$$G = \langle G_0, G_1, G_2, E_1, E_2 \rangle,$$

где G_0 — лицо, принимающее решение (ЛПР, группа ЛПР), участвующее в решении задач и выполнении основных функций; G_1 — группа (коллектив, множество) операторов, принимающих участие в решении задач как непосредственно, так и опосредованно; G_2 — администратор (группа администраторов), обеспечивающий функционирование корпоративной сети (КС) и решение поставленных задач; E_1 — структура организации взаимодействия персонала (формальные взаимосвязи: вертикальные, горизонтальные); E_2 — неформальные взаимоотношения в организации.

Ошибки руководства организации (ЛПР) обычно слабо связаны с функционированием КС. Несмотря на то что в работах [1, 2, 4] указано на необходимость формирования здорового психологического климата, данный процесс до сих пор недостаточно формализован, поэтому в качестве источников ошибок, возникающих при решении задач в КС, следует обратить внимание на множество G_1 и множество G_2 .

Это вызвано тем, что *недостатки в работе специалистов*

- из множества G_1 (сотрудников, операторов) влияют в основном на правильность (безошибочность) и своевременность решения задач, неправильное и/или несвоевременное решение которых сопряжено с дополнительным расходом ресурсов и всевозможными убытками (ущербом);
- из множества G_2 (администраторов), обеспечивающих работу КС, не всегда достаточно очевидно, хотя и непосредственно влияют на функционирование (или отказы) КС.

Множество G_1 может быть представлено в виде кортежа

$$G_1 = \langle g_{11}, g_{12}, \dots, g_{1n}, E_{11}, E_{21} \rangle,$$

где g_{1i} — i -й сотрудник; E_{11} — множество формальных взаимосвязей между операторами (подчиненность, зависимость по последовательности решения задач и др.); E_{21} — множество неформальных взаимосвязей между сотрудниками.

Необходимо заметить, что под символом g_{1i} понимается кортеж, описывающий основные особенности данного конкретного оператора:

$$g_{1i} = \langle h_{1i}, c_{1i}, u_{1i}, \psi_{1i}, \phi_{1i} \rangle,$$

где h_{1i} — комплекс профессиональных знаний, умений и навыков; c_{1i} — комплекс задач, решаемых данным конкретным оператором; u_{1i} — уровень оплаты труда; ψ_{1i} — психологические особенности (характеристики) оператора; ϕ_{1i} — психофизиологические особенности оператора.

Оценка качества функционирования корпоративной сети

♦ Оценка функционирования корпоративной сети (один оператор)

КС, обслуживающая одного оператора, строится для решения некоторого, практически полностью определенного, комплекса задач (как внешних по отношению к сети, так и внутренних), правильное и своевременное решение которых приносит некоторый доход, а неправильное и (или) несвоевременное решение связано с ущербом (штрафными функциями).

Пусть известно множество задач $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$, для решения которых предназначена разрабатываемая (создаваемая) КС. Пусть для каждой из этих задач известны (или по крайней мере достаточно точно спрогнозированы) следующие характеристики:

- интенсивность поступления задачи в систему (λ_i);
- ресурсные затраты, связанные с обеспечением решения задачи (g_i);
- доход от правильного и своевременного решения задачи (d_i);
- ущерб от неправильного и/или несвоевременного решения задачи (u_i).

Приведенные показатели характеризуют задачи, решаемые в КС.

Состав компонентов КС, ее структура, использование различных программных средств и интерфейса, а также квалификация и опыт оператора определяют следующие характеристики:

- вероятность правильного и своевременного решения задачи (p_i);
- среднее время решения задачи (t_i).

Для оценки эффективности решения i -й задачи можно использовать вектор

$$z_i = (p_i, t_i, r_i, s_i),$$

где r_i — средний доход от решения задачи с учетом штрафных функций и затраченных ресурсов:

$$r_i = p_i d_i - (1 - p_i) u_i - g_i = p_i (d_i + u_i) - u_i - g_i;$$

s_i — средний доход в единицу времени от решения задачи:

$$s_i = \frac{r_i}{t_i}.$$

Если все задачи поступают независимо друг от друга, то можно получить следующие оценки для средних значений дохода от решения задачи:

$$R = \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i r_i \right) \Bigg/ \sum_{i=1}^n \lambda_i = \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i (p_i (d_i + u_i) - u_i) \right) \Bigg/ \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

и времени решения задачи

$$T = \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i t_i \right) / \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

Для оценки эффективности функционирования КС также представляется целесообразным использовать вероятность решения некоторой средней задачи, которая может быть вычислена по следующей формуле, использующей мультипликативность вероятностей независимых событий:

$$P = \left(\prod_{i=1}^n p_i^{\lambda_i} \right)^{\left(1 / \sum_{i=1}^n \lambda_i \right)} = \exp \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \ln p_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i \right).$$

Наиболее полной и всесторонней характеристикой качества подобной КС является вектор, характеризующий ее надежность (безошибочность), производительность (быстродействие) и экономичность (доходность):

$$Z = (P, T, R).$$

Предложенный подход к формированию оценки качества функционирования КС достаточно полно характеризует построенную КС в целом.

♦ **Оценка корпоративных сетей как эрготехнических систем**

Если в системе не один оператор, то вероятности правильного и своевременного решения задач, а также продолжительность их решения зависят в основном от квалификации операторов, алгоритмов решения, от распределения функций как между операторами, так и между операторами и информационно-программно-техническими средствами КС. Насколько результативна КС, можно судить по конечному результату — степени достижения цели или по характеру процесса функционирования, ведущего к достижению цели. Для оценки степени достижения цели используем показатели эффективности и качества функционирования [1, 3, 5].

Пусть в некоторой КС работают n операторов A_1, A_2, \dots, A_n , и каждый оператор решает определенное множество задач $B_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im_i})$ с соответствующими интенсивностями поступления $\lambda_i = (\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{im_i})$, ресурсными затратами, связанными с решением задач $g_i = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{im_i})$; доходами от их правильного и своевременного решения $d_i = (d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{im_i})$ и убытками, связанными с неправильным и (или) несвоевременным решением $u_i = (u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im_i})$. Пусть для решения каждой задачи b_{ij} требуется выполнение операций

$\Pi_{ij} = (\pi_{ij1}, \pi_{ij2}, \dots, \pi_{ijr})$, и по каждой операции известны вероятности правильного и своевременного выполнения операции p_{ijk} и среднее время выполнения операции t_{ijk} ($k = 1, 2, \dots, r$). Тогда, используя обобщенный структурный метод [1, 2], можно определить вероятности правильного и своевременного решения каждой задачи β_{ij} и среднее время решения каждой задачи T_{ij} . Тогда для оператора A_i с множеством задач $B_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im_i})$ и интенсивностью их поступления $\lambda_i = (\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{im_i})$ можно оценить вероятности правильного и своевременного решения задач $(\beta_{i1}, \beta_{i2}, \dots, \beta_{im_i})$ и среднее время решения задач $T_i = (T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{im_i})$. Если все задачи к оператору поступают независимо друг от друга, то можно получить две оценки вероятности правильного и своевременного решения средней задачи для всего комплекса задач B_i :

$$\tilde{\beta}_i = \exp \left(\sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij} \ln \beta_{ij} / \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij} \right), \quad \bar{\beta}_i = \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij} \beta_{ij} / \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij}.$$

При этом выполняется неравенство $\tilde{\beta}_i \leq \bar{\beta}_i$ (среднее геометрическое взвешенное не превышает среднего арифметического взвешенного), причем равенство имеет место в тех случаях, когда вероятности правильного и своевременного решения всех задач равны между собой.

Аналогично можно вычислить среднее время и средний доход от решения задачи для всего комплекса задач, решаемых оператором A_i :

$$T_i = \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij} T_{ij} / \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij}, \quad R_i = \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij} R_{ij} / \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij}.$$

Тогда можно получить следующие оценки для средней вероятности правильного и своевременного решения задач КС:

- среднее геометрическое

$$\tilde{\beta} = \exp \left(\sum_{i=1}^n \left(\ln \tilde{\beta}_i \sum_{j=1}^{m_j} \lambda_{ij} \right) / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_j} \lambda_{ij} \right);$$
- среднее арифметическое средних геометрических

$$\hat{\beta} = \sum_{i=1}^n \left(\tilde{\beta}_i \sum_{j=1}^{m_j} \lambda_{ij} \right) / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_j} \lambda_{ij};$$
- среднее арифметическое

$$\bar{\beta} = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_j} \lambda_{ij} \beta_{ij} \right) / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_j} \lambda_{ij} = \sum_{i=1}^n \left(\bar{\beta}_i \sum_{j=1}^{m_j} \lambda_{ij} \right) / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_j} \lambda_{ij}.$$

При этом выполняется неравенство $\tilde{\beta} \leq \hat{\beta} \leq \bar{\beta}$.

Если суммарная нагрузка на всех операторов примерно одинакова, т. е. все интенсивности равны, то соотношения принимают более простой вид:

$$\tilde{\beta} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \tilde{\beta}_i} = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n \ln \tilde{\beta}_i}{n}\right);$$

$$\hat{\beta} = \sum_{i=1}^n \tilde{\beta}_i/n; \bar{\beta} = \sum_{i=1}^n \bar{\beta}_i/n.$$

Для оценки среднего времени решения средней задачи и среднего дохода можно использовать следующие формулы:

$$T = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij} T_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij}} \right) / \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij}} \right) =$$

$$= \left(\frac{\sum_{i=1}^n T_i \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij}} \right) / \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij}} \right);$$

$$R = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij} R_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij}} \right) / \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij}} \right) =$$

$$= \left(\frac{\sum_{i=1}^n R_i \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij}} \right) / \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij}} \right).$$

Замечание

При получении вышеприведенных результатов не принимались во внимание следующие обстоятельства:

- операторы могут иметь различную квалификацию;
- множества задач, решаемых операторами, могут быть полностью совпадающими ($\bar{B}_i = \bar{B}_j$) или частично и даже полностью различными $\bar{B}_i \cap \bar{B}_j = \emptyset, i \neq j$, т. е. операторы могут быть как специалистами широкого профиля (взаимозаменяемыми), так и специалистами узкого профиля.

Выводы

1. Предложены модели описания функционирования КС с учетом особенностей работы персонала, основанные на формировании множества кортежей, которые отражают как структурные, так и эксплуатационные особенности КС и позволяют формализовать описание и учет особенностей персонала.

2. Разработан комплекс показателей для оценки качества функционирования КС как эрготехнических систем, позволяющий учитывать особенности деятельности персонала, т. е. учитывать влияние человеческого фактора на эффективность эксплуатации КС.

3. Полученные аналитические выражения могут являться базовыми при оценке эффективности эксплуатации реальных КС с учетом работы персонала.

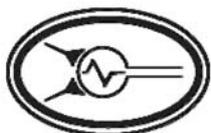
Список литературы

1. Информационно-управляющие человеко-машинные системы. Исследование, проектирование, испытания / Справочник под общ. ред. А. И. Губинского, В. Г. Евграфова. М.: Машиностроение, 1993. 512 с.
2. Падерно П. И., Попечителев Е. П. Надежность и эргономика биотехнических систем / Под общ. ред. проф. Е. П. Попечителева. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2007. 288 с.
3. Ву Дык Лунг, Падерно П. И. Комплексный метод оценки вероятности правильного решения оператором задач в локальных вычислительных сетях // Известия СПбГЭТУ. Информатика, управление и компьютерные технологии. 2005. Вып. 2. С. 32–36.
4. Падерно П. И., Сатторов Ф. Э. Системный администратор локальной вычислительной сети // Доклады академии наук Республики Таджикистан. 2009. Т. 52. С. 437–442.
5. Сергеев С. Ф., Падерно П. И., Назаренко Н. А. Введение в проектирование интеллектуальных интерфейсов: учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 108 с.

ИНФОРМАЦИЯ

21–25 января 2013 г. в Москве в НИЯУ МИФИ состоится

XV Всероссийская научно-техническая конференция «НЕЙРОИНФОРМАТИКА — 2013»



Сопредседатели конференции

д-р техн. наук, проф. **Б. Н. Оныкий** (НИЯУ МИФИ),
акад. РАН **В. Б. Бетелин** (НИИСИ РАН),
акад. РАН **Ю. Г. Евтушенко** (ВЦ РАН).

Тематические направления:

- Нейробиология и нейробионика
- Системная биофизика
- Нейронные сети и когнитивные науки
- Нейросетевые парадигмы и архитектуры: представление данных, обучение и оптимизация
- Нейронные сети и самоорганизация систем
- Нейросетевые системы обработки данных, распознавания образов и управления
- Приложения нейроинформатики в медицине, технике, экономике, естественных и гуманитарных науках
- Аппаратная реализация нейронных сетей
- Модели адаптивного поведения
- Модели эволюции нейронных сетей

Подробную информацию о конференции см. на сайте:
<http://neuroinfo.mephi.ru>

УДК 626.519

В. А. Иващенко, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
iptmuran@san.ru,

М. В. Колоколов, аспирант,
killgreen@rambler.ru,

Институт проблем точной механики
и управления РАН, г. Саратов,

Д. А. Васильев, канд. техн. наук, доц.,
vda230373@yandex.ru,

Саратовский государственный технический
университет имени Ю. А. Гагарина

Концепция синтеза структуры системы автоматизированного управления электропотреблением промышленных предприятий

Предложена концепция синтеза структуры системы автоматизированного управления электропотреблением промышленных предприятий. Представлен состав функциональных блоков и информационных средств, обеспечивающих ее функционирование.

Ключевые слова: потребление электроэнергии промышленными предприятиями, системы автоматизированного управления, методы и модели прогнозирования, методики нормирования и планирования электропотребления

Введение

Экономия электрической энергии на всех стадиях ее жизненного цикла — производства, передачи, преобразования, распределения и потребления — представляет важнейшую проблему энергетики России. Экономное использование электроэнергии (ЭЭ) на уровне промышленных предприятий является одной из составляющих этой проблемы, решение которой достигается путем создания АСУ энергетикой предприятий.

Несмотря на большой объем исследований, проводимых в этом направлении, отсутствует методологический подход к построению эффективных систем автоматизированного управления электропотреблением предприятий, основанный на системном анализе и прогнозе управляемых процессов, максимальном учете динамических факторов производства и внешних условий [1].

В связи с этим разработан новый подход к построению системы автоматизированного управления электропотреблением предприятий, в основу которого положена структуризация процесса управления. Выделены функциональные компоненты данного процесса, рассмотрено информационное

взаимодействие между ними, предложены модели и методы их реализации.

Подход к синтезу структуры системы автоматизированного управления процессом электропотребления промышленных предприятий

Процесс управления организационно-техническими системами представляется в виде совокупности взаимосвязанных отображений:

$$\forall a_k \exists f_k(C_k, O_k) : I_k \rightarrow I_{k+1}, \\ a_k \in A, k = 1, \dots, K;$$

$$C_k \subset C = \{c_i, i = 1, \dots, I\}; O_k \subset O = \{o_j, j = 1, \dots, J\}; \\ I_k, I_{k+1} \subset I = \{i_l, l = 1, \dots, L\},$$

где A — функциональные блоки системы управления; a_k — блок реализации k -й функции системы; f_k — функция отображения для a_k -го блока; C и C_k — условия реализации всех функций и k -й функции системы соответственно; O и O_k — организационно-технические средства реализации всех функций и k -й функции системы соответственно; I , I_k и I_{k+1} — информационные потоки системы, входные и выходные потоки a_k -го блока.

При управлении процессом электропотребления промышленных предприятий:

- $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$, где a_1 — регистрация и проверка на достоверность измерительной информации; a_2 — выбор модели и прогнозирование суточного расхода электроэнергии предприятием и производственными подразделениями; a_3 — нормирование и планирование электропотребления предприятия и производственных подразделений на основе прогнозных значений, составление электрического баланса по предприятию; a_4 — сравнение фактического и планового электропотребления предприятия и производственных подразделений за очередной месяц, принятие решений по управлению электропотреблением предприятия;
- $C_k = \{C_1, c_2, C_3, C_4\}$, где C_1 — нормативные акты по расходу потребителями ЭЭ; c_2 — договор электроснабжения; C_3 — метрологические требования; C_4 — требования к точности прогноза;
- $O_k = \{o_1, o_2, o_3, o_4, O_5\}$, где o_1 — информационно-вычислительный комплекс (ИВК) службы главного энергетика; o_2 — энергодиспетчер; o_3 — энергобюро; o_4 — главный энергетик; O_5 — датчики и измерительные устройства;
- $I_k = \{I_1, I_2, I_3, i_4, I_5, I_6, I_7, I_8, I_9\}$, где I_1 — данные по среднесуточной температуре окружающей среды; I_2 — данные по электропотреблению предприятия и производственных подразделений;

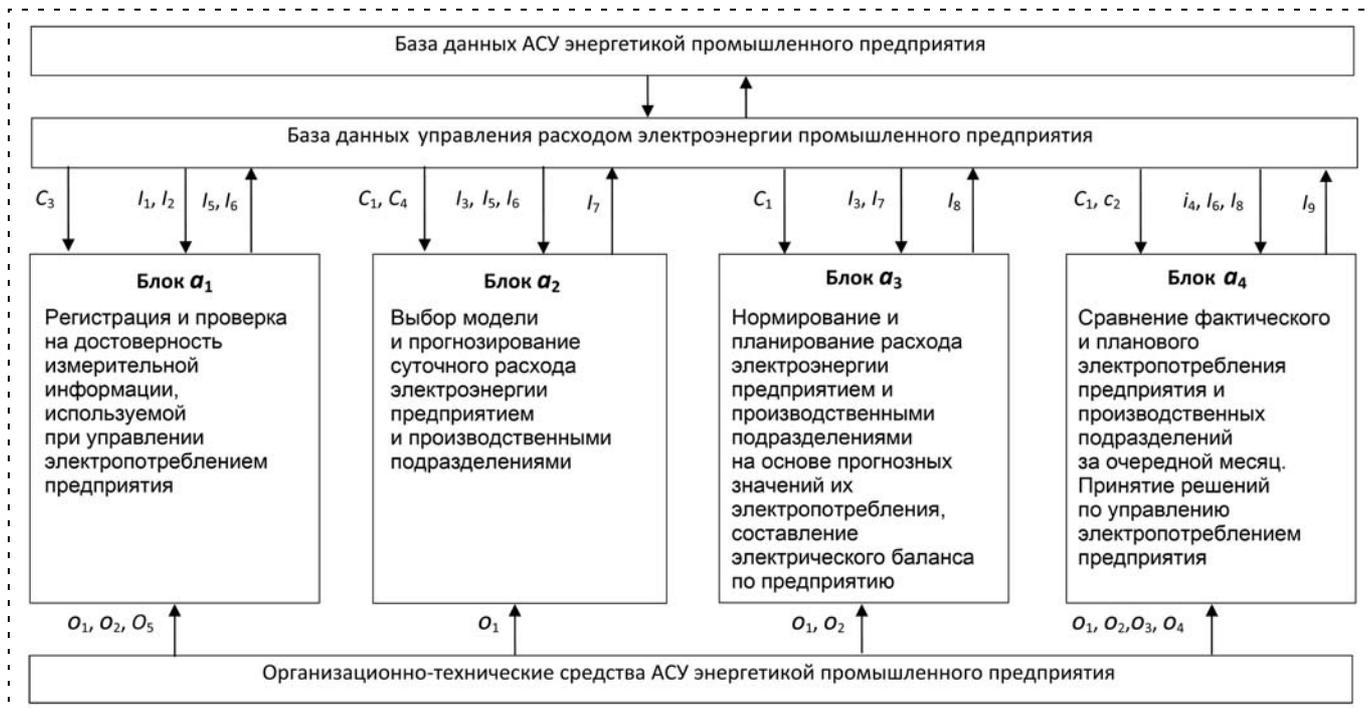


Рис. 1. Структура системы автоматизированного управления электропотреблением промышленного предприятия

I_3 — данные по объемам продукции, производимой ими; i_4 — лимит электропотребления предприятия; I_5 — достоверная информация о среднесуточной температуре окружающей среды; I_6 — достоверная информация об электропотреблении предприятия и производственных подразделений; I_7 и I_8 — прогнозные и плановые значения электропотребления по ним; I_9 — принятые решения по управлению электропотреблением предприятия.

С учетом введенных обозначений отображения для процесса управления электропотреблением предприятий примут вид:

- ♦ для функционального блока a_1
 $f_1(C_3, o_1, o_2, O_5) : (I_1, I_2) \rightarrow (I_5, I_6)$;
- ♦ для функционального блока a_2
 $f_2(C_1, C_4, o_1) : (I_3, I_5, I_6) \rightarrow I_7$;
- ♦ для функционального блока a_3
 $f_3(C_1, o_1, o_2) : (I_3, I_7) \rightarrow I_8$;
- ♦ для функционального блока a_4
 $f_4(C_1, c_2, o_1, o_2, o_3, o_4) : (i_4, I_6, I_8) \rightarrow I_9$.

Взаимодействие между функциональными блоками осуществляется через информационные потоки (рис. 1).

Особенности функциональных блоков автоматизированного управления электропотреблением промышленных предприятий

Рассмотрим особенности функциональных блоков с учетом их использования в системах автоматизированного управления электропотреблением промышленных предприятий.

Функциональный блок a_1 . Эффективность управления во многом определяется достоверностью информации, поступающей с измерительных приборов. Первичный контроль достоверности информации основан на априорных данных об отдельных параметрах электропотребления: допустимых граничных значениях, характере изменения во времени, логической непротиворечивости и др., а дополнительный — на учете зависимостей между параметрами.

Этот контроль направлен на выявление аномалий в данных в целях их дальнейшего устранения.

Функциональный блок a_2 . В качестве методов прогнозирования суточного электропотребления предприятий и производственных подразделений используются статистические модели и искусственные нейронные сети (ИНС).

Прогнозирование на основе статистического метода. Анализ статистических данных по суточному расходу ЭЭ предприятий и производственных подразделений в рабочие дни показал тенденцию линейного возрастания электропотребления по годам. Кроме того, из года в год имеет место весенний спад и осенний подъем суточного расхода ЭЭ и воздействие на него множества случайных факторов.

Модель суточного электропотребления промышленных предприятий и производственных подразделений принята в виде [2]

$$W = b_0 + b_1 l + \xi(t) + \eta(t), t \in [1, T],$$

где b_0 — среднее значение суточного электропотребления за год; $b_1 l$ — линейный годовой тренд;

$l = 1, 2, \dots, L$ — номер года, начиная с текущего; t — номер текущего дня в году; T — число дней в году; $\xi(t)$ — сезонные колебания; $\eta(t)$ — стационарный случайный остаток, характеризующий точность аппроксимации регулярной части суточного потребления ЭЭ.

В качестве аппроксимаций сезонных колебаний используется кусочно-линейная аппроксимация или полином 4-й степени.

Для ретроспективных данных, имеющих пропуски или аномальные значения, применяется процедура их замены на значения, полученные путем линейной интерполяции значений, между которыми они находятся.

Прогнозирование с помощью искусственной нейронной сети. Для прогнозирования использован трехслойный персептрон. В качестве входных данных выступают суточный расход ЭЭ и среднесуточная температура окружающей среды в рабочие дни года, а также изменение годовых объемов продукции. Данные о температуре окружающей среды поступают с сервера метеостанции.

В основу определения размерностей входного и выходного слоев персептрона положены следующие соображения:

- во входном слое число нейронов определяется суммарным объемом ретроспективных данных, необходимых для прогноза (суточное электропотребление, среднесуточная температура окружающей среды за год; коэффициент, отражающий изменение годового объема выпуска продукции);
- выходной слой содержит нейроны, определяющие прогнозные значения суточного электропотребления.

Выбор числа промежуточных (скрытых) слоев и нейронов в них выполнен исходя из минимума ошибки прогнозирования. Установлено, что достаточно одного скрытого слоя с числом нейронов, равным полусумме нейронов входного и выходного слоев.

В качестве активационной принята сигмоидальная функция, а для обучения сети применен комбинированный метод, основанный на комбинации алгоритмов обратного распространения ошибки и Коши.

Прогнозирование с помощью ИНС является более точным и менее трудоемким в вычислениях, чем прогнозирование на основе статистического метода, однако требует для реализации большего объема ретроспективных данных.

Предложенные методы прогнозирования могут быть адаптированы для широкого круга других сезонно изменяемых процессов.

Функциональный блок a_3 . Существующие методики нормирования электропотребления на промышленных предприятиях не обеспечивают получение адекватных норм расхода ЭЭ из-за недостаточного полного учета изменений электропотребления, вызванных нестабильностью производственных

условий и внешних факторов, оказывающих на него влияние [3]. Поэтому предложены новые методики нормирования, основанные на прогнозных значениях удельного электропотребления объектов (предприятия и производственных подразделений) нормирования.

Методика, основанная на статистическом методе. В соответствии с данной методикой строится зависимость

$$w_n = f_n(\Pi_n), n = \overline{1, N},$$

где w_n — прогнозное значение удельного электропотребления (количество электроэнергии, отнесенное к объему продукции, на производство которой она затрачена) n -го объекта нормирования; Π_n — объем продукции (натуральные единицы или нормо-часы), производимой n -м объектом на интервале $[\Pi'_n, \Pi''_n]$, Π'_n и Π''_n — границы интервала планирования; N — число объектов нормирования.

Значения, превышающие w_n , из рассмотрения исключаются, а по оставшимся значениям строится зависимость (нормообразующая модель)

$$w_n^H = f_n^H(\Pi_n).$$

По соотношению $W_n^{\text{план}} = w_n^H \Pi_n$ определяется плановый расход ЭЭ n -м объектом.

В качестве функций f_n и f_n^H используются полиномы 2-й степени.

Методика, основанная на использовании ИНС. Данная методика позволяет без существенного усложнения вычислений, особенно в случаях использования робастных и непараметрических методов определения параметров модели, учесть влияние на потребление ЭЭ внешних факторов, к числу которых, в первую очередь, относится температура окружающей среды. Это обусловлено тем, что существенная доля электропотребления предприятий приходится на освещение, обогрев, кондиционирование помещений и другие нужды, непосредственно не относящиеся к технологическим процессам.

Для построения нормообразующей модели используется трехслойный персептрон. В качестве входных данных выступают: планы производства по объектам нормирования, прогнозные значения удельного электропотребления по ним, среднесуточная температура окружающей среды, а в качестве выходных — удельные нормы электропотребления объектов нормирования.

Возможен учет категориальных факторов (тип дня недели, времени суток и года). Это осуществляется путем построения сети ИНС, каждая из которой обучена на определенный тип дня недели, времени суток и года.

Функциональный блок a_4 . На основе предложенных методов нормирования потребления ЭЭ пред-

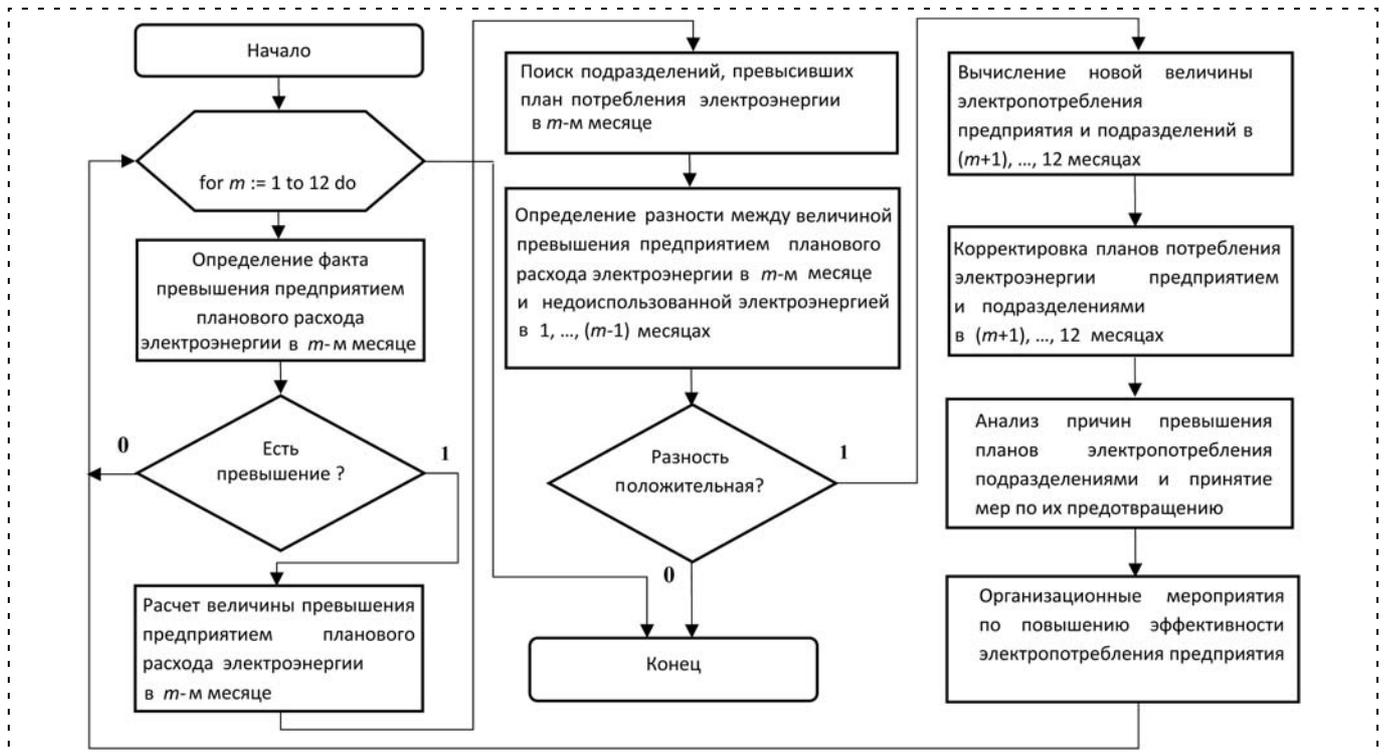


Рис. 2. Алгоритм принятия решений по управлению электропотреблением промышленных предприятий

ложен алгоритм принятия решений по управлению электропотреблением (рис. 2).

Рассмотренные методы нормирования положены в основу составления нормализованных электрических балансов, позволяющих определить резервы экономии ЭЭ на предприятии.

Для управления электропотреблением предприятий формируется и поддерживается в актуальном состоянии БД по управлению расходом ЭЭ, являющаяся составной частью БД АСУ энергетикой предприятия. Ее построение осуществляется в рамках архитектуры клиент-сервер на базе СУБД MS SQL Server.

Доступ к БД осуществляется с автоматизированных рабочих мест главного энергетика, сотрудников энергобюро и энергодиспетчера. В качестве операционных систем серверной части и автоматизированных рабочих мест используются стандартные операционные системы Windows различных версий.

Сбор данных осуществляется с помощью устройств связи с объектом, обеспечивающих необходимую точность и достоверность их преобразования и передачи в ИВК.

Заключение

Предложен новый подход к синтезу структуры системы автоматизированного управления электропотреблением промышленных предприятий, основанный на структуризации процесса управления. Данный подход позволил представить отдельные компоненты данного процесса и связи между ними

с детализацией, необходимой для его формализации и реализации с помощью существующих аппаратно- и программно-совместимых технических средств на основе современных информационных технологий IDEF, UML и др.

Разработаны модели и методы прогнозирования суточного электропотребления промышленных предприятий, обеспечивающие горизонт и точность прогноза, необходимые для построения методик эффективного нормирования и планирования электропотребления предприятий.

Предложены методики нормирования и планирования электропотребления промышленных предприятий на основе прогнозных значений суточного потребления ими электроэнергии. Расчеты показали, что реализация этих методик при тарифе 3 рубля за киловатт-час позволяет снизить затраты промышленных предприятий средней энергоемкости (с заявляемой мощностью 10...15 МВт) по электропотреблению на 1,5...2 млн рублей в год.

Список литературы

1. Резчиков А. Ф., Иващенко В. А. Управление электропотреблением промышленных предприятий. Саратов: Издательский Центр "Наука", 2008. 183 с.
2. Васильев Д. А., Колоколов М. В., Иващенко В. А. Прогнозирование электропотребления в АСУ энергетикой промышленных предприятий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 8. С. 58–60.
3. Иващенко В. А., Резчиков А. Ф. Автоматизированное управление электропотреблением промышленных предприятий: концепция и основные задачи // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 3. С. 52–56.

А. Б. Садыгов,канд. физ.-мат. наук, доц., вед. науч. сотр.,
aminaga@box.az,Институт кибернетики Национальной
академии наук Азербайджана, г. Баку

Метод оценки риска возникновения аварий на предприятиях

Разработан метод оценки риска возникновения аварий на опасных производственных объектах с помощью дерева отказов и теории надежности. Для выявления причинно-следственных связей между случайными событиями, приводящими к аварии, и оценки риска использованы вероятностные методы анализа деревьев отказов. Приведены преимущества и ограничения применения метода дерева отказов.

Ключевые слова: оценка риска аварий, метод дерева отказов, теория надежности

Введение

Все производственные процессы и технические средства потенциально опасны для человека. Риск — это вероятность реализации опасности. На практике полная безопасность недостижима, пока существует источник опасности. Поэтому проблема сокращения потерь и затрат в условиях возможных и реальных аварий состоит в обеспечении постоянного контроля за всеми источниками повышенного риска. Эта общая народнохозяйственная проблема непосредственно связана с совершенствованием управления защитой, под которой понимается организованная совокупность мероприятий, выполняемых на объектах повышенного риска для предотвращения, локализации и ликвидации последствий аварий [1]. Причиной риска возникновения аварии является возможность неконтролируемого выброса отравляющих веществ или выход из-под контроля процесса высвобождения энергии [2]. Естественно, что некоторые подсистемы предприятия с большей вероятностью могут быть причиной аварии, чем другие [3].

Существующие методы оценки риска

Опыт взаимодействия человека с техническими системами позволяет идентифицировать травмирующие и вредные факторы, а также выработать методы оценки вероятности появления опасных ситуаций. Существуют различные методы оценки риска возникновения аварий. Прежде всего, это накопление статистических данных об аварийности и травматизме, различные способы преобразования и обработки статистических данных, повышающие их информативность. Недостатком этого метода является его ограниченность, невозможность экспериментирования и неприменимость к оценке опасности новых технических средств и технологий.

Значительное развитие и практическое применение получила теория надежности. Надежность — это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, позволяющие выполнять требуемые функции. Для количественной оценки надежности применяют вероятностные величины.

Одно из основных понятий теории надежности — отказ, т. е. нарушение работоспособного состояния технического устройства из-за прекращения функционирования или из-за резкого изменения его параметров. В теории надежности оценивается вероятность отказа, т. е. вероятность того, что техническое средство откажет в течение заданного времени работы. Теория надежности позволяет оценить срок службы, по окончании которого техническое средство вырабатывает свой ресурс и должно подвергнуться капитальному ремонту, модернизации или замене. Техническим ресурсом называется продолжительность непрерывной или суммарной периодической работы от начала эксплуатации до наступления предельного состояния.

Возможности электронно-вычислительной техники позволяют развивать метод моделирования опасных ситуаций. Моделирование оперирует формализованными понятиями. Формализация — это упорядоченное и специальным образом организованное представление исследуемых объектов с помощью различных физических и геометрических знаков. Формализации подвергаются статистические данные о происшествиях, структура и закономерности функционирования технических систем. Достоинством такого моделирования опасностей являются простота, наглядность и легкость математической алгоритмизации исследуемых производственных процессов и технических систем. На практике разрабатываются и применяются различные методы моделирования опасных ситуаций.

Оценка вероятности опасных ситуаций в системе "человек — техническая система" на стадии проектирования производства, технологий и технических систем позволяет повысить их безопасность. Для этой цели разрабатываются программы исследований факторов риска, испытания технических средств на соответствие требованиям безопасности. В случае невозможности надежного теоретического анализа применяются экспертные оценки. Методы экспертного оценивания используются при исследовании достаточно сложных объектов, когда имеются трудности в создании достоверных моделей функционирования больших систем.

Применяя различные методы, можно проводить систематические исследования на стадии проектирования и в ходе эксплуатации как целого предприятия, так и отдельной технической единицы. Выявление, анализ и устранение дефектов повышает надежность технологий и технических систем.

Данная работа посвящена разработке методики применения метода дерева отказов для оценки риска возникновения аварий на предприятиях. Дерево

отказов (аварий, происшествий, последствий, нежелательных событий и пр.) лежит в основе логико-вероятностной модели причинно-следственных связей отказов системы с отказами ее элементов и другими событиями (воздействиями). При анализе возникновения отказа дерево отказов состоит из последовательностей и комбинаций нарушений и неисправностей и, таким образом, представляет собой многоуровневую графологическую структуру причинных взаимосвязей, полученных в результате прослеживания опасных ситуаций в обратном порядке, для того чтобы отыскать возможные причины их возникновения. Данный метод является частью национальных стандартов, например таких, как стандарт США "MIL-HDBK-217 Reliability prediction of electronic equipment" или "Методических указаний по проведению анализа риска опасных производственных объектов № РД 03-418-01" в России.

Анализ возникновения аварий

Заданием *первого этапа* анализа является декомпозиция предприятия в целом на подсистемы, чтобы идентифицировать подсистемы или даже отдельные компоненты, которые могут быть вероятными источниками неконтролируемого выброса ядовитых веществ или энергии. В связи с этим необходимо:

1) изучение и анализ деятельности предприятия в целом и отдельных его частей в целях выявления и формирования перечня источников риска, учитывающего влияние внешних воздействий на повышение риска, в том числе возможных комбинаций событий;

2) определение тех частей системы, которые могут вызвать аварии. К этим частям системы могут относиться химический реактор, накопительные емкости, энергостанция предприятия и т. д.;

3) определение возможных видов аварий (выброс ядовитых веществ, взрыв, пожар и т. д.);

4) анализ каждого вида риска и расчет вероятности возникновения чрезвычайной ситуации (ЧС) данного вида в рассматриваемый период времени на основе конкретных условий и исходных данных;

5) формирование локальных сценариев развития ЧС данного вида и общего сценария с учетом вторичных поражающих факторов (на основе анализа данных о реализации различных видов риска и ответных действий руководства и персонала предприятия разрабатываются локальный и общий сценарий возможных аварий на объекте);

6) оценка вероятных людских и материальных потерь и влияния на окружающую среду возможных ЧС (рассчитываются количественные характеристики людских потерь и возможный ущерб от ЧС на объекте; рассматриваются возможные причины и варианты развития ЧС).

Единственным средством к пониманию причин и условий возникновения аварий являются инже-

нерный замысел и детальный анализ условий окружающей среды, самого процесса и используемого оснащения [4]. Фундаментальными здесь являются знания по токсичности материалов, реактивности, стойкости к коррозии, взрывоопасности и воспламеняемости, а также знания нормативных и ведущих материалов по проблеме обеспечения безопасности. Основным инструментом этого этапа анализа риска является перечень веществ и процессов, которые могут стать причиной аварии, например:

- источники энергии — различные виды топлива; двигатели; запалы; заряды взрывчатки; заряженные конденсаторы; электробатареи; баллоны со сжатым газом; механизмы, которые содержат пружины в сжатом состоянии; подвесные системы (висячие мосты, краны); газогенераторы; электрогенераторы; топливные источники энергии; источники энергии радиационного типа (радиевые, батареи стронция); нагревательные устройства; насосы, вентиляторы; машины и механизмы с движущимися частями; устройства силового привода; устройства, которые используют атомную энергию и т. п.;
- процессы, которые могут быть причиной аварии: ускорение; загрязнение, радиоактивное заражение; коррозия; химическое растворение, диссоциация; электрические явления; взрыв; пожар; температурные явления; истечение; увлажнение; явления, связанные с действием давления; радиационные явления; химическое замещение; механические действия и т. п. [5].

Следующим шагом исследования риска является ограничение сферы исследований. Надо включать в проводимое исследование подробное рассмотрение влияния на уровень риска возможностей саботажа, диверсионных акций, войны, нарушение общественных коммуникаций, поражение молнией, землетрясения и т. д.

Довольно часто реализация этой фазы исследования риска весомее, чем выявление элементов системы и событий, которые могут быть причиной аварии. Если анализ и исследование риска расширить в направлении более формального (количественного) описания исследуемой системы и включить в рассмотрение последовательности событий, с помощью которых осуществляется переход аварии в катастрофу, а также мероприятия устранения причин и следствий катастрофы, как и возможные следствия катастрофы, то такое исследование можно обозначить термином "предшествующий анализ аварий".

Дальнейшим шагом анализа риска является определение того, какие мероприятия, если они вообще возможны, можно применить, чтобы предотвратить наступление аварии. Возможные решения, которые должны быть рассмотрены на этом этапе, представлены на рис. 1 в виде дерева решений. Защитные мероприятия по снижению риска можно подать как мероприятия, которые предотвращают наступление соответствующих аварий, и мероприятия, которые устраняют возможность тяжелых последствий

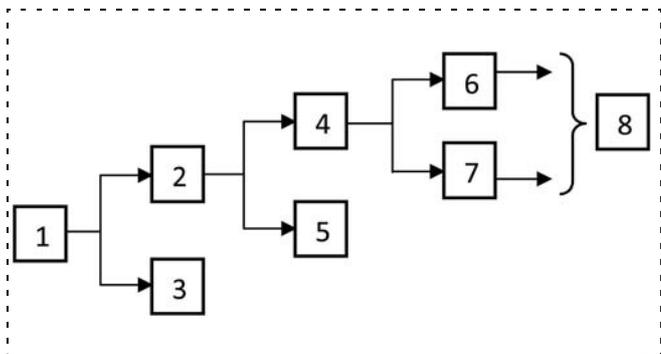


Рис. 1. Дерево решений, используемое при проведении анализа аварий:

1 — анализ возможных аварий; 2 — выявление возможности наступления аварий (аварии классифицированы); 3 — возможность аварии не выявлена; 4 — решено применить защитные мероприятия; 5 — решено, что аварии и риск приемлемы; 6 — мероприятия, направленные на устранение возможности аварий; 7 — мероприятия, направленные на устранение тяжелых последствий аварий; 8 — решено применить и те и другие мероприятия

аварий. К первым принадлежат операции по внесению изменений в оснащение, технологии, функции и цели производственной деятельности предприятия; ко вторым — операции по установлению систем защиты, аварийного оповещения, противопожарных стен и т. п. Принятие решения о том, какие мероприятия и в каком соотношении применять в каждом конкретном случае, является одной из задач исследования риска.

Таким образом, первый этап исследования риска — предшествующий анализу аварии — представляет собой первую попытку определения элементов технических средств системы и событий, которые могут привести к авариям системы, причем эта попытка выполняется тогда, когда система, которая анализируется, находится еще на стадии проектирования.

Подробный анализ событий, которые могут привести к аварии, обычно выполняется с помощью методологии, основанной на использовании деревьев ошибок, и лишь после того, как разрабатываемая система полностью определена. Подробный анализ отказов оснащения, который ведется на основе использования таких методик, как анализ видов отказов и их последствий, также выполняется на более поздних стадиях проектирования [6].

Постановка задачи

Задача оценки вероятности события в сочетании с анализом последствий, позволяющая представить количественное выражение опасности через значение риска, включает в себя:

- 1) определение частоты возникновения иницирующих и всех нежелательных событий;
- 2) оценку последствий возникновения нежелательных событий;
- 3) обобщение оценок риска.

Метод решения задачи

Для определения частоты нежелательных событий используются:

- статистические данные по аварийности и надежности технологической системы, соответствующие специфике опасного производственного объекта или виду деятельности (т. е. используются существующие сведения об авариях на заводах или отказах систем);
- анализ процесса аварии в целях определения вероятности опасных ситуаций;
- логические методы анализа "деревьев событий", "деревьев отказов", имитационные модели возникновения аварий в человеко-машинной системе;
- экспертные оценки, учитывающие мнения специалистов в данной области.

Оценка последствий включает анализ возможных воздействий на людей, имущество и (или) окружающую природную среду. Для оценки последствий необходимо систематизировать физические эффекты нежелательных событий (отказы, разрушение технических устройств, зданий, сооружений, пожары, взрывы, выбросы токсичных веществ и т. д.), уточнить объекты, которые могут быть подвергнуты опасности. При анализе последствий аварий необходимо использовать модели аварийных процессов и критерии поражения или разрушения изучаемых объектов воздействия с учетом ограничения применяемых моделей. Следует также учитывать и, по возможности, выявить связь масштабов последствий с частотой их возникновения.

Обобщенная оценка риска (или степень риска) аварий должна отражать состояние промышленной безопасности с учетом показателей риска от всех нежелательных событий, которые могут произойти на опасном производственном объекте, и основывается на результатах:

- 1) интегрирования показателей рисков всех нежелательных событий (сценариев аварий) с учетом их взаимного влияния;
- 2) анализа неопределенности и точности полученных результатов;
- 3) анализа соответствия условий эксплуатации требованиям промышленной безопасности и критериям приемлемого риска.

При обобщении оценок риска следует, по возможности, проанализировать неопределенность и точность полученных результатов. Имеется много неопределенностей, связанных с оценкой риска, и как правило, основными их источниками являются неполнота информации по надежности оборудования и человеческим ошибкам, а также принимаемые предположения и допущения используемых моделей аварийного процесса. Чтобы правильно интерпретировать результаты оценки риска, необходимо понимать характер неопределенностей и их причины. Источники неопределенности следует идентифицировать (например, "человеческий фактор"), оценить и представить в результатах.

При выборе и применении методов анализа риска рекомендуется придерживаться следующих требований:

- метод должен быть научно обоснован и должен соответствовать рассматриваемым опасностям;
- метод должен давать результаты в виде, позволяющем лучше понять формы реализации опасностей и наметить пути снижения риска;
- метод должен быть повторяемым и проверяемым.

Оценка степени риска поражения людей и нанесения ущерба при авариях связана с задачей прогнозирования показателей надежности и остаточного ресурса функционирующей системы. Наиболее важным вопросом является установление допустимых сроков дальнейшей эксплуатации индивидуального объекта при конкретном значении риска аварии.

Для количественного выражения надежности служат вероятностные характеристики работы рассматриваемых устройств. Случайные события и величины обладают статистической устойчивостью (однородностью, имеют соответствующие законы распределения), т. е. могут повторяться при одинаковых условиях многократно. Для оценки риска применяются некоторые модели теории надежности [7]. Среди них — модели высоконадежных систем, для которых аварийные ситуации представляют редкие события, а также модели стареющих систем, качество которых в процессе эксплуатации ухудшается вследствие ползучести, различных видов усталости, износа и других повреждений.

Прогнозирование аварийных ситуаций возможно на основе элементарной статистики и дискретного распределения Пуассона, часто применяемого к редким событиям и природным явлениям. Закон надежности имеет вид

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right], \quad \lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \frac{d}{dt} P(t),$$

где величина $\lambda(t)$ называется интенсивностью отказов и равна вероятности того, что после безотказной работы до момента времени t авария произойдет в последующем малом отрезке времени.

Практика показывает, что после небольшого начального периода эксплуатации функция $\lambda(t)$ длительный период достаточно стабильна, т. е. $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$. Влияние интенсивного старения за счет коррозионного износа, усталости и других факторов должно исключаться регламентированием допустимого срока службы. В период нормального (спокойного) функционирования закон надежности принимает вид экспоненциального распределения:

$$P(t) = \exp(-\lambda t).$$

Для функции надежности, записанной в таком виде, частота отказов в системе однотипных объ-

ектов (поток случайных событий) соответствует дискретному распределению Пуассона:

$$P(m, \lambda t) = \frac{(\lambda t)^m}{m!} \exp(-\lambda t), \quad m = 0, 1, 2, \dots; \lambda, t > 0.$$

Аварии на временном интервале $\tau(t, t + \tau)$ произойдут m раз с вероятностью $P(m, \lambda t)$, а отсутствие аварийных ситуаций (отсутствие отказов) имеет вероятность

$$P(0, \lambda t) = \exp(-\lambda t).$$

Вероятность возникновения хотя бы одной аварии представляет оценку риска аварии на объекте за период τ :

$$Q = 1 - P(0, \lambda t) = 1 - \exp(-\lambda t).$$

Для оценки вероятности хотя бы одной аварии среди N объектов за время τ указанное выражение примет вид

$$Q = 1 - \exp(-N\lambda t).$$

Параметр потока аварий λ иногда называют "техническим риском" или вероятностью аварии в единицу времени. Во многих случаях он служит самостоятельным оценочным показателем опасности возникновения аварии и вычисляется с помощью следующего выражения:

$$\lambda = \frac{n}{N\Delta t}.$$

Угрозу жизни человека при аварии (опасность летального исхода) оценивают "индивидуальным риском":

$$\lambda_{\text{инд}} = \frac{n}{N\Delta t} \frac{m_{\text{гиб}}}{m_{\text{раб}}},$$

где n — число объектов, на которых произошла авария за период Δt ; N — число эксплуатируемых объектов за тот же период; $m_{\text{гиб}}$ — среднее число погибших на одном объекте при аварии; $m_{\text{раб}}$ — среднее число работающих на одном объекте.

Практика показывает, что крупные аварии, как правило, характеризуются комбинацией случайных событий, возникающих с различной частотой на разных стадиях возникновения и развития аварии (отказы оборудования, ошибки человека, внешние воздействия, разрушение, выброс, пролив вещества, рассеивание веществ, воспламенение, взрыв, интоксикация и т. д.). Для выявления причинно-следственных связей между этими событиями используют логико-графические методы анализа "деревьев отказов".

Анализ и использование дерева ошибок и причинно-следственный анализ требуют для своей реализации довольно сложных логических построений, а построение дерева ошибок и причинно-следственных диаграмм и определение на их основе ко-

личественных оценок — знаний булевой алгебры, теории множеств, марковских моделей. Основное преимущество дерева ошибок в сравнении с другими методами состоит в том, что исследование ограничивается только теми элементами системы и теми событиями, которые приводят к конкретному опасному отказу или аварии.

Пример

Пример "дерева отказа", используемого для анализа причин возникновения аварийных ситуаций при автоматизированной заправке емкости, приведен на рис. 2. Дерево ошибок представляется последовательностью событий, которые приводят к отказу или аварии системы (главное событие).

Главное событие в системе связано с многочисленными базовыми событиями с указанием этих событий (все входные и выходные события, которые составляют дерево ошибок, изображаются в виде прямоугольников) и логических операторов над ними. Последовательности событий приводят к базовым событиям, частоты возникновения которых должны быть известны (данные о надежности приведены в нормативно-технических документах или определяются расчетным путем на основе статистических данных). Базовые события изображаются в виде окружностей и являются границей анализа дерева ошибок.

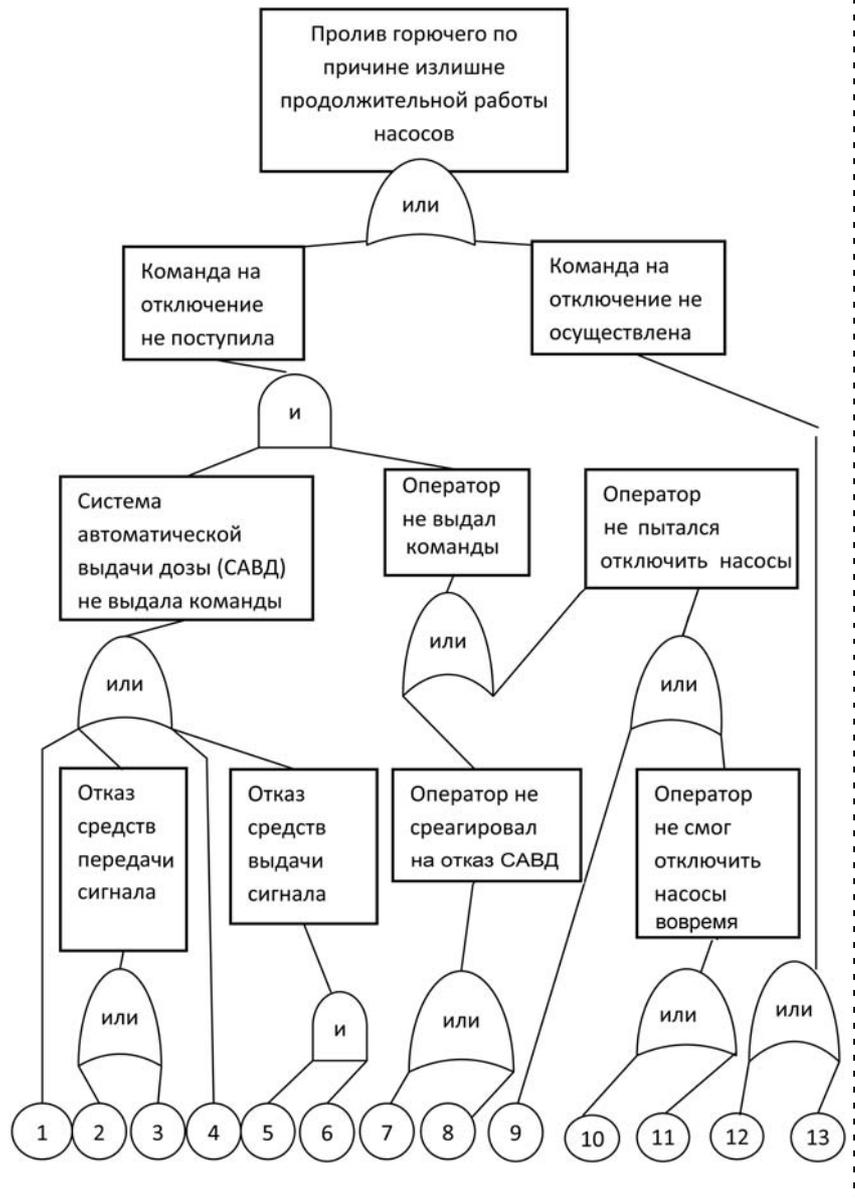


Рис. 2. "Дерево отказов" заправочной операции

Исходные события дерева отказа

Номер события i	Наименование событий или состояний модели	Вероятность события P_i
1	Система автоматической выдачи дозы (САВД) оказалась отключенной (ошибка контроля исходного положения)	0,0005
2	Обрыв цепей передачи сигнала от датчиков объема дозы	0,00001
3	Ослабление сигнала выдачи дозы помехами (нерасчетное внешнее воздействие)	0,0001
4	Отказ усилителя-преобразователя сигнала выдачи дозы	0,0002
5	Отказ расходомера	0,0003
6	Отказ датчика уровня	0,0002
7	Оператор не заметил световой индикации о неисправности САВД (ошибка оператора)	0,005
8	Оператор не услышал звуковой сигнализации об отказе САВД (ошибка оператора)	0,001
9	Оператор не знал о необходимости отключения насоса по истечении заданного времени	0,001
10	Оператор не заметил индикации хронометра об истечении установленного времени заправки	0,004
11	Отказ хронометра	0,00001
12	Отказ автоматического выключателя электропривода насоса	0,00001
13	Обрыв цепей управления приводом насоса	0,00001

Вычислим коэффициент неготовности системы. Вероятности базовых событий обозначим P_1, P_2, \dots, P_{13} (см. таблицу). Выражения для главного события в рассматриваемом дереве ошибок в булевских операторах имеют вид

$$\begin{aligned}
 &P(P_2 \cup P_3) = \\
 &= 1 - (1 - 0,00001) \cdot (1 - 0,00001) = 1,99999 \cdot 10^{-5}; \\
 &P(P_5 \cap P_6) = 0,0003 \cdot 0,0002 = 6 \cdot 10^{-8}; \\
 &P(P_1 \cup (P_2 \cup P_3) \cup P_4 \cup (P_5 \cap P_6)) = \\
 &= 1 - (1 - 0,0005) \cdot (1 - 1,99999 \cdot 10^{-5}) \times \\
 &\times (1 - 0,0002) \cdot (1 - 6 \cdot 10^{-8}) = 8,09873 \cdot 10^{-4}; \\
 &P(P_7 \cup P_8) = 1,4995 \cdot 10^{-3}; \\
 &P(P_{10} \cup P_{11}) = \\
 &= 1 - (1 - 0,004) \cdot (1 - 0,00001) = 4,00996 \cdot 10^{-3}; \\
 &P(P_9 \cup (P_{10} \cup P_{11})) = 1 - (1 - 0,001) \times \\
 &\times (1 - 4,00996 \cdot 10^{-3}) = 5,00595 \cdot 10^{-3}; \\
 &P(P_7 \cup P_8 \cup P_9 \cup (P_{10} \cup P_{11})) = \\
 &= 1 - (1 - 1,4995 \cdot 10^{-4}) \cdot (1 - 5,00595 \cdot 10^{-3}) = \\
 &= 6,49745 \cdot 10^{-3}; \\
 &S = P_1 \cup (P_2 \cup P_3) \cup P_4 \cup (P_5 \cap P_6) \cap \\
 &\cap P(P_7 \cup P_8 \cup P_9) \cup (P_{10} \cup P_{11}); \\
 &P(S) = 8,09873 \cdot 10^{-4} \cdot 6,49745 \cdot 10^{-3} = 5,26228 \cdot 10^{-6}; \\
 &P(P_{12} \cup P_{13}) = \\
 &= 1 - (1 - 0,00001) \cdot (1 - 0,00001) = 2 \cdot 10^{-5}.
 \end{aligned}$$

Тогда коэффициент неготовности системы будет равен

$$\begin{aligned}
 Q_s(t) &= P(S) \cup P(P_{12} \cup P_{13}) = \\
 &= 1 - (1 - 5,26228 \cdot 10^{-6}) \cdot (1 - 2 \cdot 10^{-5}) = \\
 &= 2,526 \cdot 10^{-5}.
 \end{aligned}$$

Если вероятность возникновения аварии является неприемлемой величиной, то выполняется анализ "дерева отказов" и отыскиваются решения для ее снижения (по уровню опасности риски можно классифицировать как неприемлемый: риск $> 10^{-6}$; приемлемый: $10^{-8} \leq \text{риск} \leq 10^{-6}$; безусловно приемлемый: риск $< 10^{-8}$).

Поскольку естественными границами риска для человека является диапазон между 10^{-2} (вероятность заболевания на душу населения) и 10^{-6} (нижний уровень риска от природной катастрофы или другой серьезной опасности), техногенный риск считается приемлемым, если он меньше 10^{-6} .

Управление безопасностью и риском имеет своей целью установление, поддержание и восстановление научно обоснованного приемлемого уровня риска при техногенных воздействиях, включая аварийные ситуации (при условии оптимального и максимально эффективного использования ресурсов общества и сохранения достигнутого уровня жизни). При этом принимается во внимание возможное ужесточение требований к анализу, оценке и приемлемым уровням техногенного риска по мере социально-экономического развития общества и увеличения объема материального производства [8].

В процессе управления безопасностью и риском в соответствии с его сущностью и функциональным смыслом могут быть выделены три стадии:

1) анализ безопасности и риска, предусматривающий идентификацию и исследование источников опасности, моделирование процессов возможного воздействия, оценку возможного ущерба и уровней риска;

2) оценка риска, состоящая в сравнении расчетных или фактических уровней риска с научно обоснованными социально-осознанными, называемыми приемлемыми уровнями риска;

3) выработка и принятие нормативно-правовых актов и управленческих решений по мерам, обеспечивающим снижение возможной опасности, установление, поддержание и восстановление приемлемого уровня безопасности и риска человека и объектов окружающей среды.

Система управления безопасностью и риском, включая региональный и местный уровни, рассматривается как сложная иерархическая структура. Управление безопасностью



Рис. 3. Схема формирования информационной технологии управления безопасностью и риском при техногенных воздействиях

и риском на региональном уровне должно быть направлено, главным образом, на решение перспективных, долгосрочных задач, формирование целевых установок и стратегий управления риском, а также необходимой законодательной и нормативно-правовой базы в интересах обеспечения высокого уровня жизни человека. Реализация стратегий управления риском должна основываться на современных информационных технологиях.

Схема формирования информационной технологии процесса управления безопасностью и риском при техногенных воздействиях приведена на рис. 3.

Преимущества и ограничения применения дерева отказов

Ценность дерева отказов заключается в следующем:

- анализ ориентируется на нахождение отказов;
- позволяет показать в явном виде ненадежные места;
- имеет графическое представление и является наглядным материалом для той части специалистов, которые принимают участие в обслуживании системы;
- дает возможность выполнять качественный или количественный анализ надежности системы;
- позволяет специалистам поочередно сосредотачиваться на отдельных конкретных отказах системы;
- обеспечивает глубокое представление о поведении системы и проникновение в процесс ее работы;
- помогает дедуктивно выявлять отказы;
- дает конструкторам, пользователям и руководителям возможность наглядного обоснования конструктивных изменений и возможность установления степени соответствия конструкции системы заданным требованиям и анализа компромиссных решений;
- облегчает анализ надежности сложных систем.

Главное преимущество дерева отказов (по сравнению с другими методами) заключается в том, что анализ ограничивается выявлением только тех элементов системы и событий, которые приводят к данному конкретному отказу системы или аварии.

Недостатки дерева отказов состоят в следующем:

- реализация метода требует значительных затрат средств и времени, так как увеличение детальности рассматриваемой инфраструктуры приводит к геометрическому увеличению числа влияющих событий;
- дерево отказов представляет собой схему булевой логики, на которой показывают только два состояния: рабочее и отказавшее;
- трудно учесть состояние частичного отказа элементов, поскольку при использовании метода, как правило, считают, что система находится либо в исправном состоянии, либо в состоянии отказа;
- трудности в общем случае аналитического решения для деревьев, содержащих резервные узлы и

восстанавливаемые узлы с приоритетами, не говоря уже о тех значительных усилиях, которые требуются для охвата всех видов множественных отказов;

- требует от специалистов по надежности глубокого понимания системы и конкретного рассмотрения каждый раз только одного определенного отказа;
- дерево отказов описывает систему в определенный момент времени (обычно в установившемся режиме), и последовательности событий могут быть показаны с большим трудом, иногда это оказывается невозможным. Это справедливо для систем, имеющих сложные контуры регулирования, в таких случаях, как правило, обращаются к методам, основанным на стохастических (случайных) процессах.

Заключение

Рассматриваемая информационная технология может быть реализована в автоматизированной информационно-управляющей системе органов по чрезвычайным ситуациям на региональном и местном иерархическом уровнях.

Система действий в ЧС должна опираться на информационную базу государственного комплексного мониторинга и контроля, организуемого на опасных техногенных объектах и призвана стать основой управления безопасностью и риском.

Разработанный метод оценки риска возникновения аварий на опасных производственных объектах с помощью дерева отказов и теории надежности может применяться для проведения анализа риска опасных производственных объектов и составления декларации безопасности.

Список литературы

1. **Садыгов А. Б.** Математические модели и методы решения задач управления по региональной защите в чрезвычайных ситуациях. Баку: "Элм", 2004 с.
2. **Дж. Хенли Э., Кумamoto Х.** Надежность технических систем и оценка риска. М.: Машиностроение, 1984.
3. **Алиев Т. А.** Теория и технология помехопрогноза аварий // Автоматика и вычислительная техника. Рига, 2003, № 3. С. 21—28.
4. **Егоров А. Ф., Савицкая Т. В., Филиппова Г. В.** Экологическая экспертиза. Итоги науки и техники. Вып. 1. М.: ВИНТИ, 2002.
5. **Садыгов А. Б., Исмаилова А. М., Гасанов Р. Э.** Методология создания системно-иерархического классификатора и решения организационно-технологических задач в чрезвычайных ситуациях. Баку: "Элм", 2006.
6. **Садыгов А. Б.** Математические методы оценки риска возникновения аварий // Материалы Междунар. конф. "Наука, техника и инновационные технологии". Ашгабад, 2011, Т. I. С. 276—278.
7. **Дранишников Л. В., Найверт А. В.** Оценка риска возникновения аварии методами теории надежности // Сб. научных трудов Приднестровской государственной академии строительства и архитектуры. Днепропетровск, 2008. Вып. 28. С. 32—42.
8. **Дранишников Л. В., Найверт А. В.** Оценка риска возникновения аварии // Материалы Междунар. конф. "Проблемы математического моделирования". Днепропетровск, 2004. С. 56—61.

ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



Управление и информатика в авиакосмических и морских системах

№ 10
октябрь
2012

Главный редактор:

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

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

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

Логоинов М. Ю., Челноков Ю. Н.

Аналитическое решение линейных дифференциальных уравнений ошибок БИНС для случая неподвижного объекта 55

Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Мурсалимов Э. Ш.

Метод идентификации параметров математической модели подводного аппарата 64

М. Ю. Логинов, мл. науч. сотр.,
Ю. Н. Челноков,

д-р физ.-мат. наук, проф., зав. лаб.,
heetseeker@mail.ru,

Институт проблем точной механики
и управления РАН, г. Саратов,
Саратовский государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского

Аналитическое решение линейных дифференциальных уравнений ошибок БИНС для случая неподвижного объекта

Получено в явном виде аналитическое решение линейных дифференциальных уравнений ошибок бесплатформенной инерциальной навигационной системы, функционирующей в нормальной географической системе координат, для случая неподвижного по отношению к Земле объекта. Решение описывает влияние неточного задания начальных условий интегрирования на точность нахождения параметров навигации и справедливо в случае отсутствия инструментальных погрешностей гироскопов и акселерометров. Полученное решение может быть использовано при анализе точности работы БИНС, установленной на неподвижном основании.

Ключевые слова: инерциальная навигация, бесплатформенная инерциальная навигационная система, уравнения ошибок, неподвижное основание, аналитическое решение

Введение

При построении алгоритмов функционирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) используются так называемые уравнения идеальной работы БИНС, т. е. дифференциальные и функциональные соотношения, связывающие проекции векторов кажущегося ускорения и абсолютной угловой скорости объекта, измеряемые чувствительными элементами БИНС (при условии их идеального функционирования), с навигационными параметрами (координатами местонахождения и проекциями скорости) и параметрами ориентации. Возможны различные варианты таких уравнений [1–4]. В данной статье используются уравнения идеального функционирования БИНС в нормальной географической системе координат (НГСК), в которых в качестве промежуточных кинематических параметров ориентации используются параметры Эйлера (Родрига-Гамильтона) [4–10]. Такие уравнения используются в настоящее время для построения высокоточных алгоритмов функционирования современных отечественных БИНС, построенных на волоконно-оптических или лазерных гироскопах и кварцевых акселерометрах.

В работе [11] для этих уравнений выведены полные и линеаризованные дифференциальные уравнения ошибок, которые позволяют изучать влияние

на работу БИНС погрешностей чувствительных элементов (акселерометров и гироскопов), ошибок начального задания параметров ориентации и навигации, а также законов движения объекта. Для аналитического исследования, как правило, используются линеаризованные дифференциальные уравнения ошибок БИНС.

В некоторых частных случаях движения объекта становится возможным найти аналитическое решение линейных дифференциальных уравнений ошибок. В работе [1] построены аналитические решения линейных дифференциальных уравнений ошибок определения декартовых координат объекта во вращающейся системе координат, имеющей начало в центре масс Земли и имеющей координатные оси, параллельные осям геоцентрического сопровождающего трехгранника, для случаев, когда объект неподвижен в инерциальной системе координат; движется с постоянной в инерциальной системе координат скоростью в неподвижной относительно инерциальной системы координат плоскости, проходящей через центр Земли; движется с постоянной скоростью вдоль земной параллели.

С помощью решения, полученного для движения вдоль параллели с постоянной скоростью, В. Д. Андреев [1] находит решение дифференциальных уравнений ошибок для случая неподвижного относительно Земли объекта. При этом для нахождения корней характеристического уравнения интегрируемых уравнений ошибок, которые входят в построенное решение, используются приближенные формулы, полученные с помощью метода Ньютона линейного уточнения корня. Этот случай, таким образом, рассмотрен в приближенной постановке, а для корней характеристического уравнения не получены точные формулы, позволяющие выразить их через коэффициенты исходной системы.

В данной статье подробно рассматривается построение точного аналитического решения линейных дифференциальных уравнений ошибок БИНС определения криволинейных координат объекта (долготы, широты, высоты) и проекций относительной скорости объекта на оси НГСК [11] для случая неподвижного по отношению к Земле объекта при отсутствии погрешностей акселерометров и гироскопов. Таким образом, полученное решение позволяет установить свойства уравнений функционирования БИНС в данном конкретном случае движения, а также аналитически оценить влияние неточного задания начальных условий интегрирования (погрешностей начальной выставки БИНС) на точность нахождения параметров навигации и, следовательно, может быть использовано при анализе точности работы БИНС, установленной на неподвижном относительно Земли основании.

Решение представлено в удобном для исследования виде, а для нахождения корней характеристического уравнения интегрируемых уравнений ошибок в явном виде получены точные формулы.

Линейные уравнения ошибок

Будем считать, что Земля является сферой. Тогда для случая неподвижного относительно Земли объекта система линейных (точнее линеаризованных) дифференциальных уравнений ошибок определения географических координат и проекций относительной скорости объекта на оси НГСК [11] запишется в матричном виде следующим образом:

$$\Delta \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{X} + \mathbf{B}; \quad (1)$$

$$\Delta \dot{\mathbf{X}} = (\Delta \dot{v}_N, \Delta \dot{v}_H, \Delta \dot{v}_E, \Delta \dot{H}, \Delta \dot{\varphi}, \Delta \dot{\lambda})^T;$$

$$\Delta \mathbf{X} = (\Delta v_N, \Delta v_H, \Delta v_E, \Delta H, \Delta \varphi, \Delta \lambda)^T;$$

$$\mathbf{B} = (O_1, O_2, O_3, 0, 0, 0)^T;$$

$$O_i = \sum_{j=1}^3 C_{\alpha eij}^* \Delta a_j + \sum_{j=1}^3 Q_{ij} a_{ij}^*; \quad \mathbf{Q} = \mathbf{C}_v^* \Delta \mathbf{C}_\lambda^T;$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -2u_H^* & 0 & -g^* & 0 \\ 0 & 0 & 2u_N^* & 2g^*/R_1^* a_{25} & 0 & 0 \\ 2u_H^* & -2u_N^* & 0 & 0 & 0 & -g^* \cos \varphi^* \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/R_1^* & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/(R_1^* \cos \varphi^*) & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$a_{25} = -2g_{eo} \tilde{a}^2 \delta \sin \varphi^* \cos \varphi^* / (R_1^*)^2,$$

$$u_N^* = u \cos \varphi^*, \quad u_H^* = u \sin \varphi^*,$$

$$R_1^* = \tilde{a} + H^*,$$

$$g^* = g_{eo} \tilde{a}^2 (1 + \delta \sin^2 \varphi^*) / (\tilde{a} + H^*)^2, \quad (2)$$

где Δv_p ($p = N, H, E$) — ошибки определения относительной скорости объекта в проекциях на оси НГСК; H^* , φ^* — точные значения высоты и широты объекта; ΔH , $\Delta \varphi$, $\Delta \lambda$ — ошибки определения высоты, широты и долготы объекта; $C_{\alpha eij}^*$ ($i, j = 1, 2, 3$) — точная (невозмущенная) ориентация объекта относительно НГСК в направляющих косинусах; a_i^* ($i = 1, 2, 3$) — точные значения проекций вектора кажущегося ускорения на объектовые оси (показания идеальных акселерометров); Δa_i ($i = 1, 2, 3$) — инструментальные погрешности реальных акселерометров; \mathbf{C}_v^* — матрица невозмущенных значений направляющих косинусов, характеризующих ориентацию НГСК относительно геоцентрической инерциальной системы координат; $\Delta \mathbf{C}_\lambda$ — матрица направляющих косинусов, описывающая ошибку определения ориентации объекта относительно геоцентрической инерциальной системы координат; $g_{eo} = 9,78049 \text{ м/с}^2$; $\tilde{a} = 6\,378\,245 \text{ м}$ — большая полуось земного эллипсоида вращения Красовского; $\delta = 5,317 \cdot 10^{-3}$; $u = 7,292115 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ — угловая скорость суточного вращения Земли.

Преобразование неоднородной части уравнений ошибок

При выводе изучаемых дифференциальных уравнений ошибок используется следующее матричное соотношение [11]:

$$\begin{pmatrix} \Delta a_N \\ \Delta a_H \\ \Delta a_E \end{pmatrix} = \Delta \varphi \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_N^* \\ a_H^* \\ a_E^* \end{pmatrix} + \Delta \lambda \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\sin \varphi^* \\ 0 & 0 & \cos \varphi^* \\ \sin \varphi^* & \cos \varphi^* & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_N^* \\ a_H^* \\ a_E^* \end{pmatrix} + \mathbf{C}_{\alpha e}^{*T} \begin{pmatrix} \Delta a_1 \\ \Delta a_2 \\ \Delta a_3 \end{pmatrix} + \mathbf{C}_v^* \Delta \mathbf{C}_\lambda^T \begin{pmatrix} a_1^* \\ a_2^* \\ a_3^* \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где a_N^* , a_H^* , a_E^* — точные проекции кажущегося ускорения объекта на оси НГСК; Δa_N , Δa_H , Δa_E — погрешности определения проекций кажущегося ускорения на оси НГСК; $\mathbf{C}_{\alpha e}^*$ — матрица направляющих косинусов, описывающая точную (невозмущенную) ориентацию объекта относительно НГСК. Эти соотношения используются при построении уравнений ошибок Δv_N , Δv_H , Δv_E определения проекций относительной скорости объекта. Матрица \mathbf{B} в уравнениях (1) появляется из третьего и четвертого слагаемых в правой части соотношения (3).

Будем считать, что инструментальные погрешности гироскопов и акселерометров отсутствуют. Тогда третье слагаемое в правой части (3) обращается в нуль. Кроме того, учтем, что

$$\Delta \mathbf{C}_\lambda^T \begin{pmatrix} a_1^* \\ a_2^* \\ a_3^* \end{pmatrix} = \Delta \mathbf{C}_\lambda^T \mathbf{C}_{\alpha e}^* \begin{pmatrix} a_N^* \\ a_H^* \\ a_E^* \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C}_{\alpha e}^* = \mathbf{C}_\lambda^* (\mathbf{C}_v^*)^T,$$

где \mathbf{C}_λ^* — матрица направляющих косинусов, описывающая точную (невозмущенную) ориентацию объекта относительно геоцентрической инерциальной системы координат. С учетом этого соотношения четвертый член в правой части соотношения (3) примет вид

$$\mathbf{C}_v^* \Delta \mathbf{C}_\lambda^T \mathbf{C}_\lambda^* (\mathbf{C}_v^*)^T \begin{pmatrix} a_N^* \\ a_H^* \\ a_E^* \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Линейные дифференциальные уравнения ошибок определения ориентации объекта в инерциальной системе координат имеют аналитическое ре-

шение, из которого при отсутствии погрешностей гироскопов следует [1, 4]

$$\Delta \mathbf{C}_\lambda(t) = \mathbf{C}_\lambda^*(t)(\mathbf{C}_\lambda^*(t_0))^T \Delta \mathbf{C}_\lambda(t_0). \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4), получим

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_v^* \Delta \mathbf{C}_\lambda^T(t_0) \mathbf{C}_\lambda^*(t_0) (\mathbf{C}_\lambda^*)^T \mathbf{C}_\lambda^* (\mathbf{C}_v^*)^T \begin{pmatrix} a_N^* \\ a_H^* \\ a_E^* \end{pmatrix} = \\ = \mathbf{C}_v^* \Delta \mathbf{C}_\lambda^*(t_0) \mathbf{C}_\lambda^*(t_0) (\mathbf{C}_v^*)^T \begin{pmatrix} a_N^* \\ a_H^* \\ a_E^* \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

Матрица направляющих косинусов \mathbf{C}_v^* , описывающая точную ориентацию НГСК относительно инерциальной геоцентрической системы координат, выглядит следующим образом [4]:

$$\mathbf{C}_v^* = \begin{pmatrix} \cos \varphi^* & -\sin \varphi^* \cos \lambda_a^* & -\sin \varphi^* \sin \lambda_a^* \\ \sin \varphi^* & \cos \varphi^* \cos \lambda_a^* & \cos \varphi^* \sin \lambda_a^* \\ 0 & -\sin \lambda_a^* & \cos \lambda_a^* \end{pmatrix}, \quad \lambda_a^* = \mu_0 + ut + \lambda^*, \quad (7)$$

где μ_0 — значение угла разворота геоцентрической системы координат, жестко связанной с Землей, относительно геоцентрической инерциальной системы координат в начальный момент времени; t — время; λ^* — точная долгота объекта.

Сформируем новый вектор-столбец:

$$\mathbf{b} = (b_1, b_2, b_3, 0, 0, 0)^T, \quad (8)$$

где b_1, b_2, b_3 определяются соотношением, вытекающим из (6) при учете условий $a_N^* = a_E^* = 0, a_H^* = g^*$, справедливых в случае неподвижного основания:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \mathbf{C}_\lambda^* \Delta \mathbf{C}_\lambda^T(t_0) \mathbf{C}_\lambda^*(t_0) (\mathbf{C}_\lambda^*)^T \begin{pmatrix} 0 \\ g^* \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Таким образом, в случае неподвижного основания при отсутствии инструментальных погрешностей гироскопов и акселерометров вместо матричного уравнения (1) получаем уравнение

$$\Delta \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{X} + \mathbf{b}, \quad (10)$$

где вектор-столбец \mathbf{b} описывается соотношениями (8)—(9) и отражает влияние неточного задания начальной ориентации объекта в инерциальной системе координат на вектор $\Delta \mathbf{X}$ ошибок определения параметров навигации.

Аналитическое решение

Линейной неоднородной системе (10) дифференциальных уравнений ошибок определения проекций относительной скорости объекта и его криволинейных координат соответствует линейная однородная система

$$\Delta \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{X}. \quad (11)$$

Рассмотрим обычную систему линейных уравнений

$$(\mathbf{A} - \beta \mathbf{E}) \mathbf{e} = 0, \quad (12)$$

где β — число (вещественное или комплексное); $\mathbf{e} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6)^T$. Из системы (12) найдем возможные значения β и соответствующие им собственные векторы \mathbf{e} . Для этого перепишем систему (12) в скалярном виде:

$$\begin{aligned} -\beta \alpha_1 - 2u_H^* \alpha_3 - g^* \alpha_5 &= 0; \\ -\beta \alpha_2 + 2u_N^* \alpha_3 + 2g^* \alpha_4 / R_1^* + a_{25} \alpha_5 &= 0; \\ 2u_H^* \alpha_1 - 2u_N^* \alpha_2 - \beta \alpha_3 - g^* \cos \varphi^* \alpha_6 &= 0; \\ \alpha_2 - \beta \alpha_4 &= 0; \\ \alpha_1 / R_1^* - \beta \alpha_5 &= 0; \\ \alpha_3 / (R_1^* \cos \varphi^*) - \beta \alpha_6 &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Из четвертого, пятого и шестого уравнений системы (13) находим

$$\alpha_2 = \beta \alpha_4, \alpha_1 = \beta R_1^* \alpha_5, \alpha_3 = \beta R_1^* \cos \varphi^* \alpha_6. \quad (14)$$

Подставляя полученные значения для $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ в первые три уравнения системы (13), получаем

$$\begin{aligned} -(\beta^2 R_1^* - g^*) \alpha_5 - 2u_H^* \beta R_1^* \cos \varphi^* \alpha_6 &= 0; \\ (2g^* / R_1^* - \beta^2) \alpha_4 + a_{25} \alpha_5 + 2u_N^* \beta R_1^* \cos \varphi^* \alpha_6 &= 0; \\ -2u_N^* \beta \alpha_4 + 2u_H^* \beta R_1^* \alpha_5 - (\beta^2 R_1^* + g^*) \cos \varphi^* \alpha_6 &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Из первого уравнения системы (15) находим

$$\alpha_5 = -(\beta^2 R_1^* + g^*) \alpha_6 / (2u_H^* \beta R_1^* \cos \varphi^*). \quad (16)$$

Отметим, что в случае движения по экватору $u_H^* = 0$, поэтому соотношение (16) вырождается. В этом случае решение дифференциальных уравнений ошибок необходимо рассматривать отдельно, что выходит за рамки данной статьи.

Подставляя полученное значение α_5 во второе и третье уравнения системы (15), находим

$$\begin{aligned} (2g^* / R_1^* - \beta^2) \alpha_4 + \\ + (a_{25} - u_N^* (\beta^2 R_1^* + g^*) / u_H^*) \alpha_5 &= 0; \\ -2u_N^* \beta \alpha_4 + (2u_H^* \beta R_1^* + \\ + (\beta^2 R_1^* + g^*)^2 / (2u_H^* \beta R_1^*)) \alpha_5 &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Из этих уравнений получаем

$$\alpha_5 = \frac{(R_1^* \beta^2 - 2g^*) u_H^*}{R_1^* (a_{25} u_H^* - u_N R_1^* \beta^2 - u_N^* g^*)} \alpha_4;$$

$$\alpha_5 = \frac{4u_N^* \beta^2 u_H^* R_1^*}{4(u_H^* R_1^* \beta)^2 + (R_1^* \beta^2 + g^*)^2} \alpha_4. \quad (18)$$

Для совместимости двух последних уравнений необходимо, чтобы

$$\frac{(R_1^* \beta^2 - 2g^*) u_H^*}{R_1^* (a_{25} u_H^* - u_N R_1^* \beta^2 - u_N^* g^*)} =$$

$$= \frac{4u_N^* \beta^2 u_H^* R_1^*}{4(u_H^* R_1^* \beta)^2 + (R_1^* \beta^2 + g^*)^2}.$$

Отсюда после несложных преобразований получаем уравнение шестой степени относительно β :

$$\beta^6 + 4u^2 \beta^4 + \frac{1}{R_1^*} \left[\left(4(u_N^*)^2 - 8(u_H^*)^2 - \frac{3g^*}{R_1^*} \right) g^* - \right.$$

$$\left. - 4u_N^* u_H^* a_{25} \right] \beta^2 - 2 \left(\frac{g^*}{R_1^*} \right)^3 = 0. \quad (19)$$

Выполнив замену $\zeta = \beta^2$, получаем кубическое относительно ζ уравнение.

Обозначим коэффициенты при β^4 , β^2 и β^0 следующим образом:

$$b = 4u^2, \quad c = \frac{1}{R_1^*} \left[\left(4(u_N^*)^2 - 8(u_H^*)^2 - \frac{3g^*}{R_1^*} \right) g^* - \right.$$

$$\left. - 4u_N^* u_H^* a_{25} \right], \quad d = -2 \left(\frac{g^*}{R_1^*} \right)^3. \quad (20)$$

В соответствии с формулой Кардано [12] решение полученного уравнения может быть записано так:

$$\zeta_1 = \tilde{u} + \tilde{v} - \frac{b}{3}; \quad \zeta_2 = -\frac{\tilde{u} + \tilde{v}}{2} + \frac{\tilde{u} - \tilde{v}}{2} i \sqrt{3} - \frac{b}{3};$$

$$\zeta_3 = -\frac{\tilde{u} + \tilde{v}}{2} - \frac{\tilde{u} - \tilde{v}}{2} i \sqrt{3} - \frac{b}{3};$$

$$\tilde{u} = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{D}}; \quad \tilde{v} = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{D}}; \quad D = \left(\frac{p}{3} \right)^3 + \left(\frac{q}{2} \right)^2;$$

$$p = \frac{3c - b^2}{3}; \quad q = \frac{2b^3}{27} - \frac{bc}{3} + d. \quad (21)$$

Будем считать, что $|\varphi^*| < \pi/2$ и $|H^*| < 100\,000$ км. При этом дискриминант D отрицателен, из чего следует, что кубическое уравнение имеет три дей-

ствительных решения ζ_j ($j = 1, 2, 3$) [12]. Если применить приведенные выше формулы, то корни будут выражаться через комплексные величины. Избежать этого можно следующим образом [12].

Положим $L = \sqrt{-p^3/27}$, $\cos \phi = -q/(2L)$. Тогда решения кубического уравнения запишутся следующим образом:

$$\zeta_1 = 2\sqrt[3]{L} \cos\left(\frac{\phi}{3} + \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{b}{3}, \quad \zeta_2 = 2\sqrt[3]{L} \cos\left(\frac{\phi}{3}\right) - \frac{b}{3};$$

$$\zeta_3 = 2\sqrt[3]{L} \cos\left(\frac{\phi}{3} + \frac{4\pi}{3}\right) - \frac{b}{3}. \quad (22)$$

Теперь найдем корни уравнения (19):

$$\beta_{1,2} = \pm \sqrt{\zeta_1}, \quad \beta_{3,4} = \pm \sqrt{\zeta_2}, \quad \beta_{5,6} = \pm \sqrt{\zeta_3}. \quad (23)$$

Можно показать, что ζ_1 и ζ_3 отрицательны, тогда как ζ_2 положительно. При этом $\beta_1, \beta_2, \beta_5$ и β_6 получаются чисто мнимыми, а β_3 и β_4 — действительными.

Найдем собственные векторы, соответствующие найденным собственным значениям β . Для этого можно положить $\alpha_4 = 1$. Тогда из первого уравнения системы (18) и соотношений (16) и (14) находим:

$$\alpha_5^{(i)} = \frac{(R_1^* \beta_i^2 - 2g^*) u_H^*}{R_1^* (a_{25} u_H^* - u_N^* R_1^* \beta_i^2 - u_N^* g^*)} =$$

$$= \frac{\sin \varphi^* (R_1^* \beta_i^2 - 2g^*)}{R_1^* [a_{25} \sin \varphi^* - \cos \varphi^* (R_1^* \beta_i^2 + g^*)]};$$

$$\alpha_6^{(i)} = \frac{-(\beta_i^2 R_1^* + g^*)}{2u_H^* \beta_i R_1^* \cos \varphi^*} \alpha_5^{(i)}, \quad \alpha_1^{(i)} = \beta_i R_1^* 5 \alpha_5^{(i)}; \quad \alpha_2^{(i)} = \beta_i,$$

$$\alpha_3^{(i)} = \beta_i R_1^* \cos \varphi^* \alpha_6^{(i)} = \frac{-(\beta_i^2 R_1^* + g^*)}{2u_H^*} \alpha_5^{(i)}.$$

При этом $\alpha_1^{(i)}$, $\alpha_2^{(i)}$ и $\alpha_6^{(i)}$ могут быть как действительными, так и комплексными (в зависимости от того, является ли действительным или комплексным соответствующее значение β_j), тогда как $\alpha_3^{(i)}$ и $\alpha_5^{(i)}$ всегда действительные.

Также отметим, что

$$\alpha_5^{(1)} = \alpha_5^{(2)}, \quad \alpha_5^{(3)} = \alpha_5^{(4)}, \quad \alpha_5^{(5)} = \alpha_5^{(6)},$$

$$\alpha_1^{(1)} = -\alpha_1^{(2)}, \quad \alpha_1^{(3)} = -\alpha_1^{(4)}, \quad \alpha_1^{(5)} = -\alpha_1^{(6)},$$

$$\alpha_2^{(1)} = -\alpha_2^{(2)}, \quad \alpha_2^{(3)} = -\alpha_2^{(4)}, \quad \alpha_2^{(5)} = -\alpha_2^{(6)},$$

$$\alpha_3^{(1)} = \alpha_3^{(2)}, \quad \alpha_3^{(3)} = \alpha_3^{(4)}, \quad \alpha_3^{(5)} = \alpha_3^{(6)},$$

$$\alpha_6^{(1)} = -\alpha_6^{(2)}, \quad \alpha_6^{(3)} = -\alpha_6^{(4)}, \quad \alpha_6^{(5)} = -\alpha_6^{(6)}.$$

Таким образом, собственные векторы системы (12) запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_1 &= (\alpha_1^{(1)}; \beta_1; \alpha_3^{(1)}; 1; \alpha_5^{(1)}; \alpha_6^{(1)}); \\ \mathbf{e}_2 &= (-\alpha_1^{(1)}; -\beta_1; \alpha_3^{(1)}; 1; \alpha_5^{(1)}; -\alpha_6^{(1)}); \\ \mathbf{e}_3 &= (\alpha_1^{(3)}; \beta_3; \alpha_3^{(3)}; 1; \alpha_5^{(3)}; \alpha_6^{(3)}); \\ \mathbf{e}_4 &= (-\alpha_1^{(3)}; -\beta_3; \alpha_3^{(3)}; 1; \alpha_5^{(3)}; -\alpha_6^{(3)}); \\ \mathbf{e}_5 &= (\alpha_1^{(5)}; \beta_5; \alpha_3^{(5)}; 1; \alpha_5^{(5)}; \alpha_6^{(5)}); \\ \mathbf{e}_6 &= (-\alpha_1^{(5)}; -\beta_5; \alpha_3^{(5)}; 1; \alpha_5^{(5)}; -\alpha_6^{(5)}). \end{aligned}$$

Фундаментальная система решений уравнения (11) имеет вид

$$\mathbf{W}(t) = (\mathbf{e}_1 \mathbf{e}^{\beta_1 t} \quad \mathbf{e}_2 \mathbf{e}^{\beta_2 t} \quad \mathbf{e}_3 \mathbf{e}^{\beta_3 t} \quad \mathbf{e}_4 \mathbf{e}^{\beta_4 t} \quad \mathbf{e}_5 \mathbf{e}^{\beta_5 t} \quad \mathbf{e}_6 \mathbf{e}^{\beta_6 t}),$$

где \mathbf{e}_i ($i = 1, \dots, 6$) — векторы-столбцы.

Обозначим $\alpha_1^{(1)} = \hat{\rho} i$, $\alpha_1^{(5)} = \hat{\sigma} i$, $\beta_1 = \hat{\omega} i$, $\beta_5 = \hat{\mu} i$, $\alpha_6^{(1)} = \hat{\xi} i$ и $\alpha_6^{(5)} = \hat{\nu} i$, где $\hat{\rho}$, $\hat{\sigma}$, $\hat{\omega}$, $\hat{\mu}$, $\hat{\xi}$ и $\hat{\nu}$ — действительные числа. Тогда, в соответствии с теорией дифференциальных уравнений, общее решение линейной однородной системы (11) запишется в виде

$$\Delta \mathbf{X}(t) = \mathbf{W}(t) \mathbf{C}', \quad \mathbf{C}' = (C'_1, C'_2, C'_3, C'_4, C'_5, C'_6)^T,$$

или, в скалярной записи, в виде

$$\begin{aligned} \Delta v_N &= \hat{\rho} [C_2 \cos(\hat{\omega} t) - C_1 \sin(\hat{\omega} t)] + \alpha_1^{(3)} [C_3 \mathbf{e}^{\beta_3 t} - \\ &\quad - C_4 \mathbf{e}^{-\beta_3 t}] + \hat{\sigma} [C_6 \cos(\hat{\mu} t) - C_5 \sin(\hat{\mu} t)]; \\ \Delta v_H &= \hat{\omega} [C_2 \cos(\hat{\omega} t) - C_1 \sin(\hat{\omega} t)] + \beta_3 [C_3 \mathbf{e}^{\beta_3 t} - \\ &\quad - C_4 \mathbf{e}^{-\beta_3 t}] + \hat{\mu} [C_6 \cos(\hat{\mu} t) - C_5 \sin(\hat{\mu} t)]; \\ \Delta v_E &= \alpha_3^{(1)} [C_1 \cos(\hat{\omega} t) + C_2 \sin(\hat{\omega} t)] + \alpha_3^{(3)} [C_3 \mathbf{e}^{\beta_3 t} + \\ &\quad + C_4 \mathbf{e}^{-\beta_3 t}] + \alpha_3^{(5)} [C_5 \cos(\hat{\mu} t) + C_6 \sin(\hat{\mu} t)]; \\ \Delta H &= C_1 \cos(\hat{\omega} t) + C_2 \sin(\hat{\omega} t) + C_3 \mathbf{e}^{\beta_3 t} + C_4 \mathbf{e}^{-\beta_3 t} + \\ &\quad + C_5 \cos(\hat{\mu} t) + C_6 \sin(\hat{\mu} t); \\ \Delta \varphi &= \alpha_5^{(1)} [C_1 \cos(\hat{\omega} t) + C_2 \sin(\hat{\omega} t)] + \alpha_5^{(3)} [C_3 \mathbf{e}^{\beta_3 t} + \\ &\quad + C_4 \mathbf{e}^{-\beta_3 t}] + \alpha_5^{(5)} [C_5 \cos(\hat{\mu} t) + C_6 \sin(\hat{\mu} t)]; \\ \Delta \lambda &= \hat{\xi} [C_2 \cos(\hat{\omega} t) - C_1 \sin(\hat{\omega} t)] + \alpha_6^{(3)} [C_3 \mathbf{e}^{\beta_3 t} - \\ &\quad - C_4 \mathbf{e}^{-\beta_3 t}] + \hat{\nu} [C_6 \cos(\hat{\mu} t) - C_5 \sin(\hat{\mu} t)], \quad (24) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \alpha_5^{(1)} &= \frac{-u_H^* (R_1^* \hat{\omega}^2 + 2g^*)}{R_1^* (a_{25} u_H^* + u_N R_1^* \hat{\omega}^2 - u_N^* g^*)} = \\ &= \frac{-\sin \varphi^* (R_1^* \hat{\omega}^2 + 2g^*)}{R_1^* [a_{25} \sin \varphi^* + \cos \varphi^* (R_1^* \hat{\omega}^2 - g^*)]}; \\ \alpha_5^{(3)} &= \frac{u_H^* (R_1^* (\beta_3)^2 - 2g^*)}{R_1^* (a_{25} u_H^* - u_N^* R_1^* (\beta_3)^2 - u_N^* g^*)} = \\ &= \frac{\sin \varphi^* (R_1^* \beta_3^2 - 2g^*)}{R_1^* [a_{25} \sin \varphi^* - \cos \varphi^* (R_1^* \beta_3^2 + g^*)]}; \\ \alpha_5^{(5)} &= \frac{-u_H^* (R_1^* \hat{\mu}^2 + 2g^*)}{R_1^* (a_{25} u_H^* + u_N R_1^* \hat{\mu}^2 - u_N^* g^*)} = \\ &= \frac{-\sin \varphi^* (R_1^* \hat{\mu}^2 + 2g^*)}{R_1^* [a_{25} \sin \varphi^* + \cos \varphi^* (R_1^* \hat{\mu}^2 - g^*)]}; \\ \alpha_1^{(3)} &= \beta_3 R_1^* \alpha_5^{(3)}; \\ \alpha_3^{(1)} &= \frac{(R_1^* \hat{\omega}^2 - g^*) \alpha_5^{(1)}}{2u_H^*}; \quad \alpha_3^{(3)} = \frac{-(R_1^* (\beta_3)^2 + g^*) \alpha_5^{(3)}}{2u_H^*}; \\ \alpha_3^{(5)} &= \frac{(R_1^* \hat{\mu}^2 - g^*) \alpha_5^{(5)}}{2u_H^*}; \quad \alpha_6^{(3)} = \frac{-(R_1^* (\beta_3)^2 + g^*) \alpha_5^{(3)}}{2u_H \beta_3 R_1^* \cos \varphi^*}; \\ \hat{\omega} &= \Im(\beta_1) = \sqrt{-\zeta_1}; \quad \hat{\mu} = \Im(\beta_5) = \sqrt{-\zeta_3}; \quad \beta_3 = \sqrt{-\zeta_2}; \\ \hat{\rho} &= \Im(\alpha_1^{(1)}) = \frac{-\hat{\omega} u_H^* (R_1^* \hat{\omega}^2 + 2g^*)}{a_{25} u_H^* + u_N^* (R_1^* \hat{\omega}^2 - g^*)} = \\ &= \frac{-\hat{\omega} \sin \varphi^* (R_1^* \hat{\omega}^2 + 2g^*)}{a_{25} \sin \varphi^* + \cos \varphi^* (R_1^* \hat{\omega}^2 - g^*)}; \\ \hat{\sigma} &= \Im(\alpha_1^{(5)}) = \frac{-\hat{\mu} u_H^* (R_1^* \hat{\mu}^2 + 2g^*)}{a_{25} u_H^* + u_N^* (R_1^* \hat{\mu}^2 - g^*)} = \\ &= \frac{-\hat{\mu} \sin \varphi^* (R_1^* \hat{\mu}^2 + 2g^*)}{a_{25} \sin \varphi^* + \cos \varphi^* (R_1^* \hat{\mu}^2 - g^*)}; \\ \hat{\xi} &= \Im(\alpha_6^{(1)}) = \frac{(R_1^* \hat{\omega}^2 - g^*) \alpha_5^{(1)}}{2u_H^* \hat{\omega} R_1^* \cos \varphi^*}; \\ \hat{\nu} &= \Im(\alpha_6^{(5)}) = \frac{(R_1^* \hat{\mu}^2 - g^*) \alpha_5^{(5)}}{2u_H^* \hat{\mu} R_1^* \cos \varphi^*}, \quad (25) \end{aligned}$$

а C_i ($i = 1, \dots, 6$) — постоянные интегрирования, связанные с константами C'_i соотношениями

$$C_1 = C'_1 + C'_2; C_2 = i(C'_1 - C'_2); C_3 = C'_3;$$

$$C_4 = C'_4; C_5 = C'_5 + C'_6; C_6 = i(C'_5 - C'_6).$$

Обозначим начальные условия интегрирования линейной однородной системы (11) $\Delta v_N^0, \Delta v_H^0, \Delta v_E^0, \Delta H^0, \Delta \varphi^0$ и $\Delta \lambda^0$. При $t = 0$ из системы (24) находим

$$\Delta v_N^0 = \hat{\rho} C_2 + \alpha_1^{(3)} (C_3 - C_4) + \hat{\sigma} C_6;$$

$$\Delta v_H^0 = \hat{\omega} C_2 + \beta_3 (C_3 - C_4) + \hat{\mu} C_6;$$

$$\Delta v_E^0 = \alpha_3^{(1)} C_1 + \alpha_3^{(3)} (C_3 + C_4) + \alpha_3^{(5)} C_5;$$

$$\Delta H^0 = C_1 + C_3 + C_4 + C_5;$$

$$\Delta \varphi^0 = \alpha_5^{(1)} C_1 + \alpha_5^{(3)} (C_3 + C_4) + \alpha_5^{(5)} C_5;$$

$$\Delta \lambda^0 = \hat{\xi} C_2 + \alpha_6^{(3)} (C_3 - C_4) + \hat{\nu} C_6.$$

Из полученной системы находим константы C_i ($i = 1, \dots, 6$):

$$\mathbf{C} = \mathbf{M} \Delta \mathbf{X}^0, \mathbf{C} = (C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6)^T;$$

$$\Delta \mathbf{X}^0 = (\Delta v_N^0, \Delta v_H^0, \Delta v_E^0, \Delta H^0, \Delta \varphi^0, \Delta \lambda^0)^T, \quad (26)$$

где квадратная матрица \mathbf{M} размерности 6×6 состоит из следующих элементов:

$$m_{11} = 0, m_{12} = 0, m_{13} = \frac{\alpha_5^{(3)} - \alpha_5^{(5)}}{z_1},$$

$$m_{14} = \frac{\alpha_5^{(3)} \alpha_5^{(5)} - \alpha_3^{(5)} \alpha_5^{(3)}}{z_1}, m_{15} = \frac{\alpha_3^{(5)} - \alpha_3^{(3)}}{z_1}, m_{16} = 0,$$

$$m_{21} = \frac{\hat{\nu} \beta_3 - \hat{\mu} \alpha_6^{(3)}}{z_2}, m_{22} = \frac{\hat{\sigma} \alpha_6^{(3)} - \hat{\nu} \alpha_1^{(3)}}{z_2}, m_{23} = 0,$$

$$m_{24} = 0, m_{25} = 0, m_{26} = \frac{\hat{\mu} \alpha_1^{(3)} - \hat{\sigma} \beta_3}{z_2},$$

$$m_{31} = \frac{\hat{\mu} \hat{\xi} - \hat{\nu} \hat{\omega}}{2z_2}, m_{32} = \frac{\hat{\nu} \hat{\rho} - \hat{\sigma} \hat{\xi}}{2z_2}, m_{33} = \frac{\alpha_5^{(5)} - \alpha_5^{(1)}}{2z_1},$$

$$m_{34} = \frac{\alpha_3^{(5)} \alpha_5^{(1)} - \alpha_3^{(1)} \alpha_5^{(5)}}{2z_1}, m_{35} = \frac{\alpha_3^{(1)} - \alpha_3^{(5)}}{2z_1},$$

$$m_{36} = \frac{\hat{\sigma} \hat{\omega} - \hat{\rho} \hat{\mu}}{2z_2}, m_{41} = -\frac{\hat{\mu} \hat{\xi} - \hat{\nu} \hat{\omega}}{2z_2}, m_{42} = -\frac{\hat{\nu} \hat{\rho} - \hat{\sigma} \hat{\xi}}{2z_2},$$

$$m_{43} = \frac{\alpha_5^{(5)} - \alpha_5^{(1)}}{2z_1}, m_{44} = \frac{\alpha_3^{(5)} \alpha_5^{(1)} - \alpha_3^{(1)} \alpha_5^{(5)}}{2z_1},$$

$$m_{45} = \frac{\alpha_3^{(1)} - \alpha_3^{(5)}}{2z_1}, m_{46} = -\frac{\hat{\sigma} \hat{\omega} - \hat{\rho} \hat{\mu}}{2z_2},$$

$$m_{51} = 0, m_{52} = 0, m_{53} = \frac{\alpha_5^{(1)} - \alpha_5^{(3)}}{z_1},$$

$$m_{54} = \frac{\alpha_3^{(1)} \alpha_5^{(3)} - \alpha_3^{(3)} \alpha_5^{(1)}}{z_1}, m_{55} = \frac{\alpha_3^{(3)} - \alpha_3^{(1)}}{z_1}, m_{56} = 0,$$

$$m_{61} = \frac{\hat{\xi} \beta_3 - \hat{\omega} \alpha_6^{(3)}}{z_2}, m_{62} = -\frac{\hat{\rho} \alpha_6^{(3)} - \hat{\xi} \alpha_1^{(3)}}{z_1}, m_{63} = 0,$$

$$m_{64} = 0, m_{65} = 0, m_{66} = -\frac{\hat{\omega} \alpha_1^{(3)} - \hat{\rho} \beta_3}{z_2},$$

$$z_1 = \alpha_3^{(1)} (\alpha_5^{(3)} - \alpha_5^{(5)}) + \alpha_3^{(3)} (\alpha_5^{(5)} - \alpha_5^{(1)}) + \alpha_3^{(5)} (\alpha_5^{(1)} - \alpha_5^{(3)}),$$

$$z_2 = \beta_3 (\hat{\nu} \hat{\rho} - \hat{\sigma} \hat{\xi}) + \alpha_1^{(3)} (\hat{\mu} \hat{\xi} - \hat{\nu} \hat{\omega}) + \alpha_6^{(3)} (\hat{\sigma} \hat{\omega} - \hat{\rho} \hat{\mu}). \quad (27)$$

Перепишем решение (24) в виде

$$\Delta v_N = a_{\Delta v_N}^{\omega} \sin(\hat{\omega} t + \varepsilon_{\Delta v_N}^{\omega}) + \alpha_1^{(3)} [C_3 e^{\beta_3 t} - C_4 e^{-\beta_3 t}] + a_{\Delta v_N}^{\mu} \sin(\hat{\mu} t + \varepsilon_{\Delta v_N}^{\mu});$$

$$\Delta v_H = a_{\Delta v_H}^{\omega} \sin(\hat{\omega} t + \varepsilon_{\Delta v_H}^{\omega}) + \beta_3 [C_3 e^{\beta_3 t} - C_4 e^{-\beta_3 t}] + a_{\Delta v_H}^{\mu} \sin(\hat{\mu} t + \varepsilon_{\Delta v_H}^{\mu});$$

$$\Delta v_E = a_{\Delta v_E}^{\omega} \sin(\hat{\omega} t + \varepsilon_{\Delta v_E}^{\omega}) + \alpha_3^{(3)} [C_3 e^{\beta_3 t} + C_4 e^{-\beta_3 t}] + a_{\Delta v_E}^{\mu} \sin(\hat{\mu} t + \varepsilon_{\Delta v_E}^{\mu});$$

$$\Delta H = a_{\Delta H}^{\omega} \sin(\hat{\omega} t + \varepsilon_{\Delta H}^{\omega}) + C_3 e^{\beta_3 t} + C_4 e^{-\beta_3 t} + a_{\Delta H}^{\mu} \sin(\hat{\mu} t + \varepsilon_{\Delta H}^{\mu});$$

$$\Delta \varphi = a_{\Delta \varphi}^{\omega} \sin(\hat{\omega} t + \varepsilon_{\Delta \varphi}^{\omega}) + \alpha_5^{(3)} [C_3 e^{\beta_3 t} + C_4 e^{-\beta_3 t}] + a_{\Delta \varphi}^{\mu} \sin(\hat{\mu} t + \varepsilon_{\Delta \varphi}^{\mu});$$

$$\Delta \lambda = a_{\Delta \lambda}^{\omega} \sin(\hat{\omega} t + \varepsilon_{\Delta \lambda}^{\omega}) + \alpha_6^{(3)} [C_3 e^{\beta_3 t} - C_4 e^{-\beta_3 t}] + a_{\Delta \lambda}^{\mu} \sin(\hat{\mu} t + \varepsilon_{\Delta \lambda}^{\mu}), \quad (28)$$

где $a_{\Delta v_N}^{\omega}, a_{\Delta v_N}^{\mu}, a_{\Delta v_H}^{\omega}, a_{\Delta v_H}^{\mu}, a_{\Delta v_E}^{\omega}, a_{\Delta v_E}^{\mu}, a_{\Delta H}^{\omega}, a_{\Delta H}^{\mu}, a_{\Delta \varphi}^{\omega}, a_{\Delta \varphi}^{\mu}, a_{\Delta \lambda}^{\omega}, a_{\Delta \lambda}^{\mu}$ — амплитуды гармонических

колебаний; $\varepsilon_{\Delta v_N}^\omega, \varepsilon_{\Delta v_N}^\mu, \varepsilon_{\Delta v_H}^\omega, \varepsilon_{\Delta v_H}^\mu, \varepsilon_{\Delta v_E}^\omega, \varepsilon_{\Delta v_E}^\mu, \varepsilon_{\Delta H}^\omega, \varepsilon_{\Delta H}^\mu, \varepsilon_{\Delta \varphi}^\omega, \varepsilon_{\Delta \varphi}^\mu, \varepsilon_{\Delta \lambda}^\omega, \varepsilon_{\Delta \lambda}^\mu$ — начальные фазы этих колебаний; $\hat{\omega}, \hat{\mu}$ — собственные (круговые) частоты колебаний. При этом $\hat{\omega} = \sqrt{-\zeta_1}, \hat{\mu} = \sqrt{-\zeta_3}, \beta_3 = \sqrt{-\zeta_2}$, где величины ζ_1, ζ_2 и ζ_3 задаются выражениями (20)—(22). Соотношения (28), в отличие от (24), удобны для оценки гармонических составляющих, входящих в состав решения.

Амплитуды и начальные фазы колебаний определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} a_{\Delta v_N}^\omega &= \hat{\rho} [C_1^2 + C_2^2]^{1/2}, \operatorname{tg} \varepsilon_{\Delta v_N}^\omega = -\frac{C_2}{C_1}; \\ a_{\Delta v_N}^\mu &= \hat{\sigma} [C_5^2 + C_6^2]^{1/2}, \operatorname{tg} \varepsilon_{\Delta v_N}^\mu = -\frac{C_6}{C_5}; \\ a_{\Delta v_H}^\omega &= \hat{\omega} [C_1^2 + C_2^2]^{1/2}, \operatorname{tg} \varepsilon_{\Delta v_H}^\omega = -\frac{C_2}{C_1}; \\ a_{\Delta v_H}^\mu &= \hat{\mu} [C_5^2 + C_6^2]^{1/2}, \operatorname{tg} \varepsilon_{\Delta v_H}^\mu = -\frac{C_6}{C_5}; \\ a_{\Delta v_E}^\omega &= \alpha_3^{(1)} [C_1^2 + C_2^2]^{1/2}, \operatorname{tg} \varepsilon_{\Delta v_E}^\omega = \frac{C_1}{C_2}; \\ a_{\Delta v_E}^\mu &= \alpha_3^{(5)} [C_5^2 + C_6^2]^{1/2}, \operatorname{tg} \varepsilon_{\Delta v_E}^\mu = \frac{C_5}{C_6}; \\ a_{\Delta H}^\omega &= [C_1^2 + C_2^2]^{1/2}, \operatorname{tg} \varepsilon_{\Delta H}^\omega = \frac{C_1}{C_2}; \\ a_{\Delta H}^\mu &= [C_5^2 + C_6^2]^{1/2}, \operatorname{tg} \varepsilon_{\Delta H}^\mu = \frac{C_5}{C_6}; \\ a_{\Delta \varphi}^\omega &= \alpha_5^{(1)} [C_1^2 + C_2^2]^{1/2}, \operatorname{tg} \varepsilon_{\Delta \varphi}^\omega = \frac{C_1}{C_2}; \\ a_{\Delta \varphi}^\mu &= \alpha_5^{(5)} [C_5^2 + C_6^2]^{1/2}, \operatorname{tg} \varepsilon_{\Delta \varphi}^\mu = \frac{C_5}{C_6}; \\ a_{\Delta \lambda}^\omega &= \hat{\xi} [C_1^2 + C_2^2]^{1/2}, \operatorname{tg} \varepsilon_{\Delta \lambda}^\omega = -\frac{C_2}{C_1}; \\ a_{\Delta \lambda}^\mu &= \hat{\nu} [C_5^2 + C_6^2]^{1/2}, \operatorname{tg} \varepsilon_{\Delta \lambda}^\mu = -\frac{C_6}{C_5}. \end{aligned} \quad (29)$$

Подставим найденные значения констант C_i ($i = 1, \dots, 6$), описанные выражениями (26), в соотношения (24) и запишем полученное решение

дифференциальных уравнений ошибок в матричном виде:

$$\Delta \mathbf{X}(t) = \mathbf{S}(t) \mathbf{M} \Delta \mathbf{X}^0, \quad (30)$$

где

$$\Delta \mathbf{X}(t) = (\Delta v_N, \Delta v_H, \Delta v_E, \Delta H, \Delta \varphi, \Delta \lambda)^T;$$

$$\Delta \mathbf{X}^0 = (\Delta v_N^0, \Delta v_H^0, \Delta v_E^0, \Delta H^0, \Delta \varphi^0, \Delta \lambda^0)^T, \quad (31)$$

а $\mathbf{S}(t)$ и \mathbf{M} — квадратные матрицы размерности 6×6 , причем элементы m_{ij} ($i, j = 1, \dots, 6$) матрицы \mathbf{M} определены соотношениями (27), а элементы матрицы $\mathbf{S}(t)$ выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} s_{11} &= -\hat{\rho} \sin(\hat{\omega} t), s_{12} = \hat{\rho} \cos(\hat{\omega} t), \\ s_{13} &= \alpha_1^{(3)} \mathbf{e}^{\beta_3 t}, s_{14} = -\alpha_1^{(3)} \mathbf{e}^{-\beta_3 t}, s_{15} = -\hat{\sigma} \sin(\hat{\mu} t), \\ s_{16} &= \hat{\sigma} \cos(\hat{\mu} t), s_{21} = -\hat{\omega} \sin(\hat{\omega} t), s_{22} = \hat{\omega} \cos(\hat{\omega} t), \\ s_{23} &= \beta_3 \mathbf{e}^{\beta_3 t}, s_{24} = -\beta_3 \mathbf{e}^{-\beta_3 t}, s_{25} = -\hat{\mu} \sin(\hat{\mu} t), \\ s_{26} &= \hat{\mu} \cos(\hat{\mu} t), s_{31} = \alpha_3^{(1)} \cos(\hat{\omega} t), s_{32} = \alpha_3^{(1)} \sin(\hat{\omega} t), \\ s_{33} &= \alpha_3^{(3)} \mathbf{e}^{\beta_3 t}, s_{34} = \alpha_3^{(3)} \mathbf{e}^{-\beta_3 t}, s_{35} = \alpha_3^{(5)} \cos(\hat{\mu} t), \\ s_{36} &= \alpha_3^{(5)} \sin(\hat{\mu} t), s_{41} = \cos(\hat{\omega} t), s_{42} = \sin(\hat{\omega} t), \\ s_{43} &= \mathbf{e}^{\beta_3 t}, s_{44} = \mathbf{e}^{-\beta_3 t}, s_{45} = \cos(\hat{\mu} t), s_{46} = \sin(\hat{\mu} t), \\ s_{51} &= \alpha_5^{(1)} \cos(\hat{\omega} t), s_{52} = \alpha_5^{(1)} \sin(\hat{\omega} t), s_{53} = \alpha_5^{(3)} \mathbf{e}^{\beta_3 t}, \\ s_{54} &= \alpha_5^{(3)} \mathbf{e}^{-\beta_3 t}, s_{55} = \alpha_5^{(5)} \cos(\hat{\mu} t), s_{56} = \alpha_5^{(5)} \sin(\hat{\mu} t), \\ s_{61} &= -\hat{\xi} \sin(\hat{\omega} t), s_{62} = \hat{\xi} \cos(\hat{\omega} t), s_{63} = \alpha_6^{(3)} \mathbf{e}^{\beta_3 t}, \\ s_{64} &= -\alpha_6^{(3)} \mathbf{e}^{-\beta_3 t}, s_{65} = -\hat{\nu} \sin(\hat{\mu} t), \\ s_{66} &= \hat{\nu} \cos(\hat{\mu} t). \end{aligned} \quad (32)$$

Таким образом, соотношения (20)—(23), (25)—(27), (30)—(32) описывают общее решение однородного линейного матричного дифференциального уравнения ошибок (11) для случая неподвижного относительно Земли объекта.

Анализ построенного решения показывает, что все ошибки, обусловленные неточным заданием начальных условий интегрирования дифференциальных уравнений функционирования БИНС, представляют собой композиции гармонических колебаний с частотами $\hat{\omega}$ и $\hat{\mu}$ и экспоненциальных составляющих. Последние состоят из нарастающих с течением времени (так как $\beta_3 > 0$) компонент $C_3 \mathbf{e}^{\beta_3 t}$ и затухающих компонент $C_4 \mathbf{e}^{-\beta_3 t}$. Таким

образом, из (24) видно, что собственное движение неустойчиво по всем переменным, а именно Δv_N , Δv_H , Δv_E , ΔH , $\Delta \varphi$ и $\Delta \lambda$.

Получим решение неоднородного дифференциального матричного уравнения (10), которое состоит из общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного уравнения. Это решение записывается следующим образом:

$$\Delta \mathbf{X}(t) = \mathbf{S}(t) \mathbf{M} \Delta \mathbf{X}^0 + \int_0^t \mathbf{S}(t - \tau) \mathbf{M} \mathbf{b}(\tau) d\tau. \quad (33)$$

Здесь векторы-столбцы $\Delta \mathbf{X}(t)$ и $\Delta \mathbf{X}^0$ определены согласно соотношениям (31), элементы матриц $\mathbf{S}(t)$

и \mathbf{M} задаются соотношениями (32) и (27) соответственно, а вектор-столбец \mathbf{b} описывается соотношением (8).

Первое слагаемое в правой части (33) описывает ошибки определения проекций относительной скорости и криволинейных координат местоположения объекта, обусловленные неточным заданием их начальных значений, а второе слагаемое — ошибки определения этих величин, обусловленные неточным заданием начальной ориентации объекта в инерциальной системе координат.

Числовые примеры

Рассмотрим неподвижный относительно Земли объект, находящийся в точке с широтой $\varphi^* = 0,001$ рад и долготой $\lambda^* = \pi/4$ рад на высоте $H^* = 0$. Для этого объекта с помощью соотношений (25) найдем величины β_3 , $\tilde{\omega}$ и $\tilde{\mu}$, а также определим периоды T_ω и T_μ :

$$\beta_3 = 0,0017468 \text{ с}^{-1},$$

$$\tilde{\omega} = 0,0012409 \text{ с}^{-1},$$

$$\tilde{\mu} = 0,0012380 \text{ с}^{-1},$$

$$T_\omega = 2\pi/\tilde{\omega} \approx 84,39 \text{ мин},$$

$$T_\mu = 2\pi/\tilde{\mu} \approx 84,59 \text{ мин}.$$

Видно, что оба периода близки к периоду Шулера, равному 84,4 мин. Отметим, что эти периоды изменяются в зависимости от невозмущенной широты φ^* объекта. К примеру, при $\varphi^* = 0,1$ рад $T_\omega \approx 83,98$ мин, $T_\mu \approx 84,99$ мин; при $\varphi^* = 1$ рад $T_\omega \approx 80,33$ мин, $T_\mu \approx 88,67$ мин; при $\varphi^* = \pi/2$ рад $T_\omega \approx 79,55$ мин, $T_\mu \approx 89,46$ мин.

Будем считать, что погрешности чувствительных элементов БИНС отсутствуют, а ориентация определяется идеально (т. е. отсутствуют погрешности гироскопов и погрешности начального задания ориентации). Тогда интеграл в правой части (33) обращается в нуль.

Рассмотрим несколько комбинаций начальных условий интегрирования системы (11). Для начала положим

$$\Delta H^0 = 1 \text{ м},$$

$$\Delta \varphi^0 = \Delta \lambda^0 = \Delta v_N^0 = \Delta v_H^0 = \Delta v_E^0 = 0.$$

Используя полученные выше соотношения, найдем погрешности определения относительной скорости и координат объекта через 30 мин работы, а также амплитуды и начальные фазы гармонических колебаний (см. (28)). Полученные данные представлены в табл. 1. В этой и

Таблица 1

Y	$\Delta Y(1800)$	a_Y^ω	a_Y^μ	ε_Y^ω	ε_Y^μ
Δv_N	$6,90 \cdot 10^{-8}$ м/с	$-2,48 \cdot 10^{-6}$ м/с	$2,47 \cdot 10^{-6}$ м/с	0	0
Δv_H	$2,03 \cdot 10^{-2}$ м/с	$3,82 \cdot 10^{-6}$ м/с	$2,47 \cdot 10^{-9}$ м/с	0	0
Δv_E	$-1,2 \cdot 10^{-3}$ м/с	$-9,73 \cdot 10^{-5}$ м/с	$-6,28 \cdot 10^{-8}$ м/с	$-\pi/2$	$-\pi/2$
ΔH	11,67 м	$3,10 \cdot 10^{-3}$ м	$-2,00 \cdot 10^{-6}$ м	$-\pi/2$	$-\pi/2$
$\Delta \varphi$	$4,66 \cdot 10^{-12}$ рад $\approx 2,67 \cdot 10^{-10}^\circ$ ($2,98 \cdot 10^{-5}$ м)	$-3,13 \cdot 10^{-10}$ рад $\approx -1,79 \cdot 10^{-8}^\circ$ ($-2,00 \cdot 10^{-3}$ м)	$3,13 \cdot 10^{-10}$ рад $\approx 1,79 \cdot 10^{-8}^\circ$ ($-2,00 \cdot 10^{-3}$ м)	$-\pi/2$	$-\pi/2$
$\Delta \lambda$	$-1,11 \cdot 10^{-7}$ рад $\approx -6,35 \cdot 10^{-6}^\circ$ ($-0,71$ м)	$-1,23 \cdot 10^{-8}$ рад $\approx -7,04 \cdot 10^{-7}^\circ$ ($-7,84 \cdot 10^{-2}$ м)	$-7,95 \cdot 10^{-12}$ рад $\approx -4,55 \cdot 10^{-10}^\circ$ ($-5,07 \cdot 10^{-5}$ м)	0	0

Таблица 2

Y	$\Delta Y(1800)$	a_Y^ω	a_Y^μ	ε_Y^ω	ε_Y^μ
Δv_N	$-9,81 \cdot 10^{-4}$ м/с	$-8,00 \cdot 10^{-7}$ м/с	$1,20 \cdot 10^{-3}$ м/с	0	0
Δv_H	$-1,10 \cdot 10^{-7}$ м/с	$1,24 \cdot 10^{-6}$ м/с	$1,24 \cdot 10^{-6}$ м/с	0	0
Δv_E	$-1,22 \cdot 10^{-7}$ м/с	$-3,14 \cdot 10^{-5}$ м/с	$-3,14 \cdot 10^{-5}$ м/с	$-\pi/2$	$-\pi/2$
ΔH	$-5,84 \cdot 10^{-5}$ м	$9,95 \cdot 10^{-4}$ м	$1,00 \cdot 10^{-3}$ м	$-\pi/2$	$-\pi/2$
$\Delta \varphi$	$-9,60 \cdot 10^{-8}$ рад $\approx -5,50 \cdot 10^{-6}^\circ$ ($-0,61$ м)	$-1,01 \cdot 10^{-10}$ рад $\approx -5,79 \cdot 10^{-9}^\circ$ ($-6,45 \cdot 10^{-4}$ м)	$1,57 \cdot 10^{-7}$ рад $\approx 8,99 \cdot 10^{-6}^\circ$ (1,00 м)	$-\pi/2$	$-\pi/2$
$\Delta \lambda$	$2,04 \cdot 10^{-11}$ рад $\approx 1,17 \cdot 10^{-9}^\circ$ ($1,30 \cdot 10^{-4}$ м)	$-3,97 \cdot 10^{-9}$ рад $\approx -2,28 \cdot 10^{-7}^\circ$ ($-2,53 \cdot 10^{-2}$ м)	$-3,97 \cdot 10^{-9}$ рад $\approx -2,28 \cdot 10^{-7}^\circ$ ($-2,53 \cdot 10^{-2}$ м)	0	0

Таблица 3

Y	$\Delta Y(1800)$	a_Y^ω	a_Y^μ	ε_Y^ω	ε_Y^μ
Δv_N	$-1,27 \cdot 10^{-7}$ м/с	$-3,17 \cdot 10^{-5}$ м/с	$3,17 \cdot 10^{-5}$ м/с	$\pi/2$	$\pi/2$
Δv_H	$5,99 \cdot 10^{-4}$ м/с	$4,89 \cdot 10^{-5}$ м/с	$3,16 \cdot 10^{-8}$ м/с	$\pi/2$	$\pi/2$
Δv_E	$9,49 \cdot 10^{-4}$ м/с	$-1,20 \cdot 10^{-3}$ м/с	$-8,03 \cdot 10^{-7}$ м/с	0	0
ΔH	0,29 м	$3,94 \cdot 10^{-2}$ м	$2,55 \cdot 10^{-5}$ м	0	0
$\Delta \varphi$	$-1,97 \cdot 10^{-11}$ рад $\approx -1,14 \cdot 10^{-9}^\circ$ ($-1,27 \cdot 10^{-4}$ м)	$-4,00 \cdot 10^{-9}$ рад $\approx -2,29 \cdot 10^{-7}^\circ$ ($-2,55 \cdot 10^{-2}$ м)	$4,01 \cdot 10^{-9}$ рад $\approx 2,30 \cdot 10^{-7}^\circ$ ($2,56 \cdot 10^{-2}$ м)	0	0
$\Delta \lambda$	$-9,97 \cdot 10^{-8}$ рад $\approx -5,71 \cdot 10^{-6}^\circ$ ($-0,64$ м)	$-1,57 \cdot 10^{-7}$ рад $\approx -9,00 \cdot 10^{-6}^\circ$ ($-1,00$ м)	$-1,02 \cdot 10^{-10}$ рад $\approx -5,83 \cdot 10^{-9}^\circ$ ($-6,49 \cdot 10^{-4}$ м)	$\pi/2$	$\pi/2$

последующих таблицах символ "Y" служит для обозначения одной из интересующих нас ошибок. Например, на пересечении столбца a_Y^0 и строки Δv_H приведено значение параметра $a_{\Delta v_H}^0$. При этом для ошибок определения широты и долготы, а также соответствующих амплитуд гармонических колебаний в скобках указаны соответствующие отклонения в линейной мере по поверхности Земли, принимаемой за сферу.

Видно, что ошибка по высоте в начальный момент времени в 1 м дает погрешность ее определения через полчаса работы, равную 11,7 м. Видно также, что в этом случае ошибка по долготе на несколько порядков больше ошибки по широте.

Если положить $\Delta\varphi^0 = 1,57 \cdot 10^{-7}$ рад $\approx 8,98 \cdot 10^{-6}^\circ$ (приблизительно 1 м в линейной мере) и $\Delta H^0 = \Delta\lambda^0 = \Delta v_N^0 = \Delta v_H^0 = \Delta v_E^0 = 0$, то получим погрешности, представленные в табл. 2.

Положим $\Delta\lambda^0 = 1,57 \cdot 10^{-7}$ рад $\approx 8,98 \cdot 10^{-6}^\circ$ (отклонение в линейной мере приблизительно 1 м при $\varphi^* = 0,001$ рад) и $\Delta H^0 = \Delta\varphi^0 = \Delta v_N^0 = \Delta v_H^0 = \Delta v_E^0 = 0$. Получим погрешности, представленные в табл. 3.

Из трех рассмотренных выше случаев ошибка по высоте минимальна во втором и составляет $-5,84 \cdot 10^{-5}$ м. Из аналитического решения видно, что ошибка по высоте растет гораздо быстрее (в $1/\alpha_5^{(3)}$ и в $1/\alpha_6^{(3)}$ раз) ошибки по широте и долготы, так как $\alpha_5^{(3)} < 1$ и $\alpha_6^{(3)} < 1$.

Заключение

Получено аналитическое решение линеаризованных дифференциальных уравнений ошибок БИНС, функционирующей в нормальной географической системе координат, описывающее влияние неточного задания начальных условий интегрирования дифференциальных уравнений БИНС (погрешностей начальной выставки БИНС) на точность определения навигационных параметров для случая установки БИНС на неподвижном основании. При этом найдены точные явные выражения для корней характеристического уравнения.

Полученное решение оказывается более сложным, чем решение для случая движения вдоль эква-

тора с постоянной скоростью на постоянной высоте, так как для последнего широта всегда равна нулю.

Анализ построенного решения показывает, что все ошибки, обусловленные неточным заданием начальных условий интегрирования дифференциальных уравнений функционирования БИНС, представляют собой композиции гармонических колебаний с частотами $\hat{\omega}$ и $\hat{\mu}$ и экспоненциальных составляющих. Последние состоят из нарастающих с течением времени (так как $\beta_3 > 0$) компонент $C_3 e^{\beta_3 t}$ и затухающих компонент $C_4 e^{-\beta_3 t}$. Таким образом, из (24) видно, что собственное движение неустойчиво по всем переменным, а именно Δv_N , Δv_H , Δv_E , ΔH , $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$. Ошибка по высоте растет существенно быстрее (в $1/\alpha_5^{(3)}$ и в $1/\alpha_6^{(3)}$ раз, $\alpha_5^{(3)} < 1$, $\alpha_6^{(3)} < 1$) ошибки по широте и долготы.

Список литературы

1. Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации. Автономные системы. М.: Физматгиз, 1966.
2. Бромберг П. В. Теория инерциальных систем навигации. М.: Наука, 1979.
3. Захарин М. И. Кинематика инерциальных систем навигации. М.: Машиностроение, 1968.
4. Челноков Ю. Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. М.: Физматлит, 2006.
5. Челнокова Л. А., Челноков Ю. Н. Моделирование работы бесплатформенной инерциальной навигационной системы, определяющей ориентацию объекта в ортодромической и географической системах координат, на универсальных ЭВМ. Саратов: Саратов. политехн. ин-т, 1988. 21 с. Деп. в ВИНТИ 11.05.88, № 3763-B88.
6. Челнокова Л. А., Челноков Ю. Н. Моделирование работы БИНС на универсальных ЭВМ. Саратов: Саратов. политехн. ин-т, 1989. 15 с. Деп. в ВИНТИ 13.06.89, № 3909-B89.
7. Челноков Ю. Н. Кватернионные и бикватернионные методы в задачах механики твердого тела и материальных систем: Автореф. дис. ... доктора физико-математических наук. М., 1987.
8. Челноков Ю. Н., Петров С. В. О задачах ориентации и навигации объекта в географической и ортодромической системах координат. Деп. в ВИМИ 27.05.88, Д07701. 21 с.
9. Челноков Ю. Н., Челнокова Л. А., Ланденко И. В. Алгоритм идеальной работы системы ориентации для подвижного объекта // Вопросы авиационной науки и техники: Сб. тр. М., 1988. Вып. 10.
10. Челноков Ю. Н. Инерциальная ориентация и навигация движущихся объектов: уч. пособие. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2002.
11. Челноков Ю. Н., Логинов М. Ю. Дифференциальные уравнения ошибок корректируемой БИНС, функционирующей в нормальной географической системе координат // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 10. С. 64–72.
12. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. М.: Наука, 1986.

В. Ф. Филаретов, д-р техн. наук, проф., зав. лаб.,
filaret@pma.ru,

Д. А. Юхимец, канд. техн. наук, доц.,
undim@iacp.dvo.ru,

Э. Ш. Мурсалимов, аспирант,
murs@iacp.dvo.ru,

Институт автоматизации и процессов управления
ДВО РАН, Дальневосточный
федеральный университет, г. Владивосток

Метод идентификации параметров математической модели подводного аппарата¹

Предлагается метод идентификации параметров математической модели подводного аппарата (ПА), который позволяет учитывать ограниченный набор имеющихся навигационно-пилотажных датчиков и обладает приемлемой вычислительной сложностью для его использования на типовой бортовой ЭВМ. Идентифицируемыми параметрами являются присоединенные массы и моменты инерции по всем степеням свободы, а также гидродинамические силы и моменты. Результаты математического моделирования полностью подтвердили работоспособность и высокую эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: подводный аппарат, математическая модель, идентификация параметров, фильтр Калмана

Введение

Расширение области применения подводной робототехники приводит к необходимости создания высокоточных систем управления (СУ) движением подводных аппаратов (ПА). Очевидно, что чем точнее известны текущие значения параметров математических моделей (ММ) ПА, описываемых сложными нелинейными дифференциальными уравнениями, тем точнее могут работать их СУ. Информация об этих параметрах необходима также и для проведения математического моделирования работы ПА на этапе предварительного исследования его СУ. Однако идентификация параметров ММ ПА является сложной задачей, так как большинство этих параметров невозможно вычислить аналитически, а можно определить только в процессе проведения сложных и дорогостоящих экспериментов.

Среди подходов, применяющихся для решения указанной задачи идентификации, можно выделить три большие группы. Первая основана на проведении натурных экспериментов с реальными образцами или макетами ПА, включая их обдувку в аэродинамических трубах. Вторая группа использует сложные компьютерные модели, включающие

описание работы ПА в вязкой среде. Однако несмотря на наличие сложного и дорогостоящего оборудования, а также большие трудозатраты, указанные группы методов часто не позволяют обеспечить идентификацию требуемых параметров ПА с заданной точностью, особенно если они изменяются в процессе работы ПА.

Третья группа осуществляет идентификацию параметров ММ ПА в процессе их реального движения, в частности, с использованием различных модификаций метода наименьших квадратов [1] или упрощенных линеаризованных моделей движения ПА. В работе [2] описан один из методов идентификации параметров ПА в горизонтальной плоскости на основе МНК, при этом данные для идентификации собираются с помощью обработки изображений с внешней видеокамеры. В работе [3] метод идентификации коэффициентов гидродинамических сопротивлений судна построен на основе модифицированного метода наименьших квадратов. Однако эти методы можно эффективно использовать только для определения параметров линейных моделей, что для ПА возможно только в редких частных случаях.

Для идентификации параметров нелинейных динамических моделей часто используют нейронные сети [1]. В частности, в работе [4] предлагается метод идентификации сил гидродинамического сопротивления ПА с помощью радиально-базисной нейронной сети. Однако несмотря на свою достаточно высокую эффективность, модели, получаемые на основе нейронных сетей, представляют собой "черный ящик", которые крайне сложно использовать в процессе синтеза СУ ПА. Для указанных целей разработано и большое число градиентных методов [1, 5, 6]. Но в большинстве случаев они слишком сложны для реализации на бортовой ЭВМ ПА.

Дополнительной проблемой является и ограниченный набор бортовых датчиков ПА, что не позволяет измерить полный вектор состояния ПА, который необходим для реализации большинства методов идентификации. Известные методы идентификации параметров динамических объектов, построенные на основе неполных измерений вектора их состояния [7], имеют большую вычислительную сложность и для ПА мало применимы. Тем не менее, алгоритмы текущей идентификации параметров ПА с использованием его бортовой ЭВМ позволят существенно упростить и ускорить сам процесс идентификации, корректируя режимы его движения для уточнения отдельных параметров. Поэтому задача снижения вычислительной сложности алгоритмов определения текущих параметров ПА в реальном масштабе времени является важной и актуальной.

Описание ММ ПА и постановка задачи

Наиболее полную ММ пространственного движения ПА, параметры которой необходимо иден-

¹ Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (гос. контракт № 07.514.11.4085 от 17.10.2011 г.) и поддержана РФФИ (гранты 10-07-00395, 11-07-98502).

тифицировать, в матричной форме можно представить в виде нелинейных дифференциальных уравнений [8]

$$M\dot{v} + (C(v) + D(v))v + g(\eta) = \tau; \quad (1)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)v, \quad (2)$$

где $M \in R^{6 \times 6}$ — матрица инерции (включающая присоединенные массы и моменты инерции жидкости); $C(v) \in R^{6 \times 6}$ — матрица кориолисовых и центробежных сил; $D(v) \in R^{6 \times 6}$ — матрица гидродинамических сил и моментов; $g(\eta) \in R^6$ — вектор гидростатических сил и моментов; $\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T \in R^6$ — вектор положения и ориентации ПА в абсолютной системе координат (СК); $\tau = [T_x, T_y, T_z, M_x, M_y, M_z]^T \in R^6$ — вектор проекций упоров движителей ПА на оси связанной с ним СК; $v = [v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T \in R^6$ — вектор проекций линейной и угловой скоростей движения ПА на оси связанной СК; $J(\eta)$ — матрица перехода из связанной в абсолютную СК, которая имеет вид [8]

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_1(\eta) & 0 \\ 0 & J_2(\eta) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\text{где } J_1(\eta) = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta & -\sin\psi \cos\theta & \sin\psi \sin\theta \\ \sin\psi \cos\theta & \cos\psi \cos\theta & \cos\psi \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \sin\psi & \cos\theta \cos\psi \end{bmatrix};$$

$$J_2(\eta) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\theta \tan\theta & \cos\theta \tan\theta \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \frac{\sin\theta}{\cos\theta} & \frac{\cos\theta}{\cos\theta} \end{bmatrix}.$$

Матрицу инерции для большинства ПА можно составить из двух матриц:

$$M = M_A + M_{II}, \quad (4)$$

$$\text{где } M_A = \begin{bmatrix} m_a & 0 & 0 & 0 & m_a Y_c & 0 \\ 0 & m_a & 0 & -m_a Y_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -m_a Y_c & 0 & J_{xx} & -J_{xy} & -J_{xz} \\ m_a Y_c & 0 & 0 & -J_{xy} & J_{yy} & -J_{yz} \\ 0 & 0 & 0 & -J_{xz} & -J_{yz} & J_{zz} \end{bmatrix};$$

$$M_{II} = - \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \lambda_{14} & \lambda_{15} & \lambda_{16} \\ \lambda_{12} & \lambda_{22} & \lambda_{23} & \lambda_{24} & \lambda_{25} & \lambda_{26} \\ \lambda_{13} & \lambda_{23} & \lambda_{33} & \lambda_{34} & \lambda_{35} & \lambda_{36} \\ \lambda_{14} & \lambda_{24} & \lambda_{34} & \lambda_{44} & \lambda_{45} & \lambda_{46} \\ \lambda_{15} & \lambda_{25} & \lambda_{35} & \lambda_{45} & \lambda_{55} & \lambda_{56} \\ \lambda_{16} & \lambda_{26} & \lambda_{36} & \lambda_{46} & \lambda_{56} & \lambda_{66} \end{bmatrix};$$

m_a — масса ПА; λ_{ij} — элементы, соответствующие присоединенным массам и присоединенным моментам инерции жидкости ($i, j = 1, \dots, 6$); Y_c — метacentрическая высота ПА; $J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}, J_{xy}, J_{xz}, J_{yz}$ — моменты инерции ПА относительно его главных и вспомогательных осей инерции.

Матрица кориолисовых и центробежных сил имеет вид [8]

$$C(v) = C_A(v) + C_{II}(v), \quad (5)$$

где

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & C_{11}(v) \\ C_{21}(v) & C_{22}(v) \end{bmatrix};$$

$$C_{11}(v) = \begin{bmatrix} m_a Y_c \omega_z & m_a v_z & -m_a v_y \\ -m_a v_z & m_a Y_c \omega_z & m_a v_x \\ -m_a (Y_c \omega_x - v_y) & -m_a (Y_c \omega_y + v_x) & 0 \end{bmatrix};$$

$$C_{21}(v) = \begin{bmatrix} -m_a Y_c \omega_z & m_a v_z & m_a (Y_c \omega_x - v_y) \\ -m_a v_z & -m_a Y_c \omega_z & m_a (Y_c \omega_y + v_x) \\ m_a v_y & -m_a v_x & 0 \end{bmatrix};$$

$$C_{22}(v) =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -J_{yz} \omega_y - J_{xz} \omega_x + J_{zz} \omega_z & J_{yz} \omega_z + J_{xy} \omega_x - J_{yy} \omega_y \\ J_{yz} \omega_y + J_{xz} \omega_x - J_{zz} \omega_z & 0 & -J_{xz} \omega_z - J_{xy} \omega_y + J_{xx} \omega_x \\ -J_{yz} \omega_z - J_{xy} \omega_x + J_{yy} \omega_y & J_{xz} \omega_z + J_{xy} \omega_y - J_{xx} \omega_x & 0 \end{bmatrix};$$

$$C_{II}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_3 & -\alpha_2 \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha_3 & 0 & \alpha_1 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_2 & -\alpha_1 & 0 \\ 0 & \alpha_3 & -\alpha_2 & 0 & \beta_3 & -\beta_2 \\ -\alpha_3 & 0 & \alpha_1 & -\beta_3 & 0 & \beta_1 \\ \alpha_2 & -\alpha_1 & 0 & \beta_2 & -\beta_1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\alpha_1 = \lambda_{11}v_x + \lambda_{12}v_y + \lambda_{13}v_z + \lambda_{14}\omega_x + \lambda_{15}\omega_y + \lambda_{16}\omega_z;$$

$$\alpha_2 = \lambda_{12}v_x + \lambda_{22}v_y + \lambda_{23}v_z + \lambda_{24}\omega_x + \lambda_{25}\omega_y + \lambda_{26}\omega_z;$$

$$\alpha_3 = \lambda_{13}v_x + \lambda_{23}v_y + \lambda_{33}v_z + \lambda_{34}\omega_x + \lambda_{35}\omega_y + \lambda_{36}\omega_z;$$

$$\beta_1 = \lambda_{14}v_x + \lambda_{24}v_y + \lambda_{34}v_z + \lambda_{44}\omega_x + \lambda_{45}\omega_y + \lambda_{46}\omega_z;$$

$$\beta_2 = \lambda_{15}v_x + \lambda_{25}v_y + \lambda_{35}v_z + \lambda_{45}\omega_x + \lambda_{55}\omega_y + \lambda_{56}\omega_z;$$

$$\beta_3 = \lambda_{16}v_x + \lambda_{26}v_y + \lambda_{36}v_z + \lambda_{46}\omega_x + \lambda_{56}\omega_y + \lambda_{66}\omega_z.$$

Матрица гидродинамических сил и моментов имеет вид [8]

$$D(v) = D_1(v) + D_2(v) = \text{diag}(d_{1x}, d_{1y}, d_{1z}, d'_{1x}, d'_{1y}, d'_{1z}) + \text{diag}(d_{2x}|v_x|, d_{2y}|v_y|, d_{2z}|v_z|, d'_{2x}|\omega_x|, d'_{2y}|\omega_y|, d'_{2z}|\omega_z|), \quad (6)$$

где d_1, d_2, d'_1, d'_2 — коэффициенты вязкого трения, соответствующие линейной и квадратичной зависимостям гидродинамических сил (моментов) от скорости движения ПА по его отдельным степеням свободы.

Вектор действующих на ПА гидростатических сил и моментов имеет вид

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B)\sin\theta \\ -(W - B)\cos\theta\sin\varphi \\ -(W - B)\cos\theta\cos\varphi \\ y_B B \cos\theta \cos\varphi + (Y_c W - z_B B)\cos\theta\sin\varphi \\ (Y_c W - z_B B)\sin\theta - x_B B \cos\theta \cos\varphi \\ y_B B \cos\theta \sin\varphi + y_B B \sin\theta \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $W = m_a g$ — сила тяжести ПА; g — ускорение свободного падения; $B = \rho g$ — архимедова сила, приложенная в центре плавучести; ρ — масса вытесняемой ПА жидкости; x_B, y_B, z_B — координаты центра плавучести ПА относительно его центра масс.

Как видно из выражений (1)–(7), ММ ПА имеет 33 параметра, подлежащих идентификации: 21 элемент матрицы M_{II} и 12 элементов гидродинамических коэффициентов вязкого трения d_1, d_2, d'_1, d'_2 по всем степеням свободы ПА.

При этом вектор состояния ПА для указанной модели, имеющий вид

$$X = [\dot{v}_x, \dot{v}_y, \dot{v}_z, \dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z, v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z, x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T \in R^{18}, \quad (8)$$

в большинстве случаев недоступен для непосредственного измерения навигационно-пилотажными датчиками ПА.

Традиционные подходы к идентификации параметров ММ сложных динамических объектов построены на неполном измерении вектора их состояния и введении расширенного вектора, включающего полный вектор состояния этих объектов и дополнительный вектор параметров их ММ [7, 9]. Для ПА размерности такого расширенного вектора и модели, в которой он используется, слишком высоки. В результате вычислительная сложность алгоритма идентификации его параметров становится слишком большой для реализации на бортовой ЭВМ.

Исходя из сказанного в данной статье ставится задача разработки нового метода и алгоритма идентификации параметров ММ ПА, описываемых системами нелинейных дифференциальных уравнений (1)–(7). Этот метод и алгоритм должны быть построены на основе ограниченного набора данных, поступающих с навигационно-пилотажных датчиков этих аппаратов. При этом указанная идентификация должна проводиться во время движения ПА с помощью бортовой ЭВМ в реальном масштабе времени.

Метод идентификации параметров ММ ПА

Как уже отмечалось ранее, основным фактором, определяющим вычислительную сложность алгоритма идентификации параметров ММ ПА и возможность его реализации в реальном масштабе времени на бортовой ЭВМ, является размерность этой ММ. Поэтому необходимо понижать эту размерность без снижения точности идентификации.

Следует отметить, что в процессе идентификации вначале решается задача восстановления полного вектора состояния ПА, а затем на его основе выполняется идентификация параметров ММ ПА. Полная ММ ПА состоит из уравнений динамики (1), (4)–(7) и кинематики (2), (3). Последние связывают между собой все элементы вектора состояния ПА и не содержат неизвестных параметров, подлежащих идентификации, которые содержатся только в уравнениях динамики. Поэтому поставленную задачу идентификации параметров ММ ПА в условиях неполного измерения элементов вектора его состояния можно разбить на два последовательных этапа: восстановление полного вектора состояния ПА и идентификация параметров его ММ. При этом на каждом этапе можно использовать только часть полной модели ПА, что значительно снизит размерность моделей, применяемых при идентификации, и существенно уменьшит вычислительную сложность используемого алгоритма.

Схема работы предлагаемого алгоритма идентификации параметров ММ ПА показана на рис. 1.

В начале работы этого алгоритма происходит инициализация элементов вектора состояния ПА и параметров его ММ исходными значениями \hat{X}_0 и \hat{q}_0 . Затем на основе данных, поступающих с навигационно-пилотажных датчиков, формируется вектор измерений Y_k , который поступает на вход блока восстановления полного вектора состояния ПА. Указанный блок построен на основе подхода, предложенного в работе [9], который, используя сигма-точечный фильтр Калмана (СТФК) и кинематическую модель движения ПА, позволяет восстановить полный вектор его состояния даже с учетом различных периодов поступления данных от его навигационно-пилотажных датчиков.

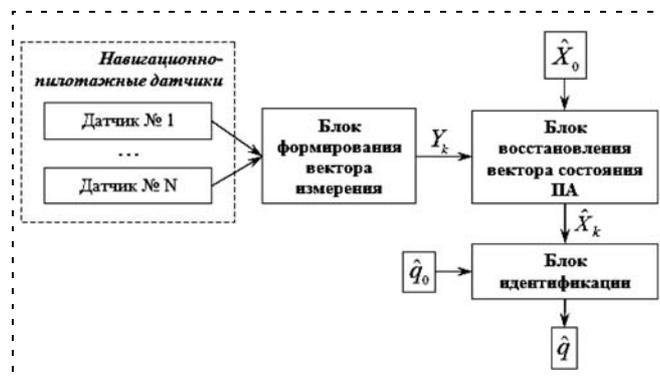


Рис. 1. Схема алгоритма идентификации параметров ММ ПА

В результате на выходе блока восстановления полного вектора состояния ПА формируется оценка вектора $\hat{X}_k \in R^{18}$ (см. выражение (8)), на основе которой идентифицируются параметры ММ ПА. Эту модель с учетом уравнения (1) следует представить в виде [1, 7]

$$\begin{aligned} q(k+1) &= q(k); \\ H(k) &= \Phi(X_k, q(k)) + e(k), \end{aligned} \quad (9)$$

где $q(k)$ — вектор идентифицируемых параметров ПА, имеющий вид

$$q(k) = [\lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{13}, \lambda_{14}, \lambda_{15}, \lambda_{16}, \lambda_{22}, \lambda_{23}, \lambda_{24}, \lambda_{25}, \lambda_{26}, \lambda_{33}, \lambda_{34}, \lambda_{35}, \lambda_{36}, \lambda_{44}, \lambda_{45}, \lambda_{46}, \lambda_{55}, \lambda_{56}, \lambda_{66}, d_{1x}, d_{2x}, d_{1y}, d_{2y}, d_{1z}, d_{2z}, d'_{1x}, d'_{2x}, d'_{1y}, d'_{2y}, d'_{1z}, d'_{2z}]^T;$$

$\Phi(X_k, q(k)) \in R^6$ — вектор-функция, описывающая динамическую модель ПА; $H(k) \in R^6$ — вектор измеряемых переменных ПА; $e(k) \in R^6$ — вектор аддитивного гауссовского белого шума измерений с матрицей $R_{LKF}(k)$ ковариаций.

Для приведения модели динамики ПА к виду (9) в уравнениях (1) и (4)—(7) перенесем влево все слагаемые, не зависящие от неизвестных параметров ПА. В результате получим

$$\begin{aligned} \tau - M_A \dot{v} - C_A(v)v - g(\eta) &= \\ &= M_{II} \dot{v} + C_{II}(v)v + D_1(v)v + D_2(v)v. \end{aligned} \quad (10)$$

Матричное уравнение (10) можно заменить системой, состоящей из шести дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} S_1 = \lambda_{11} \dot{v}_x + \lambda_{12} \dot{v}_y + \lambda_{13} \dot{v}_z + \lambda_{14} \dot{\omega}_x + \lambda_{15} \dot{\omega}_y + \\ + \lambda_{16} \dot{\omega}_z + \alpha_3 \omega_y - \alpha_2 \omega_z + d_{1x} v_x + d_{2x} |v_x| v_x; \\ S_2 = \lambda_{12} \dot{v}_x + \lambda_{22} \dot{v}_y + \lambda_{23} \dot{v}_z + \lambda_{24} \dot{\omega}_x + \lambda_{25} \dot{\omega}_y + \\ + \lambda_{26} \dot{\omega}_z - \alpha_3 \omega_x + \alpha_1 \omega_z + d_{1y} v_y + d_{2y} |v_y| v_y; \\ S_3 = \lambda_{13} \dot{v}_x + \lambda_{23} \dot{v}_y + \lambda_{33} \dot{v}_z + \lambda_{34} \dot{\omega}_x + \lambda_{35} \dot{\omega}_y + \\ + \lambda_{36} \dot{\omega}_z + \alpha_3 \omega_x - \alpha_1 \omega_y + d_{1z} v_z + d_{2z} |v_z| v_z; \\ S_4 = \lambda_{14} \dot{v}_x + \lambda_{24} \dot{v}_y + \lambda_{34} \dot{v}_z + \lambda_{44} \dot{\omega}_x + \lambda_{45} \dot{\omega}_y + \\ + \lambda_{46} \dot{\omega}_z + \alpha_3 v_y - \alpha_2 v_z + \beta_3 \omega_y - \beta_2 \omega_z + \\ + d'_{1x} \omega_x + d'_{2x} |\omega_x| \omega_x; \\ S_5 = \lambda_{15} \dot{v}_x + \lambda_{25} \dot{v}_y + \lambda_{35} \dot{v}_z + \lambda_{45} \dot{\omega}_x + \lambda_{55} \dot{\omega}_y + \\ + \lambda_{56} \dot{\omega}_z - \alpha_3 v_x + \alpha_1 v_z - \beta_3 \omega_x + \beta_1 \omega_z + \\ + d'_{1y} \omega_y + d'_{2y} |\omega_y| \omega_y; \\ S_6 = \lambda_{16} \dot{v}_x + \lambda_{26} \dot{v}_y + \lambda_{36} \dot{v}_z + \lambda_{46} \dot{\omega}_x + \lambda_{56} \dot{\omega}_y + \\ + \lambda_{66} \dot{\omega}_z + \alpha_2 v_x - \alpha_1 v_y + \beta_2 \omega_x - \beta_1 \omega_y + \\ + d'_{1z} \omega_z + d'_{2z} |\omega_z| \omega_z; \end{cases} \quad (11)$$

где $\alpha_i, \beta_i, i = \overline{1,3}$ — промежуточные переменные, вычисляемые по выражениям (5); $S = [S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6]^T \in R^6$ — вектор, имеющий вид

$$S = \begin{bmatrix} T_x - (W - B) \sin \theta - ((\dot{\omega}_y + \omega_x \omega_z) Y_c + \\ + \dot{v}_x - v_y \omega_z + v_z \omega_y) m_a \\ \dots \\ T_y + (W - B) \cos \theta \sin \varphi - ((\omega_y \omega_z - \dot{\omega}_x) Y_c + \\ + \dot{v}_y - v_z \omega_x + v_x \omega_z) m_a \\ \dots \\ T_z + (W - B) \cos \theta \cos \varphi - (-\omega_x^2 + \omega_y^2) Y_c + \\ + \dot{v}_z + v_y \omega_x - v_x \omega_y) m_a \\ \dots \\ M_x - y_B B \cos \theta \cos \varphi - (Y_c W - z_B B) \cos \theta \sin \varphi - \\ - \dot{\omega}_x J_{xx} + \omega_y \omega_z J_{yy} - \omega_y \omega_z J_{zz} - \\ - (\omega_x \omega_z - \dot{\omega}_y - \omega_y^2) J_{xy} + (\dot{\omega}_z + \omega_x \omega_y) J_{xz} - \\ - \omega_z^2 J_{yz} + (\dot{v}_y + v_x \omega_z - v_z \omega_x) m_a Y_c \\ \dots \\ M_y + x_B B \cos \theta \cos \varphi - (Y_c W - z_B B) \sin \theta - \\ - \omega_x \omega_z J_{xx} - \dot{\omega}_y J_{yy} + \omega_x \omega_z J_{zz} + (\dot{\omega}_x + \omega_y \omega_z) J_{xy} + \\ + (\omega_z^2 - \omega_x^2) J_{xz} + (\dot{\omega}_z - \omega_x \omega_y) J_{yz} - \\ - (\dot{v}_x - v_y \omega_z + v_z \omega_y) m_a Y_c \\ \dots \\ M_z - x_B B \cos \theta \sin \varphi - y_B B \sin \theta + \omega_x \omega_y J_{xx} - \\ - \omega_x \omega_y J_{yy} - \dot{\omega}_z J_{zz} + (\omega_x^2 - \omega_y^2) J_{xy} + \\ + (\dot{\omega}_x - \omega_y \omega_z) J_{xz} + (\dot{\omega}_y + \omega_x \omega_z) J_{yz} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Из выражений (5) видно, что значения промежуточных переменных $\alpha_i, \beta_i (i = \overline{1,3})$ линейно зависят от параметров ПА. При этом уравнения системы (11) также являются линейными относительно этих параметров. Поэтому ММ динамики ПА, записанная в виде (9), также будет линейна относительно параметров ПА (вектора q), и ее можно представить в виде

$$\begin{aligned} q(k+1) &= q(k); \\ S(X_k) &= F(X_k)q(k) + e(k), \end{aligned} \quad (13)$$

где $F(X_k)$ — матрица, сформированная на основе системы (11).

Поскольку модель (13) является линейной относительно вектора q , то для идентификации его элементов можно воспользоваться линейным фильтром Калмана (ЛФК), который обладает малой вычислительной сложностью.

Блок идентификации параметров ММ ПА работает следующим образом [1, 7]. Вначале происходит инициализация элементов вектора $\hat{q}(0) = q_0$ и матрицы $P(0) = P_0$, где $P(k) \in R^{33 \times 33}$ — ковариационная матрица ошибки оценки вектора $\hat{q}(k) \in R^{33}$ параметров ММ ПА, а затем выполняется обнов-

ление всех элементов на шагах $k \in [1, \dots, \infty]$ в соответствии с выражениями

$$K(k) = \frac{P(k-1)\Phi^T(k)}{P_{LKF}(k-1) + \Phi(k)P(k-1)\Phi^T(k)};$$

$$\hat{q}(k) = \hat{q}(k-1) + K(k)(S(k) - \Phi(k)\hat{q}(k-1));$$

$$P(k) = P(k-1) - K(k)\Phi(k)P(k-1).$$

При этом в процессе вычислений на вход ЛФК с выхода блока восстановления полного вектора состояния ПА подается оценка вектора \hat{X}_k , а на его выходе формируется оценка вектора параметров ММ ПА.

Оценим вычислительную сложность предложенного подхода к идентификации по сравнению с традиционным. При этом будем полагать, что на первом этапе восстановления полного вектора состояния используется алгоритм, предложенный в работе [9].

Оценка сложности алгоритма идентификации

Вычислительная сложность предложенного алгоритма идентификации складывается из вычислительных сложностей СТФК и ЛФК. Для СТФК эта сложность составляет $O(L^3)$ [7], где $L = 18$ — размерность вектора состояния X (см. выражение (8)). Сложность ЛФК складывается из вычислительных сложностей математических операций обращения и умножения матриц, которые можно оценить следующим образом [10, 11]: сложность операции обращения матрицы $O_{inv}(Z^3)$, сложность операции умножения $O_{mul}(N^2Z)$, где $N = 33$ — размерность вектора идентифицируемых параметров, $Z = 6$ — размерность функции измерения, равная числу дифференциальных уравнений, описывающих динамику ПА. Таким образом, общую вычислительную сложность предлагаемого алгоритма можно оценить величиной

$$\begin{aligned} O(L^3) + 5 \cdot O(N^2Z) + O(Z^3) = \\ = O(18^3) + 5 \cdot O(33^2 \cdot 6) + O(6^3) = O(32\ 886). \end{aligned}$$

При применении традиционного подхода для идентификации параметров ПА необходимо использовать ММ, размерность вектора состояния которой $L_T = 18 + 33 = 51$, так как она складывается из размерностей вектора состояния ПА и вектора идентифицируемых параметров, а также СТФК, так как указанная ММ существенно нелинейна. Поэтому вычислительная сложность традиционного подхода равна $O(L_T^3) = O(51^3) = O(132\ 651)$, что более чем в четыре раза выше вычислительной сложности предлагаемого подхода, который обладает приемлемой вычислительной сложностью для его реализации на бортовой ЭВМ ПА в реальном масштабе времени.

Результаты численных экспериментов

Для проверки работоспособности и эффективности предложенного подхода было проведено численное моделирование, в процессе которого использовалась ММ ПА, описываемая уравнениями (1)–(7) со следующими параметрами:

$$m_a = 300 \text{ кг}, Y_c = 0,02 \text{ м}, J_{xx} = 9 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$J_{yy} = 30 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, J_{zz} = 30 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$\lambda_{11} = 80 \text{ кг}, \lambda_{22} = 140 \text{ кг}, \lambda_{33} = 140 \text{ кг},$$

$$\lambda_{44} = 5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \lambda_{55} = 30 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \lambda_{66} = 30 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$\lambda_{ij} = 0, i \neq j, i, j = \overline{1, 6};$$

$$d_{1x} = 30 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}, d_{2x} = 10 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1}, d_{1y} = 60 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1},$$

$$d_{2y} = 30 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1}, d_{1z} = 60 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}, d_{2z} = 30 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1},$$

$$d'_{1x} = 20 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}, d'_{2x} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2,$$

$$d'_{1y} = 40 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}, d'_{2y} = 20 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2,$$

$$d'_{1z} = 40 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}, d'_{2z} = 20 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2,$$

а матрица ковариаций шумов измерений для ЛФК имела вид $R_{LKF} = 0,05 I_{6 \times 6}$.

В блоке восстановления полного вектора состояния ПА использовали алгоритм комплексирования данных с навигационно-пилотажных датчиков ПА, построенный на основе СТФК [9]. Состав и используемые при моделировании параметры этих датчиков приведены в таблице, где ДУС — датчик угловых скоростей, а ГАНС — гидроакустическая навигационная система. Амплитуды аддитивных белых шумов в соответствующих датчиках равнялись погрешностям этих датчиков. В процессе моделирования шаг дискретизации системы управления ПА принимали равным $\Delta t = 0,1$ с.

Моделирование работы алгоритма идентификации параметров ММ ПА проводили при его движении под действием упоров $T_x = 50\sin(0,03t)$, $T_y = 50\sin(0,02t)$, $T_z = 50\sin(0,01t)$, $M_x = 0$, $M_y = 5\text{sign}(\sin(0,2t))$, $M_z = 22\sin(0,1t + \pi)$, создаваемых его движительным комплексом.

Указанный режим является наиболее "напряженным" и выбирался с учетом того, чтобы необходимо было идентифицировать все параметры ПА. В более простых режимах движения ММ ПА упрощается (так как отдельные слагаемые становятся равны нулю) и, следовательно, уменьшается число параметров, подлежащих идентификации.

На рис. 2 представлены результаты идентификации присоединенных масс (рис. 2, а—в) и моментов инерции (рис. 2, г—е) по всем степеням свободы ПА.

Из этих рисунков видно, что процесс исходной идентификации присоединенных масс ПА занимает около 60 с, а присоединенных моментов инерции — примерно 200 с. При этом ошибка определения присоединенных масс составляет 2 %, а присоединенных моментов инерции — 10...15 %.

Основные характеристики навигационно-пилотажных датчиков ПА

Характеристика	Акселерометры	Доплеровский лаг	ДУС	ГАНС	Датчик глубины	Датчик ориентации
Период обновления, с	0,005	1,5	0,005	3,5	0,6	0,005
Погрешность σ	0,04 м/с ²	0,15 м/с	0,02 рад/с	2 м	0,2 м	0,02 рад

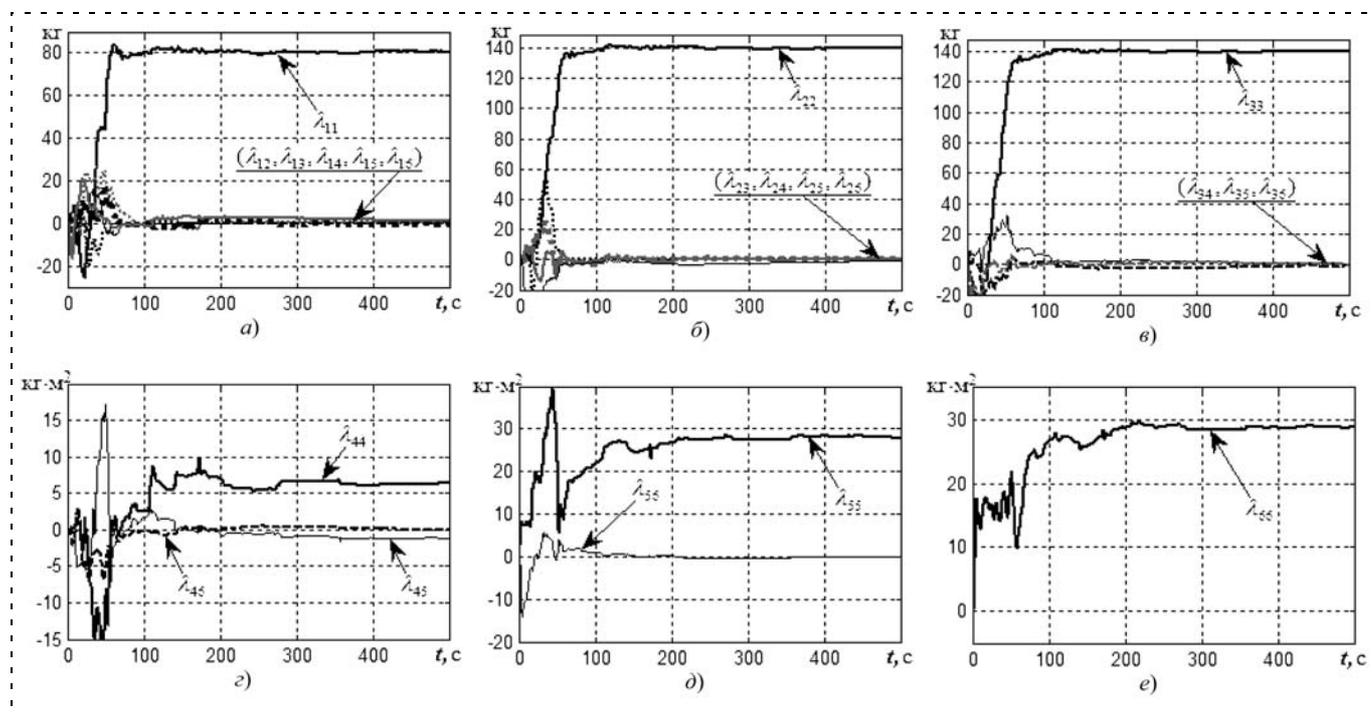


Рис. 2. Результаты идентификации присоединенных масс и моментов инерции ПА

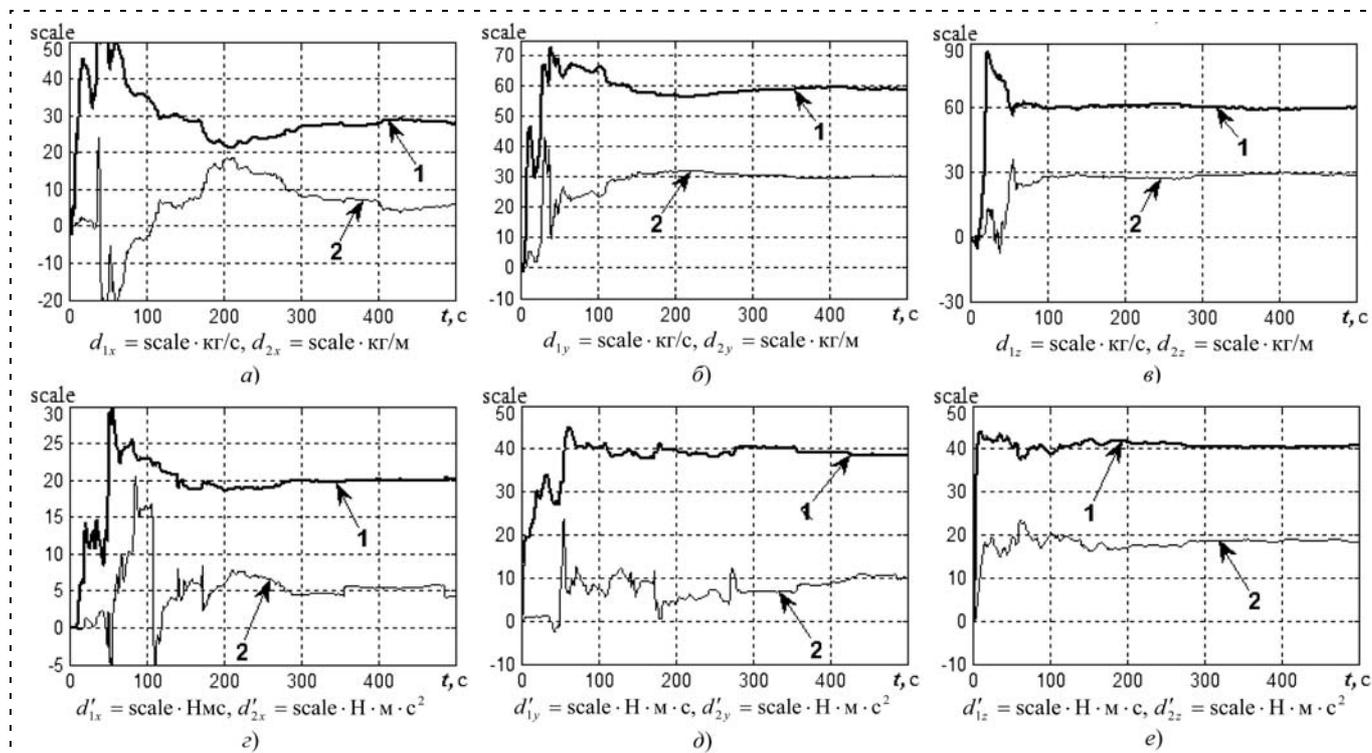


Рис. 3. Результаты идентификации гидродинамических коэффициентов по линейным и вращательным степеням свободы ПА

Относительно большое время идентификации параметров объясняется сложностью ММ ПА и сильными помехами в восстановленном векторе его состояния. Увеличение времени и погрешностей определения присоединенных моментов инерции ПА по сравнению с присоединенными массами объясняется необходимостью использования восстановленных значений угловых ускорений, заметно отступающих от своих реальных значений ввиду инерционности СТФК.

Результаты идентификации гидродинамических коэффициентов по линейным и вращательным степеням свободы ПА представлены на рис. 3, а—е.

На этих рисунках цифрой 1 обозначены кривые, показывающие процессы идентификации гидродинамических коэффициентов, соответствующих линейной, а цифрой 2 — квадратичной зависимостям гидродинамических сил (моментов) от скорости движения ПА по его отдельным степеням свободы.

Из представленных рисунков видно, что время начальной идентификации гидродинамических коэффициентов ПА по разным степеням свободы находится в диапазоне от 50 до 200 с. При этом погрешность определения указанных параметров составляет от 2 до 10 %. Большой разброс времени идентификации гидродинамических коэффициентов объясняется различием режимов движения ПА по отдельным степеням свободы.

Таким образом, результаты моделирования показали, что предложенный метод идентификации позволяет достаточно точно оценивать параметры ММ ПА, обладая относительно небольшой вычислительной сложностью.

Заключение

Предложенный в данной работе эффективный метод идентификации параметров ММ ПА позволяет учитывать ограниченный набор имеющихся навигационно-пилотажных датчиков и обладает

приемлемой вычислительной сложностью для его успешного использования при наличии типовой бортовой ЭВМ. Этот метод содержит два этапа. На первом происходит восстановление полного вектора состояния ПА с помощью его кинематической модели движения, а на втором происходит идентификация параметров его ММ на основе линейного фильтра Калмана. Использование на каждом из этих двух этапов только части полной модели движения ПА позволяет во много раз снизить вычислительную сложность алгоритма. Результаты моделирования полностью подтвердили его высокую эффективность.

Список литературы

1. **Ikonen E., Najim K.** Advanced process identification and control, Marsel Dekker Inc, 2002. 310 p.
2. **Mišković N., Vukić Z., Barišić M.** Identification of coupled mathematical models for underwater vehicles. Proceedings of the OCEANS'07 Conference, Aberdeen, Scotland, 2007. P. 186—194.
3. **Golding B., Ross A., Fossen T.** Identification of nonlinear viscous damping for marine vessels // 14th IFAC Symp. on System Identification, Newcastle, Australia. 2006. P. 332—337.
4. **van de Ven P., Refsne J., Johansen T., Flanagan C., Toal D.** Identification of minesniper's damping parameters using neural networks // 14th IFAC Symp. on System Identification, Newcastle, Australia. 2006. P. 321—325.
5. **Caccia M., Indiveri G., Veruggio G.** Modelling and identification of open-frame variable configuration unmanned underwater vehicles // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2000. 25 (2). P. 227—240.
6. **Wigren T.** Recursive prediction error identification and scaling of nonlinear state space models using a restricted black box parameterization // Automatica, 42 (1). 2006. P. 159—168.
7. **Haykin S.** Kalman filtering and neural networks. John Wiley and Sons. 2001. 298 p.
8. **Fossen T. I.** Guidance and control of ocean vehicles. John Wiley & Sons Ltd. 1994. 494 p.
9. **Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Мурсалимов Э. Ш.** Метод комплексирования данных с навигационных датчиков подводного аппарата с использованием нелинейного фильтра Калмана // Мехатроника, автоматизация и управление. 2012. № 8. С. 64—70.
10. **Кибернетический сборник.** Новая серия. Вып. 25. Сб. статей 1983—1985 гг. М.: Мир, 1988. 237 с.
11. **Панюков А. В., Германенко М. И.** Сложность нахождения гарантированной оценки решения приближенно заданной системы линейных алгебраических уравнений // Изв. Челябинского научного центра. 2000. № 4 (9). С. 13—17.

ИНФОРМАЦИЯ

6—7 декабря 2012 года в конгресс-центре МТУСИ состоится

XI Международная научно-практическая конференция

"Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments — 2012"

Организаторами конференции выступают филиал корпорации National Instruments в России, СНГ и Балтии, Российский университет дружбы народов

На конференции будут представлены работы, посвященные применению инновационных технологий National Instruments при решении промышленных, образовательных и научных задач, а также рассмотрены преимущества использования современного оборудования и программного обеспечения National Instruments.

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

В конференц-зале конгресс-центра будут обсуждаться успешные проекты в промышленности, области научных исследований и последние тенденции в инженерном образовании.

На технических саммитах специалисты National Instruments расскажут участникам о новинках компании. Живые дискуссии по таким направлениям, как "Кооперация ВУЗ-Промышленность" и "Инженерные стартапы".

Тел. для справок: +7 (495) 783-68-51; Электр, почта: conference.russia@ni.com

Сайт конференции: <http://www.labview.ru/conference/>

CONTENTS

Kim D. P. Algebraic Method of the Synthesis Control System for a Plant with a Pure (Transport) Delay. 2

The synthesis control problem for a plant with a pure (transport) delay is considered. We use an algebraic method based on the application of the desired transfer function. The transfer function of the of pure delay plant is approximated by a rational fractional function.

Keywords: algebraic method, the transport delay, the desired transfer function, the normalized transfer function, setting time, overshoot, approximating transfer functions

Nekrasov I. V. Building a Programmed Closed-Loop Discrete Control Strategy Based on a Procedure of Contained Enumerating Possible System States. 8

Methods of building discrete optimal control programs for computer handling systems are discussed. A programmed closed-loop optimal control strategy for a discrete dynamic system is synthesized. The realization of the named strategy is conducted using a specially designed procedure of contained enumeration of possible system states. The procedure runs sequential improvement of the current approximate solution from iteration to iteration.

Keywords: discrete systems, optimal control, programmed close-loop strategy, enumeration methods, bisection

Hodashinsky I. A., Gorbunov I. V. Optimization of Fuzzy Systems Parameters Using the Modified Bee Colonies Algorithm. 15

This paper focuses on using the modified bee colonies algorithm to tune the parameters of fuzzy systems. In this work, we evaluated of the influence of parameters on the accuracy, and analyzed relationship between the time and algorithm parameters. Simulation results confirmed that the modified bee colonies algorithm is a useful tool for tuning fuzzy systems to achieve better performance.

Keywords: fuzzy systems, parameters optimization, bee colonies algorithm

Mashenko A. A., Musatov V. Yu., Sysoev V. V. The Implementation of Neural Network Algorithm with Programmable Logic Microelectronic Circuit to Distinguish Gases Using a Vector Response of Chemiresistive Multisensor Microarray. 21

The possibility to emulate artificial neural networks with programmable logic microelectronic circuit to process a vector response generated by chemiresistive multisensor microarray under exposure to various gases is considered. The kind of the microelectronic circuit is argued; the architecture and structure of the calculation unit processing the algorithm of Hebb's neural network is presented.

Keywords: artificial neural network, programmable logic microelectronic circuit, electronic nose, gas sensor, multisensor microarray, gas analysis

Kabak I. S., Gadelev A. M. System of Diagnostics the Technological Process of Cutting with the Using Artificial Neural Networks. 25

This paper proposes a method for constructing systems of technical diagnostic of cutting tools using genetic algorithms and neural networks. It is proposed to use neural networks with a special architecture, executed in form of unified hardware modules. Each module performs as separate subtask and contains a fragment of trained neuron network. During the work it is possible to add or delete and retrain modules using genetic algorithms.

Keywords: artificial neural networks, genetic algorithms, forecasting, deterioration, diagnostic system, monitoring

Maksimenko A. S., Fedunov B. E., Chuchvaga R. V. Computer System "Dynamycal Graph" for Estimation Time Realization of Operator's Actions Algorithm. 30

In order to support design engineers, which are developing specifications of on-board algorithms of certain anthropocentric object's system-generating core, computer system "Dynamical graph" have been created. Here, you can find description of such system and example, which demonstrates some aspects of using it with purpose of creating graphs.

Keywords: global control level of anthropocentric object, graph of operator's decisions, computer system, time delays

Vu Dyc Lung, Paderno P. I., Sattorov F. E. Man in Corporate Networks. Part 1. Models and Evaluations. . . . 38

There is described the problem of quality functionality evaluation of corporate networks with a view of the human – operator which solving various tasks. There is presented a number of models which describing solving the tasks by operator in the corporate network. Workout the criteria and treatments which directed in order to obtain analytical assessments of the quality of (correctness, timeliness, income) solving the tasks as by one operator and by all operators which performing its functions by the using corporate network.

Keywords: operator, corporate network, models, evaluations, tasks, quality, quality of functionality

Ivaschenko V. A., Kolokolov M. V., Vasiliev D. A. The Concept of Synthesis of Structure Automated Control System of the Electric Power Consumption of Industrial Enterprises 43

The concept of synthesis of structure of the automated control system of electric power consumption of industrial enterprises is offered. The composition of functional blocks and the information tools providing its functioning is presented.

Keywords: electric power consumption of industrial enterprises, system of automated control, methods and models of forecasting, procedure of rationing and planning of power consumption

Sadigov A. B. Method for Evaluating the Risk of Accident in Enterprises 47

The method for assessing the risk of accidents at hazardous production facilities with the help of a fault tree and reliability theory has been developed. In order to identify causal relationships between random events that lead to accidents and risk assessment has been used methods of probabilistic analysis of fault trees. Identified the advantages and disadvantages of the fault tree method.

Keywords: risk assessment of accidents, fault tree method, theory of reliability

Loginov M. Yu., Chelnokov Yu. N. Analytical Solution of Linear Differential Error Equations of Strap down Inertial Navigation System, Functioning in the Normal Geographic Reference Frame, for the Case of Fixed Base . . . 55

Analytical solution of linear differential error equations of strap down inertial navigation system, functioning in the normal geographic reference frame, for the case of an object which is fixed relatively to the Earth, is derived. The solution is represented in the form, which is convenient for the analysis. The roots of the auxiliary equation are derived in the explicit form. Obtained results can be used, for example, for analysis of the accuracy of strap down inertial navigation system.

Keywords: inertial navigation, strap down inertial navigation system, error equations, fixed base, analytical solution

Filaretov V. F., Yukhimets D. A., Mursalimov E. Sh. Method of Parameters Identification of Mathematical Model of Underwater Vehicle 64

In this paper the method of parameter identification of mathematical model of underwater vehicle (UV) is offered. This method allows to take into account a limited set of navigation sensors and has acceptable computational complexity for using in standard onboard computer. Identifiable parameters are added masses and inertia moments on all degrees of freedom and hydrodynamic forces and moments. This method consists of two stages. On the first stage the recovery of full state vector of UV is carried out with using its kinematic model of movement. On the second stage the parameters identification of mathematical model is carried out with using of linear Kalman filter. Using at each stage only part of full mathematical model allows to significantly reduce the computational complexity of this algorithm. The results of simulation fully confirmed functionality and high efficiency of developed method.

Keywords: underwater vehicle, mathematical model, parameters identification, Kalman filter

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Е. В. Комиссарова.*

Сдано в набор 26.07.2012. Подписано в печать 18.09.2012. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН1012. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".
105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2, офис 2.