

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Ковальчук С. В., Бухановский А. В. Параллельная производительность стохастических алгоритмов.. 5
- Заболотский В. П., Юсупов Р. М., Демидов А. А. Оценивание эффективности применения сканирующего робота для поиска информации в информационных сетях ..... 13
- Суханов А. В., Крылов А. И. Адаптивная защита информационных систем ..... 17
- Коробейников А. Г., Хоанг Зянг, Кузнецова С. Н., Тронилов И. Б., Семенов В. А. Метод сегментации изображения для распознавания печатных документов ..... 22

### ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Лучко С. В., Балугев С. Ю., Вагутин М. А., Рогачев В. А. Периодические режимы в системах автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией второго рода ..... 27
- Коршунов А. И. Достаточное условие асимптотической устойчивости нелинейной дискретной системы ..... 34

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Никифоров В. В., Шкиртиль В. И. Оценка времени отклика прикладных задач в системах реального времени с многоядерными процессорами ..... 38
- Полубелова О. В., Котенко И. В. Верификация правил фильтрации политики безопасности методом проверки на модели ..... 44

### ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Тарановский Д. О. Оценивание параметров блока маятниковых поплавковых акселерометров на одноосном стенде ..... 50

### ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Лошицкий П. А., Шароватов В. Т. Идентификация некоторых параметров математической модели двигателя оболочкового типа ..... 56
- Полетаев Б. И., Атамасов В. Д., Белянкин А. В., Михайлов Д. Ю., Левандович А. В., Полуян М. М. Экспериментальный комплекс для изучения высокоскоростного воздействия потоков метеорных частиц на поверхность космического аппарата ..... 63
- Аверкиев Н. Ф., Васьков С. А., Салов В. В. Баллистическое построение систем космических аппаратов связи и пассивной радиолокации лунной поверхности ..... 66
- Колчев А. А., Шумаев В. В., Щирый А. О. Измерительный комплекс для исследования эффектов многолучевого ионосферного распространения коротких волн ..... 73

- SUMMARY ..... 79

- УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ в 2008 г. .... 85

# CONTENTS

## INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

<b>Kovalchuk S. V., Boukhanovsky A. V.</b> Parallel Performance of Stochastic Algorithms .....	5
<b>Zabolotsky V. P., Yusupov R. M., Demidov A. A.</b> Efficiency Estimation of the Scanning Robot Application for Information Search in the Information Networks .....	13
<b>Sukhanov A. V., Krylov A. I.</b> Adaptive Protection of Information Systems .....	17
<b>Korobeynikov A. G., Hoang Zayng, Kuznetsova S. N., Tronikov I. B., Semenov V. A.</b> Method of Segmentation of the Image for Recognition of Printed Documents .....	22

## DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

<b>Luchko S. V., Baluev S. Yu., Vatutin M. A., Rogatchev V. A.</b> Periodic Modes in Systems of Automatic Control with Pulse-Width Modulations of the Second Kind .....	27
<b>Korshunov A. I.</b> Sufficient Condition for Nonlinear Sampling System Asymptotic Stability of Discrete System .....	34

## COMPUTING TECHNIQUE

<b>Nikiforov V. V., Shkirtil V. I.</b> Estimation of Application Task Response Time in the Multiprocessor Systems .....	38
<b>Polubelova O. V., Kotenko I. V.</b> Verification of Filtering Rules of Security Policy by Model Checking.....	44

## GYROSCOPIC AND NAVIGATION SYSTEMS

<b>Taranovsky D. O.</b> Pendulum Pulse-Rebalance Accelerometer Unit Parameter Estimation Using a Single Axis Turntable .....	50
--	----

## ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

<b>Loshitsky P. A., Sharovатов V. T.</b> Identification of Some Parameters of the Engine Membrane Type.....	56
<b>Poletaev B. I., Atamasov V. D., Belyankin A. V., Mikhaylov D. Yu., Levandovich A. V., Poluyan M. M.</b> Experimental Complex for Studying of High-Speed Effect of Flows of Meteoric Particles on a Space Vehicle Surface .....	63
<b>Averkiev N. F., Vas'kov S. A., Salov V. V.</b> Ballistic Construction of Communication Systems and Passive Radiolocation of Lunar Surface.....	66
<b>Kolchev A. A., Shumaev V. V., Shiriy A. O.</b> Equipment for Research of HF Ionospheric Multipath Propagation Effects .....	73

SUMMARY .....	79
---------------	----

THE LIST of ARTICLES PUBLISHED in 2008 .....	85
--	----

*Editor-in-Chief* L. F. Porfiriev

С. В. КОВАЛЬЧУК, А. В. БУХАНОВСКИЙ

## ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СТОХАСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Обсуждаются вопросы построения моделей производительности параллельных стохастических алгоритмов для различных классов задач. Предложен параметрический подход, позволяющий описывать параллельное ускорение в форме детерминированной функции. Ее параметрами являются случайные величины, характеризующие объективные свойства алгоритма и не зависящие от особенностей программно-аппаратной реализации. Такое представление позволяет в аналитической форме исследовать зависимость вероятностных характеристик производительности от алгоритма и специфики параллельной вычислительной архитектуры.

*Ключевые слова:* стохастические алгоритмы, параллельная производительность, высокопроизводительные вычисления.

**Введение.** Для решения широкого круга научных и инженерных задач применяются стохастические вычислительные алгоритмы, основанные на операциях с последовательностями псевдослучайных чисел. К ним относятся, например, численные методы Монте-Карло, генетические алгоритмы, случайные алгоритмы на графах и др. Вследствие относительно слабой сходимости, обусловленной статистическими свойствами алгоритмов, получение достоверного результата требует больших объемов вычислений, что, в свою очередь, делает обоснованным применение параллельных алгоритмов и соответствующих им методов и технологий параллельного программирования [1].

Важнейшей характеристикой параллельной программы, исполняемой на  $p$  вычислителях (ядрах, процессорах, узлах), является ее производительность. Она характеризуется общим временем работы  $T_p$  и безразмерными характеристиками — параллельным ускорением  $S_p$  и эффективностью  $\varepsilon_p$ . Классическое представление параллельного ускорения как отношения времени выполнения программы на одном и  $p$  вычислителях в одинаковых условиях [2] позволяет экспериментально определять  $S_p$  для обычных, детерминированных алгоритмов. На его основе предложены различные методы моделирования производительности, которые позволяют предсказывать поведение алгоритма на платформах с различной вычислительной архитектурой (см., например, [3, 4]).

Экспериментально определить и тем более спрогнозировать параллельную производительность стохастического алгоритма, пользуясь традиционными подходами, затруднительно. Это обусловлено тем, что время работы  $T_1, T_p$  последовательной и параллельной программ может быть случайной величиной. Как следствие, каждое измерение времени работы

программы соответствует в общем случае разным условиям эксперимента, что не позволяет напрямую воспользоваться классическими представлениями ускорения и эффективности.

Исследования производительности стохастических алгоритмов выполнялись применительно к некоторым классам задач (итерационным методам решения задач оптимизации) [5—7]. В настоящей работе предлагается вероятностный подход к построению моделей производительности параллельных стохастических алгоритмов для различных классов задач на основе представления времени работы программы в виде детерминированной функции случайных аргументов — параметров самого алгоритма.

**Классы параллельных стохастических алгоритмов.** Представленные на рис. 1 параллельные стохастические алгоритмы классифицированы по признаку влияния источника стохастизации на время выполнения программы ( $V_i$  ( $i = 0, \dots, n$ ) — отдельные блоки алгоритма,  $R$  — набор аргументов). Квазидетерминированный алгоритм (рис. 1, а) является вырожденным случаем стохастического алгоритма: каждый вычислитель выполняет одни и те же операции с одинаковым, заданным, количеством псевдослучайных чисел. Такие алгоритмы характерны, например, для задачи вычисления многомерных интегралов методом Монте-Карло [8].

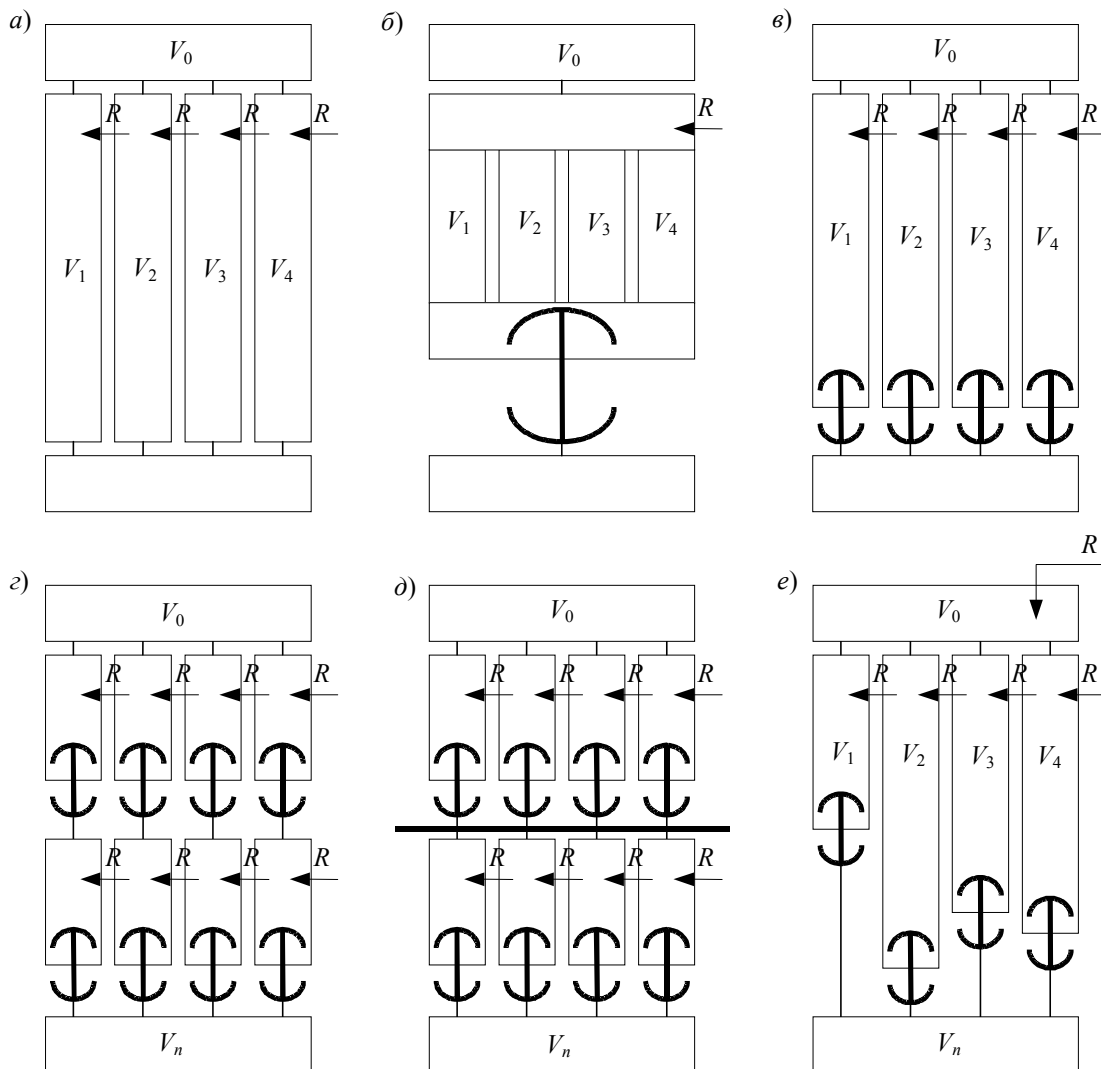


Рис. 1

Алгоритмы со случайным выходом (обладающие недетерминированным временем выполнения отдельных процедур алгоритма) (рис. 1, б, в) соответствуют итерационным, применяемым, например, в задачах оптимизации [9, 10]. Алгоритмы со случайным накоплением (рис. 1, г, д) характерны для методов, основанных на многократном повторении испытаний со

случайным выходом, — например, решения систем линейных уравнений методом Монте-Карло [11]. Отдельный класс представляют алгоритмы со случайными входными данными (рис. 1, *е*): для них время выполнения программы определяется совокупным влиянием источника стохастизации самого алгоритма и изменчивостью данных.

**Вероятностный подход к описанию параллельной производительности.** Из рис. 1 следует, что время работы программы, реализующей параллельный стохастический алгоритм, определяется структурой самого алгоритма и характеристиками псевдослучайных величин (переменных), составляющих источник стохастизации. Это дает основание представить время работы программы на  $p$  вычислителях в форме детерминированной функции  $T_p = T(p, R)$ , зависящей от набора аргументов  $R$ , которые являются случайными величинами. Если известна плотность распределения  $f_R(x)$ , то плотность распределения времени выполнения программы  $f_{T_p}(x)$ , а также соответствующие значения плотности распределения параллельного ускорения  $f_S(x)$  и эффективности  $f_\varepsilon(x)$  выражаются через нее однозначно [12].

Рассмотрим возможность применения данного подхода на конкретных примерах алгоритмов в рамках PRAM-модели параллельной программы [13], реализуемой посредством технологии OpenMP для систем с общей памятью. В рамках PRAM-модели накладные расходы на создание потоков в первом приближении не учитываются, что упрощает содержательную интерпретацию результатов исследования.

*Алгоритмы со случайным выходом без барьера.* Параллельный алгоритм со случайным выходом без барьера (рис. 1, *б*) является традиционным для численного решения задач оптимизации, например, методом случайного поиска (различными модификациями) [14]. Этот алгоритм задает управляемый случайной последовательностью итерационный процесс, на каждом шаге которого целевая функция оптимизации вычисляется параллельно. Собственно в параллельных вычислениях случайная последовательность не используется, однако она определяет общее количество итераций  $n$  для достижения заданной точности и, как следствие, время выполнения работы алгоритма:

$$T_1 = T_0 + nT_c, \quad T_p = T_0 + n\frac{T_c}{p}. \quad (1)$$

Здесь  $T_0$  — время выполнения операции вне итерационного цикла (последовательная часть кода),  $T_c$  — время, затрачиваемое на одну итерацию алгоритма поиска (вычисление целевой функции, параллельная часть кода).

Число итераций  $n$  является случайной величиной. В общем случае закон ее распределения неизвестен и во многом зависит от вида целевой функции и характеристик решаемой задачи. Однако в ряде случаев вывод о классе распределения может быть сделан на основании общих соображений. В частности, для задач случайного поиска, сводящихся к последовательности положительных и отрицательных испытаний (зависимых испытаний Бернулли), общее количество итераций тяготеет к нормальному распределению. В дальнейшем ограничимся этим предположением и будем характеризовать число итераций в (1) двумя параметрами — средним значением  $m_n$  и средним квадратическим отклонением  $\sigma_n$ .

На рис. 2, *а* приведен квантильный биplot распределения числа итераций для нормального распределения в процедуре адаптивного случайного поиска с линейной тактикой в рамках задачи аппроксимации климатических спектров морского волнения [15]. Квантильный биplot представляет собой двумерный график, по оси абсцисс которого отложены значения порядковых статистик рассматриваемой величины (результаты экспериментов), а по оси ординат — теоретические квантили соответствующего распределения. Подобное построение позволяет оценить соответствие распределения величины теоретическому по степени приближенности графика к прямой линии.

В рамках предположений о нормальности  $n$  величины  $T_1$  и  $T_p$  также будут нормально распределены. Тогда параллельное ускорение

$$S(p) = \frac{T_1}{T_p} = \frac{T_0 + nT_c}{T_0 + nT_c/p} \quad (2)$$

при одном и том же значении  $n$  в числителе и знаменателе будет иметь плотность распределения

$$f(S) = f(n(S))|n'(S)|, \quad (3)$$

где обратная (2) функция

$$n(S) = \frac{T_0}{T_c} \frac{S-1}{1-S/p} \quad (4)$$

выражает зависимость числа итераций через ускорение системы.

На рис. 2, б приведен пример сопоставления аналитического выражения (3) с результатами экспериментального определения ускорения в терминах (2), полученного путем одинаковой инициализации последовательностей псевдослучайных чисел при вычислениях на одном и двух ядрах. Данные представлены в форме вероятностного биplotа ( $P$  — вероятность,  $\omega$  — частота). Из рис. 2, б видно, что выражение (3) хорошо отображает данные измерений.

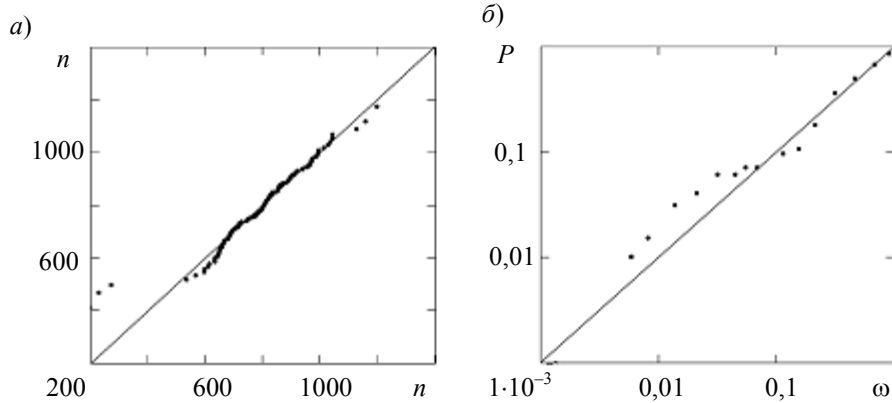


Рис. 2

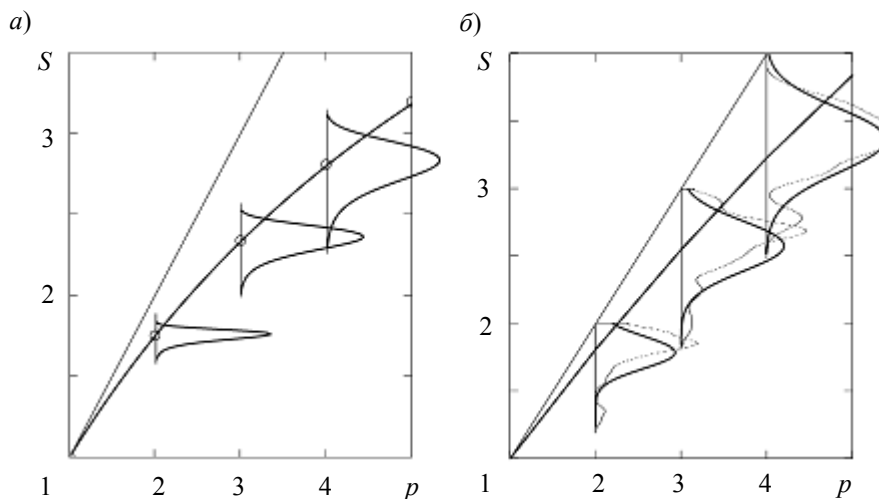


Рис. 3

На рис. 3, а приведен пример оценки распределений параллельного ускорения по (3) в зависимости от количества вычислителей (для алгоритма со случайным выходом без барьера). Несмотря на то что само время выполнения (1) нормально распределено, распределение ускорения (3) имеет явно выраженную левую асимметрию и естественное усечение при  $S = p$ . При увеличении количества вычислителей распределения ускорения становятся шире.

*Алгоритмы со случайным выходом и барьером.* Параллельные алгоритмы со случайным выходом и барьером (рис. 1, в) также достаточно часто применяются для численного решения задач оптимизации, например, при глобальном поиске или при дискретной оптимизации. Они реализуют конкурирующую схему: параллельно выполняющиеся задачи реализуют один и тот же алгоритм над различными данными. По завершении работы всех задач результаты сравниваются с целью выбора оптимального варианта. Если время работы каждой задачи соответствует (1), то общее время работы параллельного алгоритма с барьером следующее:

$$T_p = \max_{i=1,p} [T_0 + n_i T_c] = T_0 + T_c \max_{i=1,p} [n_i], \quad (5)$$

где операция максимума соответствует наличию барьера. Однако в отличие от (1) время работы последовательного алгоритма будет

$$T_1 = T_0 + T_c \sum_{i=1}^p n_i = T_0 + T_c \max_{i=1,p} [n_i] + T_c \sum_{k=1}^{p-1} n_k. \quad (6)$$

Последний член суммы  $\vartheta = \sum_{k=1}^{p-1} n_k$  характеризует задачи (процедуры), завершившиеся до

момента достижения барьера.

Определение (5) допускает поиск класса распределений  $T_p$  в рамках теории экстремальных значений случайных величин [16]. В частности, если распределение числа итераций  $n_i$  нормально, то распределение времени работы на  $p$  вычислителях будет асимптотически описываться первым предельным распределением (распределением Гумбеля или Фишера—Типпета) с плотностью:

$$f_{n_{\max}}(x) = a_p \exp[-a_p(x - b_p)] \exp[-\exp[-a_p(x - b_p)]] , \quad (7)$$

где параметры распределения зависят от количества вычислителей

$$a_p = \frac{\sqrt{2 \ln(p)}}{\sigma_n}, \quad b_p = \left[ \sqrt{2 \ln(p)} - \frac{\ln(\ln(p)) + \ln(4\pi)}{2\sqrt{2 \ln(p)}} \right] \sigma_n + m_n. \quad (8)$$

Если определить параллельное ускорение через (5) и (6) как

$$S(p) = \frac{T}{T_p} = \frac{T_0 + n_{\max} T_c + T_c \vartheta}{T_0 + n_{\max} T_c} \quad (9)$$

и воспользоваться выражением (3), то плотность распределения ускорения будет зависеть от случайного параметра  $\vartheta$ . Как следствие, это позволит воспользоваться моделью комбинированного распределения

$$f(S) = \int_0^{\infty} f_{\max}(n_{\max}(S, \vartheta)) |n'_{\max}(S, \vartheta)| \varphi(\vartheta | m_{\vartheta}, \sigma_{\vartheta}) d\vartheta, \quad (10)$$

где

$$n_{\max}(S) = \frac{T_0}{T_c} \frac{1 - S + T_c \vartheta / T_0}{S - 1}$$

есть обратная функция к (9), а  $\varphi$  — плотность распределения величины  $\vartheta$ . Она асимптотически может рассматриваться как нормальная с параметрами  $m_{\vartheta} = (p - 1)\tilde{m}_n$ ,  $\sigma_{\vartheta} = \sqrt{(p - 1)\tilde{\sigma}_n}$ . Здесь знак „ $\sim$ “ соответствует моменту усеченного нормального распределения с точкой усечения  $n_{\max} \equiv (p - 1)/p$ . В силу приближенности этого предположения выражение (10), в отличие от точного выражения (3), не имеет ограничения при  $S = p$ , что должно учитываться при анализе. На рис. 3, б приведен пример расчета ускорения (для алгоритма со случайным

выходом и барьером) по (10) при тех же параметрах, что и для рис. 3, а (кривая — теоретические значения, пунктир — ядерная оценка по данным эксперимента).

*Алгоритмы со случайным накоплением.* Параллельные алгоритмы со случайным накоплением возникают в задачах потоковой обработки больших объемов данных, где на каждом из  $M$  шагов используется один из приведенных выше алгоритмов. В силу независимости статистических испытаний общее время работы таких алгоритмов будет асимптотически нормальным с параметрами  $m_T = Mm_{T_i}$ ,  $\sigma_T = \sqrt{M}\sigma_{T_i}$ . В частности, если на каждом шаге используется алгоритм со случайным выходом без барьера, то распределение параллельного ускорения получим в соответствии с (1)—(4) путем замены переменных

$$\tilde{T}_0 = MT_0, \quad \tilde{m}_n = Mm_n, \quad \tilde{\sigma}_n = \sqrt{M}\sigma_n, \quad (11)$$

т.е. масштабных преобразований исходного распределения. При увеличении  $M$  среднее значение ускорения остается прежним, а размах распределения убывает пропорционально  $1/\sqrt{M}$ .

**Метрологический анализ процедуры измерения параллельной производительности.** Параллельные алгоритмы со случайным накоплением при значительных  $M$  можно рассматривать как детерминированные. На практике эта величина ограничивается допустимой точностью определения параллельного ускорения по данным измерений. Это связано с тем, что даже для детерминированных алгоритмов на точность измерения времени работы влияет ряд дополнительных факторов (источников стохастизации) [17]:

- недетерминированность работы библиотечных процедур, используемых в процессе работы программного средства;
- оптимизации, вносимые компилятором (которые в некоторых случаях могут оказывать косвенное влияние при работе с методами операционной системы);
- шум, вносимый работой операционной системы в управление распределением вычислительных ресурсов между процессами;
- аппаратный шум вычислительной системы.

В качестве примера в таблице приведены экспериментальные оценки характеристик относительной ошибки времени работы и ускорения для детерминированной (100 испытаний при одной и той же реализации случайной последовательности) реализации алгоритма случайного поиска, в зависимости от приоритета рабочих потоков в операционной системе. Видно, что даже при низком приоритете случайная ошибка определения ускорения составляет не более 2 %.

**Относительная ошибка времени выполнения и параллельного ускорения в зависимости от приоритета рабочих потоков в операционной системе (двухъядерный процессор)**

Параметр	Ошибка, %			
	Низкий приоритет	Нормальный приоритет	Высокий приоритет	Приоритет реального времени
$T_1$	0,6	0,3	0,05	0,07
$T_2$	1,5	1,0	0,26	0,32
$S$	1,6	0,9	0,27	0,35

Значение приоритета реального времени является максимально допустимым. При этом процесс превалирует над остальными процессами операционной системы, включая ряд системных.

Если коэффициент вариации параллельного ускорения в рамках описанного выше подхода сопоставим со случайной ошибкой измерений, алгоритм допустимо рассматривать как детерминированный. Для алгоритма без барьера эта характеристика может быть получена приближенно (без интегрирования (3)) с использованием метода статистической линеаризации. Коэффициент вариации параллельного ускорения (как относительная ошибка) имеет вид



$$\delta_S = \left[ \frac{1}{T_1/T_2 + 1} - \frac{1}{T_1 p/T_2 + 1} \right] \delta_n, \quad (12)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  — время работы последовательного и параллельного кода в программе соответственно, а  $\delta_n = \sigma_n / m_n$  — коэффициент вариации числа итераций. Выражение в квадратных скобках можно рассматривать как безразмерный коэффициент перехода между средней квадратической относительной ошибкой измерения ускорения и коэффициентом вариации числа итераций.

На рис. 4 приведен график этого коэффициента (в процентах).

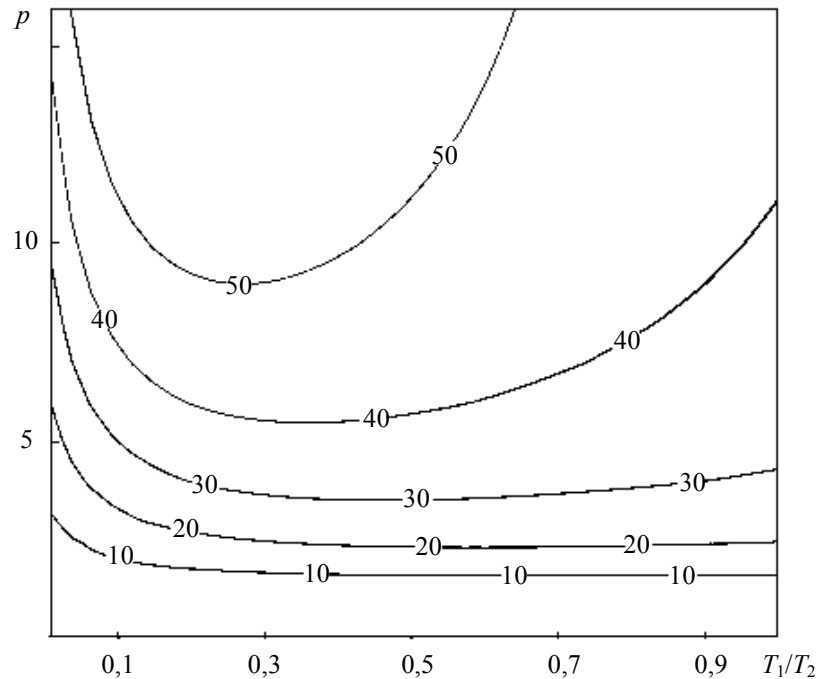


Рис. 4

Эта диаграмма может быть использована для экспресс-оценки изменчивости значений параллельного ускорения и для оценивания целесообразности описания производительности стохастической моделью вида (1)—(4) или (5)—(10). Так, например, при коэффициенте вариации числа итераций, равном  $\delta_n = 0,25$ , числе исполнителей  $p = 7$  и отношении последовательного кода к параллельному  $T_1/T_2 = 0,17$  коэффициент вариации параллельного ускорения составляет  $\delta_S \approx 0,1$ , что примерно соответствует изолинии графика для 40 %.

**Выводы.** Время выполнения параллельных стохастических алгоритмов, их параллельное ускорение и эффективность являются случайными величинами. Их распределения могут быть выражены через распределения случайных параметров самого алгоритма в рамках модели детерминированной функции случайного аргумента. При этом класс и параметры распределений параллельного ускорения существенно отличаются для параллельного ускорения и времени работы, а также зависят от доли параллельного кода в программе и количества вычислителей. Целесообразность применения вероятностного подхода к описанию параллельного ускорения определяется мерой аппаратного и программного шума вычислительной системы, влияющего на точность определения временных характеристик.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Intel SPB/Don/118/2006 „Естественные технологии распараллеливания алгоритмов высокопроизводительной обработки данных для многопроцессорных вычислительных комплексов на основе многоядерных микропроцессоров“.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kenneth Tan C. J.* On Parallel Pseudo-Random Number Generation // Int. Conf. on Computational Science. 2001. N 1. P. 589—596.
2. *Ортега Дж.* Введение в параллельные и векторные методы решения линейных систем. М.: Мир, 1991. 367 с.
3. *Foster J.* Designing and Building Parallel Programs. Adison-Wesley, 1995. 430 p.
4. *Gerbessiotis A. V.* Architecture independent parallel algorithm design: theory vs practice // Future Generation Computer Systems. 2002. N 18. P. 573—593.
5. *Uresin A., Dubois M.* Effect of asynchronism in the convergence rate of iterative algorithms // J. Parallel and Distributed Computing. 1996. N 34. P. 66—81.
6. *Casanova H.* Stochastic models for performance analysis of iterative algorithms in distributed environment. Ph.D. Thesis Univ. Tennessee, Knoxville, 1998. 200 p.
7. *Ларченко А. В., Дунаев А. В., Бухановский А. В.* Анализ и моделирование производительности параллельных стохастических алгоритмов, адаптированных к особенностям многоядерных вычислительных архитектур // Научный сервис в сети Интернет: многоядерный компьютерный мир. 15 лет РФФИ: Тр. Всерос. науч. конф. (24—29 сентября 2007, Новороссийск). М.: Изд-во МГУ, 2007. С. 156.
8. *Бурова И. Г., Демьянович Ю. К.* Лекции по параллельным вычислениям. СПб, 2003.
9. *Карпенко А. П., Федорук В. Г., Федорук Е. В.* Балансировка загрузки многопроцессорной вычислительной системы при распараллеливании одного класса вычислительных задач // Научный сервис в сети Интернет: многоядерный компьютерный мир. 15 лет РФФИ: Тр. Всерос. науч. конф. (24—29 сентября 2007, Новороссийск). М.: Изд-во МГУ, 2007. С. 48—52.
10. *Birattari M., Dorigo M.* How to assess and report the performance of a stochastic algorithm on a benchmark problem: mean or best result on a number of runs? // Optimization Letters. 2007. Vol. 1, N 3. P. 309—311.
11. *Fathi B., Liu B., Alexandrov V.* Mixed Monte Carlo Parallel Algorithms for Matrix Computation // ICCS 2002, LNCS 2330. Berlin—Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. P. 609—618.
12. *Лившиц Н. А., Пугачев В. Н.* Вероятностный анализ систем автоматического управления. Т.1. М.: Сов. радио, 1963. 896 с.
13. *Fortune S., Willie J.* Parallelism in Random Access Machines // Proc. 10th Annual Symp. on Theory of Computing. 1978. P. 114—118.
14. *Расстригин Л. А.* Адаптация сложных систем. Рига: Зинатне, 1981. 375 с.
15. *Boukhanovsky A. V., Lopatoukhin L. J., Guedes Soares C.* Spectral wave climate of the North Sea // Applied Ocean Research. 2007. Vol. 29, N 3. P. 146—154.
16. *Лидбеттер М., Линдгрэн Г., Ротсен Х.* Экстремумы случайных последовательностей и рядов. М.: Мир, 1989. 392 с.
17. *Касперски К.* Техника оптимизации программ. Эффективное использование памяти. СПб: БХВ-Петербург, 2003. 464 с.

**Сведения об авторах****Сергей Валерьевич Ковальчук**

— Научно-исследовательский институт наукоемких компьютерных технологий Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики;  
E-mail: iterater@mail.ru

**Александр Валерьевич Бухановский**

— Научно-исследовательский институт наукоемких компьютерных технологий Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики;  
E-mail: avb\_mail@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
информационных систем

Поступила в редакцию  
26.02.08 г.

В. П. ЗАБОЛОТСКИЙ, Р. М. ЮСУПОВ, А. А. ДЕМИДОВ

## ОЦЕНИВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СКАНИРУЮЩЕГО РОБОТА ДЛЯ ПОИСКА ИНФОРМАЦИИ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЯХ

Рассмотрен метод использования индексов для оценивания эффективности применения сканирующего робота при поиске и сборе требуемой информации в информационных сетях. Индексный метод позволяет относительно просто оценить и сравнить между собой эффективность различных способов использования сетевого сканирующего робота, не требует для проведения расчетов большого количества исходных данных, а результаты расчетов относительно легко интерпретируются.

**Ключевые слова:** обеспечение информационной безопасности, защита информации, эффективность, показатели и критерии эффективности, индексы.

Развитие информационных сетей и накопление информационных ресурсов, доступ к которым может быть обеспечен с помощью этих сетей, привели к созданию различных систем поиска и сбора информации. Весьма перспективным способом повышения эффективности поиска и сбора информации в информационных сетях в соответствии с запросом лиц, проявляющих интерес к определенному виду информации, является создание и применение сетевых сканирующих роботов (ССР).

Для оценки эффективности применения ССР в информационных сетях можно использовать обобщенный (сводный) показатель, или индекс [1—3].

*Индекс* — это показатель, характеризующий уровень или соотношение уровней какого-либо явления, в том числе в тех случаях, когда составляющие уровней явления или его элементов непосредственно несопоставимы.

Все индексы будем измерять по  $Q$ -балльной шкале, в которой:  $Q_{\min}$  — наименьшее, а  $Q_{\max}$  — наибольшее значение данной шкалы.

Введем следующие обозначения.

1.  $M$  — количество испытываемых способов использования ССР, подлежащих оцениванию на эффективность.

2.  $N_m$  — количество информационных массивов, подлежащих сканированию  $m$ -м способом,  $m = 1(1)M$ .

3.  $R_{mn}$  — количество тематических разделов в  $n$ -м информационном массиве, подлежащих сканированию  $m$ -м способом,  $m = 1(1)M$ ,  $n = 1(1)N_m$ .

4.  $S_{mnr}$  — количество информационных документов в  $r$ -м тематическом разделе  $n$ -го информационного массива, сканируемого  $m$ -м способом,  $m = 1(1)M$ ,  $n = 1(1)N_m$ ,  $r = 1(1)R_{mn}$ .

5.  $x_{mnr s}$  — индикаторная функция, задающая набор  $s$ -х информационных документов  $r$ -го тематического раздела  $n$ -го информационного массива, сканируемого  $m$ -м способом, где

$$x_{mnr s} = \begin{cases} 1 & \text{— если конкретный } s\text{-й информационный документ } r\text{-го} \\ & \text{тематического раздела } n\text{-го информационного массива} \\ & \text{обнаружен } m\text{-м способом поиска,} \\ 0 & \text{— в противном случае,} \end{cases}$$

$$m=1(1)M, n=1(1)N_m, r=1(1)R_{mn}, s=1(1)S_{mnr}.$$

б.  $v_{mnr}$  — индекс ценности (важности) для лица, в интересах которого осуществляется поиск и сбор информации, сканирования  $s$ -го информационного документа  $r$ -го тематического раздела  $n$ -го информационного массива  $m$ -м способом,  $m=1(1)M$ ,  $n=1(1)N_m$ ,  $r=R_{mn}$ ,  $s=1(1)S_{mnr}$ .

Система индексов, применяемых для оценивания испытываемых способов использования ССР, включает три группы индексов: эффективности, результативности и ресурсоемкости.

Индекс результативности  $k_{mnr}$  сканирования  $s$ -го информационного документа  $r$ -го тематического раздела  $n$ -го информационного массива  $m$ -м испытываемым способом использования ССР для поиска и сбора информации вычисляем по формуле

$$k_{mnr} = v_{mnr} x_{mnr}.$$

Основным ресурсом, затрачиваемым на операцию поиска и сбора информации, будем считать время. Поэтому индекс ресурсоемкости  $c_{mnr}$  сканирования можно определить как

$$c_{mnr} = \Delta t_{mnr},$$

где  $\Delta t_{mnr}$  — время, затрачиваемое на поиск и обработку  $s$ -го информационного документа.

Индекс эффективности  $h_{mnr}$  сканирования  $s$ -го информационного документа  $r$ -го тематического раздела  $n$ -го информационного массива  $m$ -м испытываемым способом использования ССР для поиска и сбора информации вычисляется по формуле

$$h_{mnr} = \frac{k_{mnr}}{c_{mnr}} = \frac{v_{mnr} x_{mnr}}{\Delta t_{mnr}}.$$

Индекс результативности  $k_{mnr}$  определим следующим образом:

$$k_{mnr} = \sum_{s=1}^{S_{mnr}} k_{mnr} = \sum_{s=1}^{S_{mnr}} v_{mnr} x_{mnr}.$$

Индекс эффективности  $h_{mnr}$  сканирования:

$$h_{mnr} = \frac{k_{mnr}}{\Delta t_{mnr}} = \frac{\sum_{s=1}^{S_{mnr}} v_{mnr} x_{mnr}}{\Delta t_{mnr}},$$

где  $\Delta t_{mnr}$  — время, затрачиваемое на поиск и обработку информационных документов  $r$ -го тематического раздела  $n$ -го информационного массива  $m$ -м испытываемым способом использования ССР.

Индекс результативности  $k_{mn}$  сканирования

$$k_{mn} = \sum_{r=1}^{R_{mn}} k_{mnr} = \sum_{r=1}^{R_{mn}} \sum_{s=1}^{S_{mnr}} k_{mnr} = \sum_{r=1}^{R_{mn}} \sum_{s=1}^{S_{mnr}} v_{mnr} x_{mnr}.$$

Индекс эффективности  $h_{mn}$  вычисляется по формуле

$$h_{mn} = \frac{k_{mn}}{\Delta t_{mn}} = \frac{\sum_{r=1}^{R_{mn}} \sum_{s=1}^{S_{mnr}} k_{mnr}}{\Delta t_{mn}} = \frac{\sum_{r=1}^{R_{mn}} \sum_{s=1}^{S_{mnr}} v_{mnr} x_{mnr}}{\Delta t_{mn}},$$

где  $\Delta t_{mn}$  — время, затрачиваемое на поиск и обработку информационных документов  $n$ -го информационного массива  $m$ -м испытываемым способом использования сетевого сканирующего робота.

Индекс результативности  $k_m$  сканирования информационных массивов  $m$ -м испытываемым способом использования сетевого сканирующего робота для поиска и сбора информации вычисляется по формуле

$$k_m = \sum_{n=1}^{N_m} k_{mn} = \sum_{n=1}^{N_m} \sum_{r=1}^{R_{mn}} k_{mnr} = \sum_{n=1}^{N_m} \sum_{r=1}^{R_{mn}} \sum_{s=1}^{S_{mnr}} v_{mnr s} x_{mnr s}.$$

Индекс эффективности  $h_m$  определим следующим образом:

$$h_m = \frac{k_m}{\Delta t_m} = \frac{\sum_{n=1}^{N_m} k_{mn}}{\Delta t_m} = \frac{\sum_{n=1}^{N_m} \sum_{r=1}^{R_{mn}} k_{mnr}}{\Delta t_m} = \frac{\sum_{n=1}^{N_m} \sum_{r=1}^{R_{mn}} \sum_{s=1}^{S_{mnr}} v_{mnr s} x_{mnr s}}{\Delta t_m},$$

где  $\Delta t_m$  — время.

Точность определения индексов эффективности использования ССР для поиска и сбора требуемой информации по результатам испытаний можно оценить следующим образом. Пусть был испытан  $m$ -й способ использования сетевого сканирующего робота для поиска и сбора требуемой информации,  $m \in [1(1)M]$ . При этом количество испытаний этого способа равно  $L_m$ .

В качестве оценки  $\tilde{h}_m = \bar{h}_m^* = \tilde{M}[\hat{h}_m]$  математического ожидания  $M[\hat{h}_m]$  индекса эффективности  $h_m$   $m$ -го способа, полученного по результатам испытаний, выберем статистическое среднее, которое вычисляется по формуле [4]

$$\tilde{h}_m = \bar{h}_m^* = \tilde{M}[\hat{h}_m] = \frac{1}{L_m} \sum_{l=1}^{L_m} h_{ml}. \quad (1)$$

где  $h_{ml}$  — значение индекса эффективности  $h_m$   $m$ -го способа использования сетевого сканирующего робота для поиска и сбора требуемой информации, вычисленное по результатам  $l$ -го испытания,  $l=1(1)L_m$ ,  $m=1(1)M$ .

Точность оценивания индекса эффективности  $h_m$ , полученного по результатам испытаний, определим по величине дисперсии  $D[\hat{h}_m]$  и среднего квадратического отклонения (СКО)  $\sigma[\hat{h}_m]$  индекса эффективности  $\hat{h}_m$  [5]

$$\tilde{D}[\hat{h}_m] = \frac{1}{L_m - 1} \sum_{l=1}^{L_m} (h_{ml} - \bar{h}_m^*)^2, \quad (2)$$

$$\tilde{\sigma}[\hat{h}_m] = E_{L_m-1} \sqrt{\tilde{D}[\hat{h}_m]} = E_{L_m-1} \sqrt{\frac{1}{L_m - 1} \sum_{l=1}^{L_m} (h_{ml} - \bar{h}_m^*)^2}, \quad (3)$$

$$E_{L_m-1} = \sqrt{\frac{L_m - 1}{2}} \frac{\Gamma\left(\frac{L_m - 1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{L_m}{2}\right)},$$

где  $\tilde{D}[\hat{h}_m]$  — состоятельная, несмещенная и асимптотически эффективная оценка дисперсии  $D[\hat{h}_m]$  индекса эффективности  $\hat{h}_m$   $m$ -го способа использования ССР для поиска и сбора требуемой информации, полученного по результатам испытаний этого способа;  $\tilde{\sigma}[\hat{h}_m]$  — состоятельная, несмещенная и асимптотически эффективная оценка СКО индекса эффективности  $\hat{h}_m$ ;  $\Gamma(x)$  — гамма-функция;  $E_{L_m-1}$  — поправочный коэффициент, обеспечивающий

несмещенность СКО  $\hat{h}_m$ ;  $h_{ml}$  — значение индекса эффективности  $h_m$ , вычисленное по результатам  $l$ -го испытания.

Так как значения индексов эффективности использования ССР для поиска и сбора требуемой информации, вычисленные по результатам испытаний, являются случайными величинами, то наиболее полно эффективность использования сетевого сканирующего робота с данной целью может быть оценена с помощью соответствующих законов распределения.

Пусть все значения случайной величины  $\hat{q}$  расположены в интервале  $[q_{\min}, q_{\max}]$ , а само распределение можно считать унимодальным. Тогда для  $\hat{q}$  в качестве аппроксимирующего закона может быть выбрано бета-распределение. Выражения для плотности распределения  $\varphi(\hat{q}; q)$  и параметров  $\alpha$  и  $\gamma$  этого закона в этом случае имеют вид

$$\varphi(\hat{q}; q) = \begin{cases} C(q - q_{\min})^\alpha (q_{\max} - q)^\gamma, & q \in (q_{\min}, q_{\max}), \\ 0, & q \notin (q_{\min}, q_{\max}), \end{cases} \quad (4)$$

где  $C = [(q_{\max} - q_{\min})^{\alpha+\gamma+1} B(\alpha+1, \gamma+1)]^{-1}$ ,

$$\alpha = \frac{(\bar{q} - q_{\min})\gamma - (q_{\max} + q_{\min}) + 2\bar{q}}{q_{\max} - \bar{q}},$$

$$\gamma = \frac{q_{\max} - \bar{q}}{q_{\max} - q_{\min}} \left[ \frac{(q_{\max} + q_{\min})\bar{q} - q_{\min}q_{\max} - \bar{q}^2}{D[\hat{q}]} + \frac{q_{\max} + q_{\min} - 2\bar{q}}{q_{\max} - \bar{q}} - 3 \right],$$

$\bar{q}$  — математическое ожидание случайной величины  $\hat{q}$ , дисперсия ее  $D[\hat{q}]$ ,  $B(\alpha+1, \gamma+1)$  — бета-функция.

Подставив в (4) значения математических ожиданий и дисперсий, вычисленные с помощью приведенных выше выражений (1), (2), а также значения наибольшей  $h_{\max}$  и наименьшей оценок  $h_{\min}$ , получим формулы для соответствующих законов распределения.

Мода случайных величин, распределенных по этим законам, определяется выражением

$$\text{Mo}[\hat{q}] = \frac{\alpha q_{\max} + \gamma q_{\min}}{\alpha + \gamma}. \quad (5)$$

Следует отметить, что мода может быть также использована в качестве оценки индекса эффективности  $h_m$   $m$ -го способа использования ССР. Для ее вычисления достаточно применить выражение (5) к соответствующим результатам испытаний.

Рассмотренный индексный метод оценивания эффективности использования сетевого сканирующего робота для поиска и сбора требуемой информации позволяет относительно просто с помощью абсолютных и относительных индексов оценить и сравнить эффективность различных способов использования сетевого сканирующего робота, не требует для проведения расчетов большого количества исходных данных, а результаты расчетов относительно легко интерпретируются.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Общая теория статистики / Ф. Г. Долгушевский, В. С. Козлов, П. И. Полушин, Я. М. Эрлих. Изд. 2-е. М.: Статистика, 1967. С. 329—331.
2. Козлов Т. И., Овсиенко В. Е., Смирнский В. И. Курс общей теории статистики. Изд. 2-е. М.: Статистика, 1965. С. 262.
3. Статистика / Под ред. С. Г. Струмилина. Изд. 2-е. М.: Статистика, 1969. С. 207.

4. Статистические методы обработки результатов наблюдений / Под ред. Р. М. Юсупова. Л.: Изд-во МО СССР, 1984. 563 с.
5. Юсупов Р. М., Заболотский В. П. Научно-методологические основы информатизации. СПб: Наука, 2000. 455 с.

*Сведения об авторах*

- Вадим Петрович Заболотский** — Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН;  
E-mail: lai@iias.spb.su
- Рафаэль Мидхатович Юсупов** — Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН;  
E-mail: spiiiran@iias.spb.su
- Александр Алексеевич Демидов** — Комитет по работе с исполнительными органами государственной власти и взаимодействию с органами местного самоуправления Администрации губернатора Санкт-Петербурга

Рекомендована институтом

Поступила в редакцию  
16.11.07 г.

УДК 621.322

А. В. СУХАНОВ, А. И. КРЫЛОВ

## АДАПТИВНАЯ ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Для построения перспективных информационных систем (ИС), прежде всего глобальных компьютерных, ориентированных на использование в институтах государственной власти, финансовых структурах, предприятиях военно-промышленного комплекса, необходимы эволюционирующие адаптивные средства мониторинга безопасности в составе ИС. Рассматриваются архитектурные решения средств интеллектуальной защиты ИС и основы методологии мониторинга безопасности ИС, ориентированные на принцип биосистемной аналогии.

**Ключевые слова:** биосистемная аналогия, мониторинг безопасности, адаптивные средства, средства интеллектуальной защиты.

Актуальность принципа биосистемной аналогии в современных информационных технологиях (ИТ) обусловлена высокой защищенностью жизненно важных информационных процессов в биосистемах, следовательно необходимо анализировать механизмы защиты биосистем и разрабатывать основы методологии мониторинга информационных систем (ИС) на основе биосистемной аналогии.

В качестве информационной среды существующие ИС, как правило, используют глобальные телекоммуникационные сети (например, Интернет), объединяющие информационные сети локального и корпоративного уровня [1, Олифер В. Г., Олифер Н. А. Основы сетей передачи данных. Интернет-университет информационных технологий. ИНТУИТ.ру, 2003. 248 с. <www.INTUIT.ru>]. Аналогия в архитектуре ИС наиболее полно проявляется в наличии иерархической организации уровней глобальных информационных сред.

Биосистемная аналогия в структуре защиты ИС базируется на иерархии средств обеспечения информационной безопасности (ИБ), встроенных механизмах иммунной защиты с накоплением опыта.

Известные средства защиты, как правило, ограничиваются реализацией функций нижнего уровня системы информационной безопасности (СИБ) и антивирусной направленностью средств иммунной защиты. Согласно [3], около 70 % вирусных атак осуществляется извне через точку входа в защищаемую сеть и только около 30 % — изнутри. Первые можно отнести к внешним угрозам жизнеобеспечению системы, вторые — к внутренним. В обоих случаях задействуется иерархия механизмов иммунной защиты:

- уровень почтовых шлюзов и межсетевых экранов,
- серверный уровень (файл-серверы, серверы групповой работы и пр.),
- уровень рабочих станций.

Реализация идеи иммунной защиты [2] связана со следующим процессом: обнаружение в ИС признаков заражения, отправление образца нового вируса в антивирусный центр, получение обновленной антивирусной базы.

Идея иммунной защиты входит в противоречие с принципом биосистемной аналогии, в частности, с *внутрисистемной* реализацией иммунной защиты, так как в рассмотренной системе антивирусной защиты (в отличие от биосистемы) большая часть механизмов иммунной защиты находится в антивирусном центре, расположенном за пределами корпоративной сети.

Размещение антивирусного центра *вне* защищаемой ИС позволяет злоумышленникам: 1) под видом обновления антивирусной базы сформировать канал для загрузки вирусов и „троянских коней“, 2) в случае отправки на анализ потенциально инфицированных файлов получить доступ к конфиденциальной информации.

Время реакции подобной иммунной защиты измеряется часами [2], что неприемлемо для большинства критических приложений ИС и ограничивает сферу применения подхода только задачами восстановления корпоративной сети (аналог — процесс реанимации).

В биосистемах функции иммунной защиты реализуются через:

- *внутренние механизмы оперативной реакции* на угрозы и дестабилизирующие воздействия, распределенные по уровням иерархии средств защиты,
- *долговременные процессы* накопления жизненного опыта, носящие эволюционный характер [3, 4].

Биосистемная аналогия в *эволюционных процессах* основана на реализации в ИС совокупности механизмов наследования, развития, адаптации и отбора, свойственных биосистемам, в то время как при построении перспективных средств защиты основное внимание уделяется лишь свойству адаптивности разрабатываемых интеллектуальных средств выявления атак и несанкционированных информационных процессов в корпоративной сети [5—7].

Средства защиты уровня почтовых шлюзов и межсетевых экранов в большей мере ориентированы на выявление внешних атак, а средства защиты серверного уровня — на нейтрализацию внутренних угроз в корпоративной системе. Известные интеллектуальные средства защиты, как правило, реализуют только механизмы *оперативной реакции* и нейтрализации угроз, практически не уделяя внимания координирующей роли, которую играет нервная система — верхний уровень иерархии защиты биологических систем в реализации эволюционного процесса накопления жизненного опыта системы (долговременного запоминания системной информации). В биосистемах имеют место процессы постепенной адаптации иерархической системы жизнеобеспечения и защиты с использованием всего арсенала средств эволюционных процессов.

В ИС помимо иммунного уровня средств защиты необходимо наличие *иерархии уровней защиты*, и прежде всего — верхних (например, рецепторного уровня защиты), выполняющих функции нервной системы организма по накоплению жизненного опыта, координации и установлению ассоциативных (долговременных) связей между процессами, происходящими на нижних уровнях средств защиты, — атаками и изменением множества угроз. Таким образом, необходим иерархический уровень накопления жизненного опыта по нейтрализации атак, представленного в форме структурированных информационных полей, удобных для наследования в последующих реализациях системы.

Биосистемная аналогия в представлении информации в форме структурированного информационного поля нейронной сети (НС) позволяет решить комплекс задач повышения информационной безопасности ИС за счет распределенного избыточного представления знаний, избыточного пространственного представления информационных процессов, функцио-



нально устойчивой параллельной обработки данных при распределенной реализации программируемых информационных процессов.

Биосистемная аналогия в программировании ИС реализуется путем формирования и коррекции распределенных избыточных информационных полей ИС, относящихся к иерархической системе средств защиты. Структурированная программа, подобно потоковым машинам [8] описывающая топологию взаимосвязанных компонентов, обеспечивает:

— универсальный характер описания взаимосвязи множества известных угроз и используемых механизмов защиты (МЗ) в виде системы предикатных правил и информационных полей ИС;

— автоматическую коррекцию информационных полей ИС в процессе адаптации ИС к изменению множества угроз или условий эксплуатации;

— наследование опыта по нейтрализации угроз путем переноса структурированных информационных полей ИС в последующие модификации ИС.

**Мониторинг безопасности ИС.** Метод проектирования адаптивных средств защиты ИС базируется на основных свойствах ИС и нечетких систем, связанных с адаптивностью, возможностью представления опыта специалистов ИБ в виде системы нечетких правил.

Возможность обучения рассматривается как одно из наиболее важных качеств нейросетевых систем, которое позволяет адаптироваться к изменению входной информации. Обучающими факторами являются избыточность информации и скрытые закономерности, которые видоизменяют информационное поле ИС в процессе адаптации. ИС, уменьшая степень избыточности входной информации, позволяет выделять в данных существенные признаки, а соревновательные методы обучения — классифицировать поступающую информацию с помощью *механизма кластеризации*: подобные векторы входных данных группируются нейронной сетью в отдельный кластер и представляются конкретным формальным нейроном. ИС, осуществляя кластеризацию данных, находит такие усредненные по кластеру значения функциональных параметров, которые минимизируют ошибку представления сгруппированных в кластер данных.

Согласно подходу проектирования адаптивных средств защиты, необходимо:

— формирование матриц *адаптируемых* экспертных оценок и на их основе — создание исходных *систем нечетких правил* и *классификаторов* (на нижних уровнях защиты — классификаторов „признаки атаки—угрозы“, на верхних уровнях защиты — классификаторов „угрозы—МЗ“);

— *идентификация* выявленной угрозы и при расширении множества известных угроз — кластеризация угроз с последующей адаптацией информационных полей путем обучения ИС уровней защиты;

— кластеризация вследствие изменения множества угроз сопровождается *коррекцией*, или расширением системы нечетких правил;

— изменение множества угроз приводит к *коррекции систем нечетких правил* и матриц *экспертных оценок* в результате обучения иерархии классификаторов;

— при расширении системы нечетких правил формируется *описание* нового (отсутствующего) *механизма защиты*;

— „прозрачность“ системы нечетких правил позволяет сформулировать *спецификацию на создание* отсутствующего МЗ;

— на основании анализа комплекса оценок защищенности ИС (в случае экономической целесообразности) включается новый МЗ в состав средств защиты.

Таким образом, мониторинг безопасности ИС на базе адаптивной модели мониторинга безопасности ИС включает следующие этапы [9]:

1) формирование структурной модели систем ИБ в виде иерархии уровней механизмов защиты в соответствии с техническим заданием на проектирование средств мониторинга безопасности ИС;

2) решение задачи классификации угроз по вектору признаков атак и механизмов защиты по вектору угроз; соотнесение *посылок* (на нижних уровнях защиты — нечеткого вектора признаков атак, на верхних — нечеткого вектора угроз) с классификационными *заключениями* экспертов (на нижних уровнях — выявленными угрозами, на верхних — механизмами защиты, необходимыми для нейтрализации множества известных угроз);

3) формирование матриц *экспертных оценок* для определения степени соответствия угроз признакам атаки (на нижних уровнях защиты) и механизмов защиты полю угроз (на верхних);

4) представление в виде *систем нечетких правил* результатов, полученных в процессе нечеткого логического вывода классификационных заключений по нечетким посылкам (на нижних уровнях защиты — соотношения „признаки атаки—угрозы“, на верхних — „угрозы—МЗ“);

5) реализация систем нечетких правил в виде специализированных нейросетевых структур (на нижних уровнях защиты — классификаторов „признаки атаки—угрозы“, на верхних — „угрозы—МЗ“);

6) решение задачи *кластеризации* угроз по признакам атак и МЗ по вектору угроз как саморазвитие классификации при расширении множества угроз; разбиение входных векторов на группы (на нижних уровнях защиты — векторов признаков атак, на верхних — векторов угроз) и отнесение вновь поступающего входного вектора к одной из групп либо формирование новой группы (на нижних уровнях — группы угроз, на верхних — группы механизмов защиты, необходимых для нейтрализации множества известных угроз);

7) реализация результатов п. 2 в виде *четких классификаторов* на основе самообучающейся НС (на нижних уровнях защиты — классификаторов „признаки атаки—угрозы“, на верхних — „угрозы—МЗ“);

8) *наследование опыта* адаптивных средств защиты по обеспечению ИБ, приобретенного в процессе эксплуатации подобной ИС, в проектируемые средства защиты путем перенесения информационных полей четких и нейро-нечетких классификаторов (на нижних уровнях защиты — классификаторов „признаки атаки—угрозы“, на верхних — „угрозы—МЗ“);

9) *обучение классификаторов* на обучающей выборке — подмножестве входных векторов (на нижних уровнях защиты — векторов признаков атак, на верхних — векторов угроз) с целью формирования информационных полей четких и нейро-нечетких классификаторов;

10) *адаптация* в процессе эксплуатации ИС информационных полей четких и нейро-нечетких классификаторов (на нижних уровнях защиты — классификаторов „признаки атаки—угрозы“, на верхних — „угрозы—МЗ“);

11) *коррекция* адаптируемых матриц экспертных оценок (п. 3) и систем нечетких правил (п. 4) по результатам адаптации;

12) *формулирование новых нечетких правил* в случае расширения классификации (на нижних уровнях защиты — классификации „признаки атаки—угрозы“, на верхних уровнях — классификации „угрозы—МЗ“);

13) *формирование комплекса оценок защищенности* ИС исходя из результатов п. 10 и распределения механизмов защиты по иерархии средств защиты;

14) *анализ структуры связей* нейро-нечетких классификаторов, „прозрачной“ системы нечетких правил и комплекса оценок защищенности по п. 12 для выявления наиболее используемых или отсутствующих в ИС механизмов защиты;

15) *формирование спецификации* на разработку отсутствующих МЗ;

16) *коррекция структуры* системы информационной безопасности за счет расширения перечня используемых МЗ и их размещения в иерархии адаптивных средств защиты.

**Модель адаптивной защиты и этапы жизненного цикла ИС.** Целью этапов *проектирования* с учетом жизненного цикла ИС является формирование корректной (без несанкционированных возможностей) безопасной ИС. На начальном этапе жизненного цикла в соответствии с требованиями спецификации на проектирование ИС осуществляется формирование ИС и средств защиты с заданной совокупностью свойств.

Для реализации функций средств защиты, соответствующих системе нечетких предикатных правил (например, для классификации механизмов защиты), формируются адаптивные информационные поля адаптивных уровней защиты прикладной ИС. Производится предэксплуатационное обучение нейро-нечетких классификаторов и нейросетевых кластеризаторов с применением корректных алгоритмов, т. е. выполняется адаптация информационных полей ИС под задачи информационной защиты.

Процессы настройки (обучения) происходят в режиме адаптации системы при непосредственном участии и под контролем доверенных лиц, в частности, администратора ИС. Процесс настройки завершается блокировкой режима адаптации и переводом сформированной системы в режим работы.

Многоуровневая модель информационной безопасности системы на первом этапе соответствует минимальной активации потенциальных механизмов защиты и полноте информационного множества известных угроз.

Целью этапа *эксплуатации* жизненного цикла системы является корректное исполнение системой заданных функций. Предусмотрен режим адаптации функций системы защиты информации, который использует механизм адаптации для реагирования на изменение внешних факторов — происходят дальнейший рост, самообучение системы и изменение информационных полей средств защиты. Как и на предыдущем этапе, процессы коррекции функций средств защиты происходят в режиме адаптации системы при непосредственном участии администратора ИС. Процесс настройки завершается блокировкой режима адаптации и переводом системы в режим работы.

Многоуровневая модель адаптивной средств защиты на втором этапе динамически пополняется путем перевода механизмов защиты из статуса „потенциальный“ в статус „активированный“ и привязки активированного механизма к соответствующему эшелону модели средств защиты. Увеличивается число элементов в подмножестве заданных угроз как за счет включения элементов из множества известных угроз, так и за счет пополнения самого множества известных угроз ранее неизвестными угрозами. В последнем случае возможно расширение множества потенциальных механизмов защиты за счет описания в виде нечетких предикатных правил и последующей реализации ранее отсутствовавших МЗ.

Целью этапа *вывода системы из эксплуатации* является постепенное сворачивание прикладных функций системы при корректной работе средств защиты и сохранении основных системных функций.

Многоуровневой модели информационной безопасности ИС присущи наличие максимального количества механизмов защиты и полнота информационного поля известных угроз. Накопленный опыт средств защиты подлежит анализу и использованию (наследованию) в создаваемых прикладных системах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минаев В. А. Перспективы развития IT-security в России // Межотраслевой тематический каталог „Системы безопасности — 2003“. 2003. С. 218—221.
2. Касперски К. Атака на Windows NT // Журнал сетевых решений. „Обзор антивирусных средств от AIDSTEST до информационной иммунной системы“. 2000. № 12. С. 88—95.

3. Яковлев Н. Н. Жизнь и среда: Молекулярные и функциональные основы приспособления организма к условиям среды. Л.: Наука, 1986.
4. Мелик-Гайназян И. В. Информационные процессы и реальность. М.: Наука, 1998. 192 с.
5. Корнеев В. В., Маслович А. И. и др. Распознавание программных модулей и обнаружение несанкционированных действий с применением аппарата нейросетей // Информационные технологии. 1997. № 10.
6. Котенко И. В. Модели противоборства команд агентов по реализации и защите от распределенных атак „Отказ в обслуживании“ // Тр. междунар. конф. IEEE AIS'03 и CAD—2003. М.: Физматлит, 2003. Т. 1. С. 422—428.
7. Гриняев С. Н. Интеллектуальное противодействие информационному оружию. М.: СИНТЕГ, 1999.
8. Mayers G. J. Advances in computer architecture. 2nd ed. NY: John Willey & Sons, 1982.
9. Нестерук Г. Ф., Осовецкий Л. Г., Нестерук Ф. Г. О применении нейро-нечетких сетей в адаптивных системах информационной защиты // „Нейроинформатика — 2005“: Мат. VII Всерос. науч.-техн. конф. М.: МИФИ (ТУ), 2005. Ч. 1. С. 163—171.

#### Сведения об авторах

- Андрей Вячеславович Суханов** — ЗАО „ЭВРИКА“, Санкт-Петербург;  
E-mail: avsuhanov@eureca.ru
- Александр Изотович Крылов** — ЗАО „ЭВРИКА“, Санкт-Петербург;  
E-mail: a\_krylov@eureca.ru

Рекомендована кафедрой  
безопасных информационных технологий

Поступила в редакцию  
13.05.08 г.

УДК 004.932

А. Г. КОРОБЕЙНИКОВ, ХОАНГ ЗЯНГ, С. Н. КУЗНЕЦОВА,  
И. Б. ТРОНИКОВ, В. А. СЕМЕНОВ

### МЕТОД СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ ДОКУМЕНТОВ

Представлены существующие методы распознавания печатных документов, указаны их основные недостатки. Разработан метод многошкальной сегментации на базе динамической локальной карты связи изображения для получения иерархического дерева блоков документов, имеющих сложную структуру.

**Ключевые слова:** обработка изображений, печатный документ, сегментация изображения, анализ страницы.

Процесс преобразования документов, хранимых в традиционной форме (на бумажных носителях), в цифровой вид включает следующие этапы: распознавание, извлечение строк и символов, дискретизацию, бинаризацию, подавление шумов, блок-сегментацию.

Цель настоящей работы состоит в решении одной из задач, возникающих при обработке изображения для последующего распознавания, — сегментации изображения. В настоящее время большинство исследований в области распознавания текста ориентируется на поиск алгоритмов для распознавания элементов букв и диакритических знаков. Процесс сегментации исследован мало и поэтому методы сегментации, описанные в литературе [1—9], не в полной мере удовлетворяют потребностям разработчиков программного обеспечения распознавания текста.

Сегментация изображения (разделение текстовой и графической информации) — одна из важных составляющих оптического распознавания текста. Сегментация включает в себя геометрический и логический анализ обрабатываемого компьютером изображения страницы.

Геометрический анализ позволяет определить максимально однородные области и их виды (текст, таблица, графическое изображение). Задача логического анализа — выявление структуры страницы, типа каждого текстового блока (заголовки, сноски, колонки, основной текст) и определение соподчиненности и взаимного расположения этих блоков [1].

Методы сегментации и анализа страницы разделяются на три основные группы: нисходящие, восходящие и гибридные [2].

К нисходящим методам относятся неравномерное размазывание [4], проекции профиля [5], белые потоки [6], преобразование Фурье [7] и т.д. Сначала находится самый высокий уровень структур (обычно это колонки или графика). Затем колонки разбиваются на параграфы, параграфы — на строки и т.д. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнут самый низкий уровень — символы. Эти методы могут использоваться, если имеется информация о макете страницы.

К классу восходящих относятся методы анализа связанных компонентов [1], неравномерного сглаживания [4], наращивания областей [3] и нейронные сети [8]. Работа метода связанных компонентов начинается с поиска минимальных элементов (например, пиксела), которые затем комбинируются и образуют связанные компоненты. Дальше из этих компонентов создаются символы, слова, фразы, параграфы и колонки. На первый взгляд, этот подход более гибкий, но на практике он мало используется из-за накапливающихся на каждом этапе обработки ошибок.

Метод неравномерного сглаживания [4] достаточно популярен и часто используется в сочетании с другими методами. Изображение сканируется горизонтально и(или) вертикально, затем цвет небольших фоновых областей (пятен) заменяется на цвет изображения (текста). В результате получается эффект размытия, при котором объединяются (сливаются) символы и элементы документа. Эффект размытия используется и в других методах профильной проекции, группирования связанных компонентов, нейронных сетей и т.д. Главный недостаток метода — необходимость определения порогового значения контрастности изображения  $t$ . Если значение  $t$  мало, размытие может быть недостаточным для получения ожидаемого эффекта. На практике значение  $t$  обычно определяется эмпирическим путем или через приблизительную оценку расстояния между текстовыми блоками, строками или размера шрифта печатных символов.

Среди известных гибридных методов — метод „X—Y-дерево“, разработанный Наги [9]. Документ сегментируется на большие блоки путем горизонтального и вертикального разрезания. Затем для каждого блока этот процесс повторяется. Особенность метода состоит в том, что строение полученного дерева соответствует логической структуре документа. Основной недостаток — вынужденное допущение, что текстовые блоки имеют прямоугольную форму и хорошо разделяются полосами.

В настоящей работе предлагается разработанный авторами метод многошкальной сегментации страницы на базе понятия „Динамическая локальная карта связи“ (ДЛКС).

Динамическая локальная карта связи изображения является результатом трансформации изображения в матрицу, размер которой равен размеру изображения, следовательно, ДЛКС можно считать эквивалентной исходному изображению. ДЛКС строится следующим образом: если в исходном изображении пиксел черный (цвет текста), то элемент матрицы принимает значение „0“. В противном случае элементу матрицы присваивается значение, равное расстоянию между двумя соседними пикселями исходного изображения. В качестве расстояния можно выбрать минимальный или средний вертикальный или горизонтальный размер. Далее ДЛКС преобразуется в изображение (картинку) с множеством оттенков серого цвета путем нормализации полученной матрицы со значением элементов от 0 до 255. На рис. 1 представлен пример ДЛКС ( $a$  — исходное изображение,  $b$  — ДЛКС изображения серого оттенка,  $c$  — ДЛКС изображения после бинаризации).

Размер каждого ненулевого пиксела в ДЛКС соответствует размеру ближайшего локального зазора между двумя черными пикселами исходного изображения. Если выполнить бинаризацию ДЛКС с пороговым значением  $t$ , то все пиксеты меньше  $t$  принимают значение 0. Эти пиксеты, объединившись друг с другом, образуют блоки (текстовые или графические).

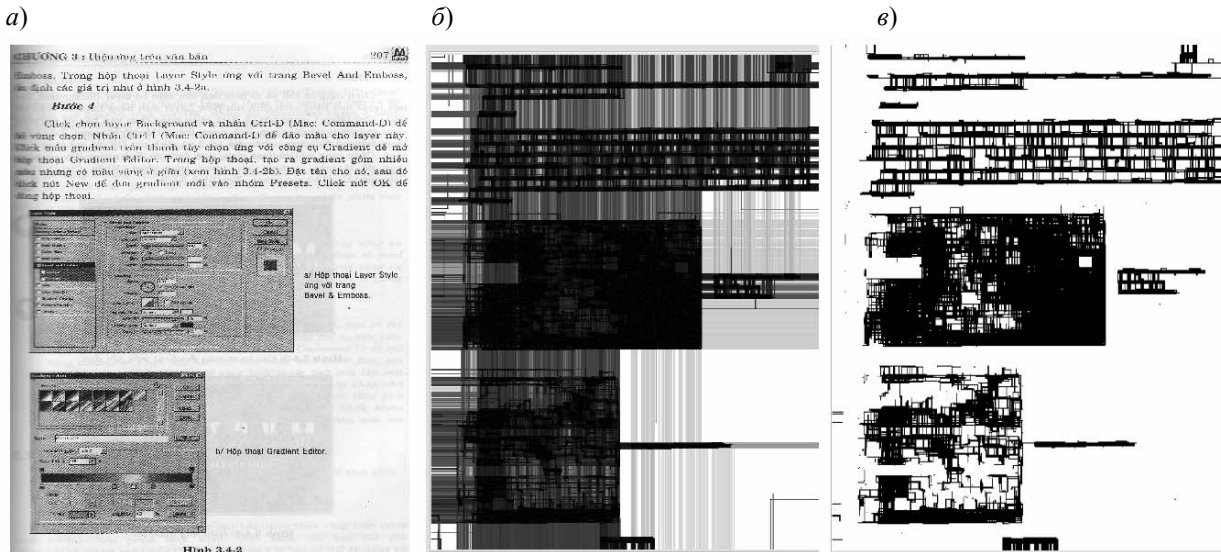


Рис. 1

Путем бинаризации исходное изображение разбивается на блоки. Чем меньше пороговое значение  $t$ , тем больше количество блоков.

Если  $t = 255$ , то все пиксеты ДЛКС будут черными и все изображение будет представлять собой один блок, определяемый как корневой. Далее производится бинаризация с пороговым значением меньше  $t < 255$ , в результате получаются дочерние блоки. Если процесс повторить для каждого блока, то получим последовательность разделения исходного документа на блоки (дерево). Корневой блок будет разбит на некоторые блоки нижнего уровня, каждый из получаемых блоков в свою очередь будет разбит на блоки более низкого уровня. Блоки одного уровня можно „привязать“ к относительной системе координат (можно использовать, например, координаты ограничивающих прямоугольников для определения упорядоченных положений).

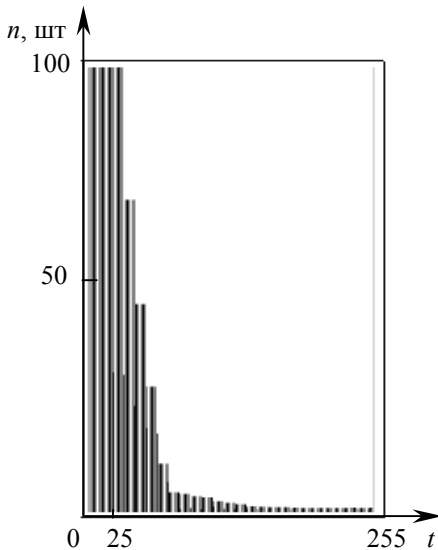


Рис. 2

Была разработана методика исследования порогового значения. С этой целью было отсканировано 15 печатных документов разного качества с различными типами изображения. Для каждого полученного изображения была построена диаграмма зависимости количества связанных компонентов (блоков) от порогового значения (рис. 2).

Оказалось, что количество блоков изменяется дискретно. Иначе говоря, в некоторой окрестности порогового значения  $t$  количество блоков изменяется незначительно или вообще не изменяется. В окрестности  $t = 0$  количество блоков всегда велико, но очень быстро уменьшается до некоторого уровня. Это свойство можно использовать для нахождения нижней границы порогового значения  $t$ .

Еще один интересный результат экспериментов — количество пиков всегда находится в окрестности 25, хотя документы, используемые в экспериментах, относятся к различным областям. Значения, находящиеся между пиковыми, могут быть пороговыми.

Блоки документа сегментируются в иерархическом порядке. Сначала необходимо выбрать совокупность пороговых значений (эксперименты показали, что 10 пороговых значений достаточно для сегментации всех документов). Минимальное значение  $t$  выбирается из условия резкого изменения количества блоков. Процесс повторяется для всех интервалов с соответствующими пиковыми значениями.

Путем бинаризации с помощью минимального порогового значения генерируются блоки высшего уровня. Далее для каждого блока выполняется бинаризация с использованием следующего порогового значения из совокупности. В результате этого процесса получается иерархическое дерево сегментации, пример которого приведен на рис. 3 (*a* — исходное изображение, *b* — результат сегментации и фильтрации).

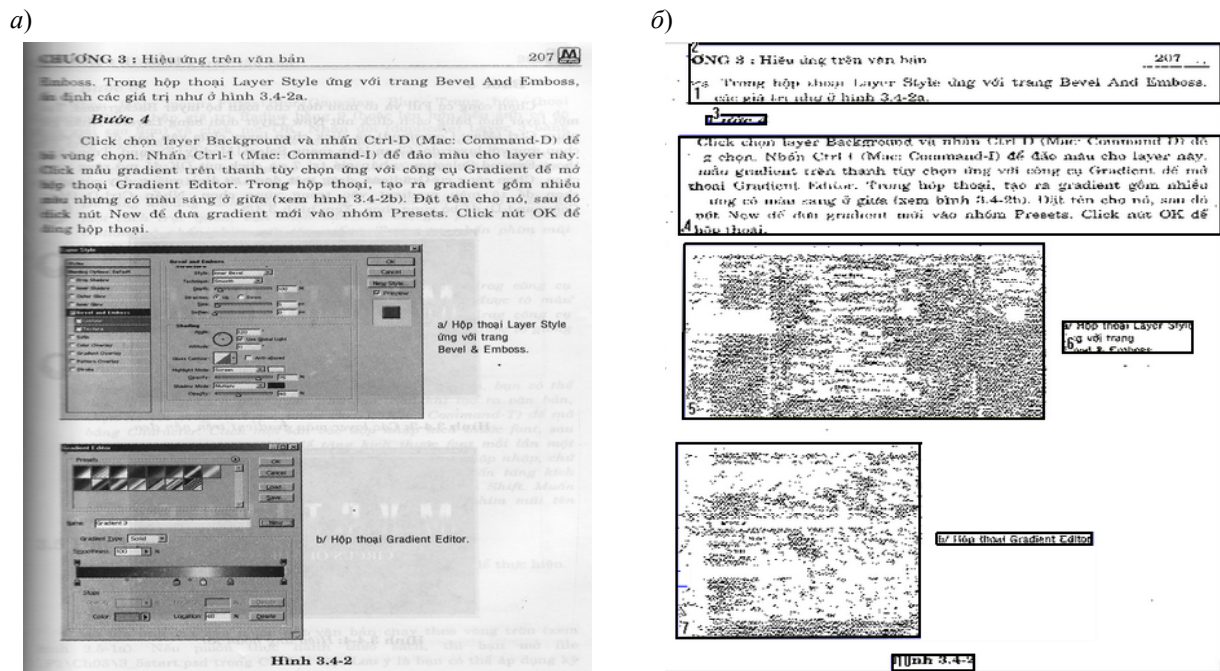


Рис. 3

Таким образом, использование матрицы ДЛКС позволяет решать задачу обработки изображения, преобразуемого в электронный вид.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта № 07-07-00310.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jain A., Yu B. Document representation and its application to page decomposition // On Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1998. N 3. С. 294—308.
2. Okun O., Doermann M. Page Segmentation and Zone Classification: The State of the Art. LAMP-TR-036 (Technical Report). University of Maryland, 1999. 22 p.
3. Jain A. Fundamentals of digital image processing. Prentice Hall, 1990. 421 p.
4. Wong K. Y., Casey R. G., Wahl F. M. Document analysis system // IBM Journal of Research and Development. 1982. Vol. 26, N 6. P. 647—656.
5. Wang D., Srihari S. Classification of newspaper image blocks using texture analysis // Computer Vision, Graphics, and Image Proc. 1989. Vol. 47. P. 327—352.
6. Pavlidis T. and Zhou J. Page segmentation by white streams // Proc. 1st Int. Conf. Document Analysis and Recognition (ICDAR). Int. Association Pattern Recognition. 1991. P. 945—953.

7. *Hose M. and Hoshino Y.* Segmentation method of document images by two-dimensional fourier transformation // System and Computers in Japan. 1985. Vol. 3. P. 16—20.
8. *Tan C. and Zhang Z.* Text block segmentation using pyramid structure // SPIE Document Recognition and Retrieval. San Jose, USA, 2001. Vol. 8. P. 297—306.
9. *Nagy S. G. Stoddard and S.* Document analysis with expert system // Proc. of Pattern Recognition. 1985. P. 31—33.

**Сведения об авторах**

- Анатолий Григорьевич Коробейников** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: Korobeunikov\_A\_G@mail.ru
- Светлана Николаевна Кузнецова** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем
- Хоанг Зянг** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем
- Игорь Борисович Троников** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем
- Вениамин Александрович Семенов** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: veny-semenov@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
проектирования компьютерных систем

Поступила в редакцию  
25.03.08 г.



---

---

# ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

---

---

УДК 681.511.4

С. В. ЛУЧКО, С. Ю. БАЛУЕВ, М. А. ВАТУТИН, В. А. РОГАЧЕВ

## ПЕРИОДИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ВТОРОГО РОДА

Исследованы периодические режимы в системах с широтно-импульсной модуляцией второго рода. Приведена математическая модель дискретной системы автоматического управления в виде системы разностных уравнений. Получены условия существования периодического режима. Рассмотрен пример для системы второго порядка и приведены результаты моделирования. Рассматривается применение периодического режима для вибрационного сглаживания нелинейностей, способствующее уменьшению погрешностей в автоматических системах.

*Ключевые слова:* периодические режимы, широтно-импульсная модуляция второго рода, дискретная система автоматического управления.

Широтно-импульсная модуляция второго рода (ШИМ-2) широко применяется на практике (в системах управления электрическими двигателями, системах стабилизации напряжения). Вместе с тем в ряде устройств и систем (акселерометрах, датчиках угловых скоростей) она часто используется и для организации высокочастотных периодических режимов с целью вибрационного сглаживания сопутствующих нелинейностей: зон нечувствительности, трения, люфтов и др.

Периодические режимы в системах с ШИМ-2 имеют много общего с режимами в системах с ШИМ-1, которые были рассмотрены в работе [1]. Их период колебаний  $T_0$  жестко связан с периодом дискретности  $T$ :  $T_0 = 2NT$ , где  $N$  — относительный полупериод ( $N = 1, 2, \dots$ ). Поэтому и все возможные значения частоты колебаний известны заранее:

$$\Omega = \frac{2\pi}{T_0} = \frac{\pi}{NT}. \quad (1)$$

Вместе с тем процессы в системах с ШИМ-2 имеют ряд принципиальных отличий.

Рассмотрим системы с обратной связью, структурно состоящие из линейной непрерывной части с передаточной функцией  $W(p)$  и широтно-импульсного модулятора. Модель непрерывной линейной части представим в виде уравнений состояния [2]

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{b}u, \quad y = \bar{c}^T\bar{x}, \quad (2)$$

где  $y = y(t)$  — сигнал на выходе линейной части,  $u = u(t)$  — сигнал на выходе модулятора,  $\bar{A}$  — матрица состояния,  $\bar{x}$ ,  $\bar{b}$ ,  $\bar{c}$  — векторы управляемой величины и управляющего воздей-

ствия. На вход модулятора, в отличие от систем с ШИМ-1, поступает аналоговый сигнал ошибки  $e(t) = g(t) - y(t)$ , где  $g(t)$  — задающее воздействие.

Сигнал  $u(t)$  на выходе модулятора

$$u(t) = \begin{cases} h \operatorname{sign} e(i) & \text{при } iT \leq t < (i + \gamma_i)T, \\ 0 & \text{при } (i + \gamma_i)T \leq t < (i + 1)T, \end{cases} \quad (3)$$

где  $e(i) = e(iT)$ ,  $h$  — амплитуда импульсов,  $I = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Сквозность импульсов  $e(i) = e(iT)$  определяется в результате сравнения аналогового сигнала  $e(t)$  с периодическим опорным  $u_{\text{оп}}(t)$ . Импульсы запускаются в моменты  $t = iT$  по командам от таймера и сбрасываются в моменты совпадения аналогового и опорного сигналов.

Математическую модель непрерывной части системы вместе с модулятором представим разностными уравнениями со смещенным аргументом [2]:

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}(i + \varepsilon) &= \bar{A}^*(\varepsilon)\bar{x}(i) + h\bar{b}^*(\varepsilon)\operatorname{sign} e(i), \\ y(i + \varepsilon) &= \bar{c}^T \bar{x}(i + \varepsilon), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где

$$\bar{A}^*(\varepsilon) = e^{\bar{A}\varepsilon T}, \quad (5)$$

$$\bar{b}^*(\varepsilon) = \begin{cases} \int_0^{\varepsilon T} e^{\bar{A}\sigma} \bar{b} d\sigma, & \text{если } 0 \leq \varepsilon \leq \gamma_i, \\ 0 \\ \int_{(\varepsilon - \gamma_i)T}^{\varepsilon T} e^{\bar{A}\sigma} \bar{b} d\sigma, & \text{если } \gamma_i \leq \varepsilon \leq 1, \end{cases} \quad (6)$$

$\varepsilon$ ,  $\sigma$  — параметры, которые можно изменять от 0 до 1. В этом случае на интервале  $iT \leq t \leq (i + 1)T$  в качестве  $e(t)$  можно рассматривать  $e(i + \varepsilon)$ :

$$e(i + \varepsilon) = g(i + \varepsilon) - y(i + \varepsilon) = g(i + \varepsilon) - \bar{c}^T \bar{x}(i + \varepsilon). \quad (7)$$

Опорный сигнал  $u_{\text{оп}}(t)$  обычно имеет пилообразную форму. На интервале  $iT \leq t \leq (i + 1)T$  его можно представить в виде  $u_{\text{оп}} = \beta\varepsilon$ , где  $\beta$  — постоянный коэффициент, определяющий крутизну сигнала  $u_{\text{оп}}(t)$ . Если  $\varepsilon = 1$ , то  $u_{\text{оп}} = \beta$ . Поскольку импульсы  $u(t)$  формируются в моменты  $t = iT$ , а значение  $e(i)$  в эти моменты может быть отрицательным, то в общем случае

$$u_{\text{оп}} = \beta\varepsilon \operatorname{sign} e(i). \quad (8)$$

Сквозность импульсов определяется в моменты совпадения основного и опорного сигналов, т.е. в моменты  $t = (i + \gamma_i)T$ . В уравнениях (7) и (8) им соответствует  $\varepsilon = \gamma_i$ . Приравняв правые части этих выражений, получим

$$g(i + \gamma_i) - \bar{c}^T \bar{x}(i + \gamma_i) = \beta\gamma_i \operatorname{sign} e(i). \quad (9)$$

Сквозность  $\gamma_i$  является решением уравнения (9). Если положительное решение отсутствует, то  $\gamma_i = 1$ . Уравнение (9), как правило, является нелинейным. Поэтому его решение можно найти лишь методом последовательных приближений, что усложняет исследование процессов в системах с ШИМ-2.

Практический интерес представляют высокочастотные периодические режимы с относительным полупериодом  $N=1$ . Они могут быть симметричными (рис. 1, а) и несимметричными (рис. 1, б).

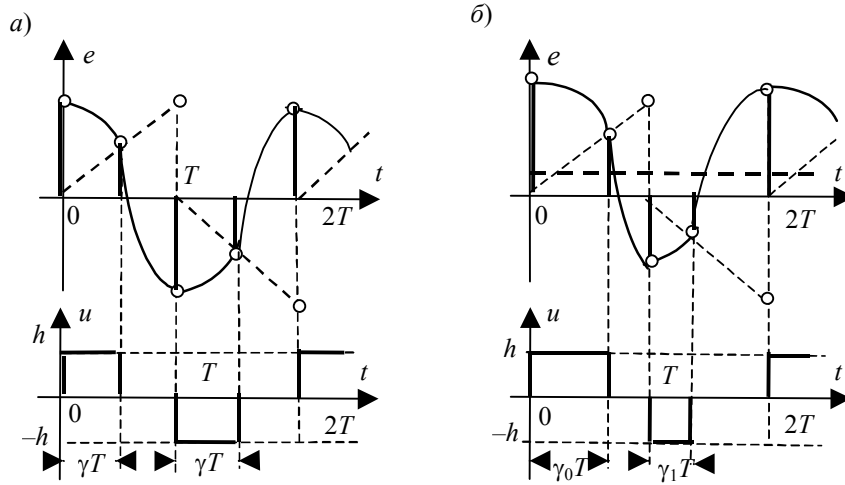


Рис. 1

Симметричные режимы в статических системах возникают, если задающее воздействие  $g(t) = 0$ . Поэтому установившиеся значения скважности импульсов одинаковы:  $\gamma_i = \gamma$ . При этом в отличие от ШИМ-1 всегда выполняется условие  $\gamma < 1$ . Ошибка системы  $e(t)$  в моменты времени  $t = iT$  последовательно принимает значения  $e_0 > 0$  и  $e_1 = -e_0$ . Матрицы  $\bar{A}^*(\varepsilon)$  и  $\bar{b}^*(\varepsilon)$  для моментов, когда  $\varepsilon = 1$ , согласно (5) и (6), определяются выражениями

$$\bar{A}_1^* = e^{\bar{A}T}, \quad \bar{b}_1^* = \int_{(1-\gamma)T}^T e^{\bar{A}\sigma} \bar{b} d\sigma. \tag{10}$$

Решив первое из уравнений (4), получим

$$\bar{x}(i) = (\bar{A}_1^*)^i \bar{x}(0) + h \sum_{v=0}^{i-1} (-1)^v (\bar{A}_1^*)^{i-1-v} \bar{b}_1^*. \tag{11}$$

Если корни полинома знаменателя передаточной функции  $W(p)$  имеют отрицательные вещественные значения, то первое слагаемое в правой части выражения (11) с течением времени стремится к нулю. В соответствии с работой [1] определим установившееся значение вектора состояния

$$\bar{x}_0 = -h(\bar{E} + \bar{A}_1^*)^{-1} \bar{b}_1^*, \tag{12}$$

ординату последовательности на выходе системы

$$y_0 = \bar{c}^T \bar{x}_0 = -h \bar{c}^T (\bar{E} + \bar{A}_1^*)^{-1} \bar{b}_1^* \tag{13}$$

и ординату ошибки

$$e_0 = -y_0 = h \bar{c}^T (\bar{E} + \bar{A}_1^*)^{-1} \bar{b}_1^*, \tag{14}$$

где  $\bar{E}$  — единичная матрица.

Для определения значения вектора состояния  $\bar{x}(\gamma)$  и ошибки системы  $e(\gamma)$  в моменты  $t = (i + \gamma)T$  положим в выражениях (5) и (6)  $\varepsilon = \gamma$ :

$$\bar{A}_\gamma^* = e^{\bar{A}\gamma T}, \quad \bar{b}_\gamma^* = \int_0^{\gamma T} e^{\bar{A}\sigma} \bar{b} d\sigma. \tag{15}$$

Учитывая, что в установившемся симметричном режиме ошибка системы в моменты  $t = iT$  последовательно принимает значения  $e_0$  и  $-e_1$ , а вектор состояния — значения  $\bar{x}_0$  и

$-\bar{x}_0$ , из уравнения (4) получим

$$\bar{x}(\gamma) = -h \bar{A}_\gamma^* (\bar{E} + \bar{A}_1^*)^{-1} \bar{b}_1^* + h (\bar{E} - \bar{A}_\gamma^*) \bar{b}_\gamma^*, \quad (16)$$

тогда ошибка системы

$$e(\gamma) = h \bar{c}^T \left[ \bar{A}_\gamma^* (\bar{E} + \bar{A}_1^*)^{-1} \bar{b}_1^* - (\bar{E} - \bar{A}_\gamma^*) \bar{b}_\gamma^* \right]. \quad (17)$$

Согласно (9), установившееся значение скважности импульсов  $\gamma$  определяется из уравнения

$$e(\gamma) = \beta \gamma. \quad (18)$$

Несимметричный режим (рис. 1, б) может возникать в статических системах, если  $g(t) \neq 0$ . Пусть  $g(t) = g_0 > 0$ , тогда после окончания переходного процесса  $e(i)$  последовательно принимает значения  $e_0$  и  $-e_1$ . Поэтому вектор состояния  $\bar{x}(i)$  будет иметь значения  $\bar{x}_0$  и  $\bar{x}_1$ , а скважность импульсов — значения  $\gamma_0$  и  $\gamma_1$ . Очевидно, что  $e_0 > e_1$ , а  $\gamma_0 > \gamma_1$ . В результате из уравнения (4) получим

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}_0 &= h(\bar{E} - \bar{A}^{*2})^{-1} (\bar{A}^* \bar{b}_{\gamma_0}^* - \bar{b}_{\gamma_1}^*), \\ \bar{x}_1 &= h(\bar{E} - \bar{A}^{*2})^{-1} (\bar{b}_{\gamma_0}^* - \bar{A}^* \bar{b}_{\gamma_1}^*). \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Из того же уравнения найдем

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}(0, \gamma_0) &= \bar{x}_{\gamma_0} = \bar{A}_{\gamma_0}^* \bar{x}_0 + h \bar{b}_{\gamma_0}^*, \\ \bar{x}(1, \gamma_1) &= \bar{x}_{\gamma_1} = \bar{A}_{\gamma_1}^* \bar{x}_1 - h \bar{b}_{\gamma_1}^*. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Таким образом, из выражения (9) образуются два уравнения с двумя неизвестными:

$$\left. \begin{aligned} g_0 - \bar{c}^T \bar{x}_{\gamma_0} &= \beta \gamma_0, \\ g_0 - \bar{c}^T \bar{x}_{\gamma_1} &= \beta \gamma_1. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Когда корни  $p_v$  полинома знаменателя передаточной функции  $W(p)$  — простые вещественные отрицательные, т.е.  $p_v = -1/T_v$  ( $T_v$  — постоянная времени характеристического уравнения), ее можно представить в виде

$$W(p) = \sum_{v=1}^n \frac{R_v}{T_v p + 1}.$$

Это означает, что матричное уравнение (4) можно заменить системой из  $n$  независимых уравнений первого порядка, в которых  $\bar{A}^* = d_v$ ,  $\bar{b}^* = R_v(1 - d_v)$ ,  $d_v = e^{-T/T_v}$ ,  $R_v$  — параметр разложения  $W(p)$  на элементарные дроби [2]. Тогда для симметричного режима вместо (12), (17) и (18) получим:

$$\bar{c}^T \bar{x}_0 = -h \sum_{v=1}^n R_v \frac{d_v^{1-\gamma} - d_v}{1 + d_v}, \quad (22)$$

$$e(\gamma) = h \sum_{v=1}^n R_v d_v^\gamma \frac{d_v^{1-\gamma} - d_v}{1 + d_v} - R_v (1 - d_v^\gamma) = \beta \gamma, \quad (23)$$

где  $d_v^{1-\gamma} = e^{-\frac{T}{T_v}(1-\gamma)}$  и  $d_v^\gamma = e^{-\frac{T}{T_v}\gamma}$ .

Для несимметричного режима выражения (19) и (20) принимают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \bar{c}^T \bar{x}_0 &= h \sum_{v=1}^n R_v \frac{d_v(d_v^{1-\gamma_0} - d_v) - (d_v^{1-\gamma_1} - d_v)}{1 - d_v^2}, \\ \bar{c}^T \bar{x}_1 &= h \sum_{v=1}^n R_v \frac{(d_v^{1-\gamma_0} - d_v) - d_v(d_v^{1-\gamma_1} - d_v)}{1 - d_v^2}, \\ \bar{c}^T \bar{x}_{\gamma_0} &= h \sum_{v=1}^n R_v d_v^{\gamma_0} \frac{d_v(d_v^{1-\gamma_0} - d_v) - (d_v^{1-\gamma_1} - d_v)}{1 - d_v^2} + R_v(1 - d_v^{\gamma_0}), \\ \bar{c}^T \bar{x}_{\gamma_1} &= h \sum_{v=1}^n R_v d_v^{\gamma_1} \frac{(d_v^{1-\gamma_0} - d_v) - d_v(d_v^{1-\gamma_1} - d_v)}{1 - d_v^2} - R_v(1 - d_v^{\gamma_1}). \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Значения скважности импульсов  $\gamma_0$  и  $\gamma_1$  определяются из уравнений (21).

В качестве примера рассмотрим систему с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (25)$$

где  $T_1 = 0,2$  с;  $T_2 = 0,02$  с, период дискретности  $T = 0,05$  с. Представим выражение (25) в виде суммы простых дробей:

$$W(p) = \frac{R_1}{T_1 p + 1} + \frac{R_2}{T_2 p + 1}, \quad R_1 = \frac{kT_1}{T_1 - T_2} \approx 1,111k, \quad R_2 = -\frac{kT_2}{T_1 - T_2} \approx -0,111k.$$

Для определения параметров симметричного периодического режима составим уравнение (23), где  $d_1 \approx 0,7788$ ;  $d_2 \approx 0,0821$ .

Очевидно, что решение этого уравнения существует, если для заданного значения  $\gamma$ , находящегося в диапазоне  $0 < \gamma < 1$ , сумма слагаемых левой части больше нуля. Определив эту сумму, можно найти требуемые значения  $kh$  и  $\beta$ .

Можно убедиться, что в данном случае сумма больше нуля для любых значений  $\gamma$ , находящихся в диапазоне  $0 < \gamma < 0,8$ , если  $\gamma \geq 0,8$ , то сумма становится отрицательной, т.е. таких решений не существует.

Положим, например,  $\gamma = 0,28$ , тогда из (23) получим  $0,011kh = 0,28\beta$ . Это означает, что периодический режим с такой скважностью импульсов существует при любых значениях  $kh$  и  $\beta$ , удовлетворяющих условию  $\beta \approx 0,0375kh$ . Так, если  $kh = 40$ , то  $\beta \approx 1,5$ ; если  $kh = 20$ , то  $\beta \approx 0,75$ . Если положить  $\gamma = 0,4$ , то периодический режим существует при выполнении условия  $0,0054kh = 0,4\beta$ . От значения  $kh$  зависит амплитуда колебаний сигнала ошибки  $e_0 = -\bar{c}^T \bar{x}_0$ . Если, например,  $\gamma = 0,26$ , то, согласно (22),  $e_0 \approx 0,0246kh$ . Если  $kh = 40$ , то  $e_0 \approx 0,998$ .

На рис. 2, а показан результат моделирования процесса при значении входного воздействия  $g = 0$  ( $t$  — время, 1 — значение  $e$ , 2 — значение  $u_{\text{он}}$ ). Результат совпадает с расчетными значениями.

Для исследования несимметричного режима положим  $kh = 40$ ,  $\beta = 1,5$  и  $g_0 = 1,4$ . Тогда из уравнений (21) с учетом выражения (24) путем последовательных приближений получим:  $\gamma_0 \approx 0,3$ ,  $\gamma_1 \approx 0,24$ . Амплитудные значения ошибки

$$e_0 = g_0 - \bar{c}^T \bar{x}_0 \approx 1,23,$$

$$e_1 = g_0 - \bar{c}^T \bar{x}_1 \approx -0,83.$$

Постоянная составляющая ошибки  $e'(t) = 0,5(e_0 + e_1) \approx 0,2$ , амплитуда колебаний  $B = 0,5(e_0 - e_1) \approx 1,03$  практически соответствует той, что и в симметричном режиме.

Результаты моделирования, подтверждающие правильность теоретических расчетов, при  $g \neq 0$  представлены на рис. 2, б.

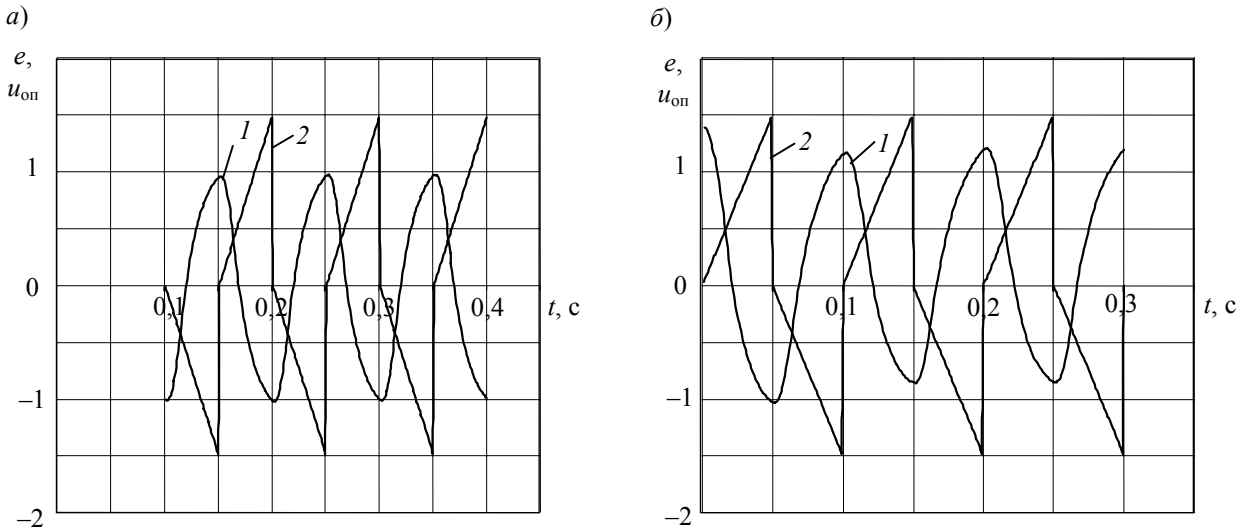


Рис. 2

Таким образом, широтно-импульсный модулятор способствует возникновению в системе высокочастотных периодических колебаний. Такие колебания приводят к минимизации сопутствующих нелинейностей. В работе [3] показано, как такое сглаживание происходит за счет автоколебаний. Покажем, что такой же эффект достигается за счет периодических режимов.

Рассмотрим две одинаковые по структуре системы с ШИМ-2, передаточные функции которых соответствуют динамике движения чувствительного элемента датчика угловых скоростей (см. (25)). Параметры первой  $k = 0,1$ ;  $T_1 = 0,009$  с;  $T_2 = 0,008$  с. При таких значениях система устойчива, статическая ошибка  $e_{ст}$  определяется формулой

$$e_{ст} = g / (1 + k). \tag{26}$$

При входном воздействии  $g = 0,2$  град/с значение ошибки  $e_{ст} = 0,182$  град/с. Пример моделирования одной из самых распространенных нелинейностей — зоны нечувствительности — приведен на рис. 3 (РГ — ротор гироскопа, ПГ — подвес гироскопа, НЗ — нелинейное звено, ДУ — датчик угла, УП — усилитель-преобразователь, ДМ — датчик момента).

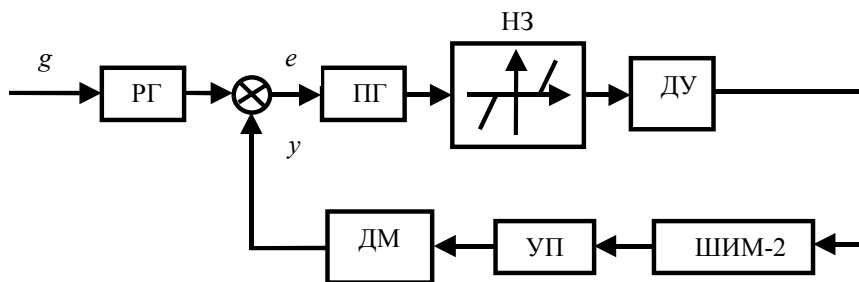


Рис. 3

Статическая ошибка зависит от величины зоны нечувствительности и определяется формулой

$$e = \frac{g}{1 + k} + \frac{ks}{1 + k}, \tag{27}$$

где  $s$  — значение зоны нечувствительности.

При переводе системы в периодический режим с заданными параметрами ШИМ-2:  $T = 0,005$  с;  $h = 300$ ;  $\beta = 1$  зависимость ошибки системы от зоны нечувствительности можно определить путем моделирования.

На рис. 4 показаны результаты моделирования ДУС, где кривая 1 соответствует статической ошибке системы, а 2 — ошибке системы в периодическом режиме ( $g = 0,2$  град/с,  $k = 0,1$ ). Полностью ошибка в периодическом режиме не устраняется, но существенно (в 10—30 раз) уменьшается вблизи значений по входу 0,1 град/с.

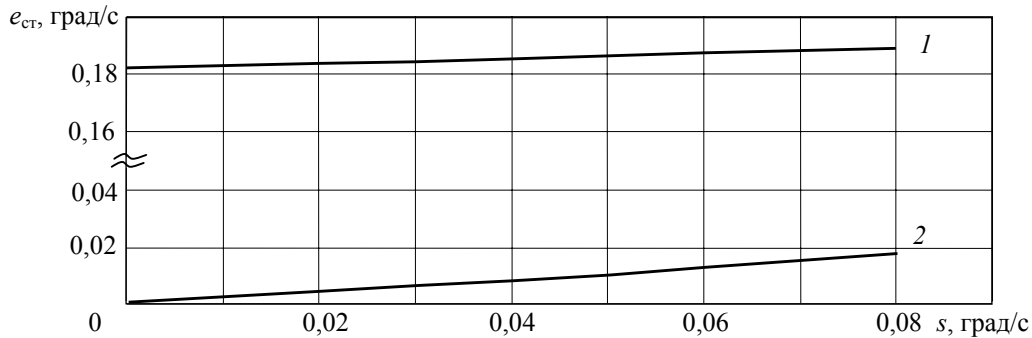


Рис. 4

На основании результатов моделирования можно заключить, что параметры периодического режима в системах автоматического управления вполне определяемы и находятся в границах, которые можно найти из уравнений (23) и (24). Значение скважности  $\gamma$  для ШИМ-2 для режима  $N=1$  всегда меньше единицы. В пределах определенных границ задается рабочий режим работы системы автоматического управления в периодическом режиме. В этом режиме система приобретает свойства временного модулятора и имеет место вибрационная линеаризация сопутствующих нелинейностей — зон нечувствительностей, трения, люфта и др. Перевод системы в периодический режим приводит к уменьшению погрешностей системы в 10—30 раз по сравнению с исходными значениями.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лучко С. В., Ватутин М. А., Трофимов И. А. Периодические режимы в автоматических системах с широтно-импульсной модуляцией // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 6. С. 67—73.
2. Лучко С. В. Расчет дискретных систем автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией. М.: МО СССР, 1984. 112 с.
3. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 2003. Т. 1. С. 702—712.

## Сведения об авторах

- Сергей Викторович Лучко** — Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматики и электроники, Санкт-Петербург
- Сергей Юрьевич Балувев** — Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматики и электроники, Санкт-Петербург; E-mail: s.baluev@mail.ru
- Михаил Алексеевич Ватутин** — Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматики и электроники, Санкт-Петербург
- Виктор Алексеевич Розгачев** — Государственный университет телекоммуникаций им. М. А. Бонч-Бруевича, кафедра информационных управляющих систем, Санкт-Петербург

Рекомендована кафедрой  
автоматики и электроники

Поступила в редакцию  
06.08.07 г.

А. И. КОРШУНОВ

## ДОСТАТОЧНОЕ УСЛОВИЕ АСИМПТОТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИСКРЕТНОЙ СИСТЕМЫ

Получено достаточное условие асимптотической устойчивости в большом нелинейной дискретной системы, столбцы матрицы которой на каждом шаге меняются местами в зависимости от соотношения элементов вектора фазовых координат. Показано, что путем изменения масштаба переменных можно уменьшить „жесткость“ полученного достаточного условия устойчивости, а в ряде случаев удается получить необходимое и достаточное условие устойчивости.

**Ключевые слова:** асимптотическая устойчивость, нелинейная дискретная система, достаточное условие устойчивости.

Исследуется дискретная система, описываемая разностным уравнением

$$\mathbf{X}_{n+1} = \mathbf{A}_n \mathbf{X}_n, \quad (1)$$

где  $\mathbf{X}_n^T = [x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{mn}]$  — вектор фазовых координат,  $\mathbf{A}_n = \|a_{ij}\|_1^m$  — матрица  $m \times m$ , получаемая из известной  $m \times m$  матрицы  $\mathbf{A}$  перестановкой ее столбцов в зависимости от соотношения между элементами вектора  $\mathbf{X}_n$ . Предвидеть заранее, не решив разностного уравнения, какой будет матрица системы на  $n$ -м шаге, невозможно.

Подобные системы встречаются при описании, например, регулятора тока в индуктивной нагрузке автономного трехфазного широтно-управляемого инвертора.

Дискретные системы рассматриваемого класса исследуются в отечественной и зарубежной литературе с 1960-х гг. [1—5 и др.]. При этом обычно использовалось очевидное соображение о необходимости достаточной малости модулей элементов матрицы  $\mathbf{A}_n$ . В работах [2, 3] на основе свойств различных норм матрицы  $\mathbf{A}_n$  были получены следующие различные достаточные условия устойчивости:

$$\left. \begin{aligned} \sup_i \sum_{j=1}^m |a_{ij}(x_n)| < 1, n = 0, 1, 2, \dots, \infty; \\ \sup_j \sum_{i=1}^m |a_{ij}(x_n)| < 1, n = 0, 1, 2, \dots, \infty; \\ \sup_i \lambda_{in} < 1, n = 1, 2, \dots, \infty, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\lambda_{in} = \lambda_i(\mathbf{A}_n^T \mathbf{A}_n)$  — собственные значения матрицы  $\mathbf{A}_n^T \mathbf{A}_n$ .

В работе [4] было введено понятие мажорантной матрицы  $\mathbf{M} = \|m_{ij}\|_1^m$ , удовлетворяющей условию  $|a_{ij}(\mathbf{X}_n)| < m_{ij}$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, m$ ;  $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$ . Показано, что система (1) в целом устойчива, если существует устойчивая матрица  $\mathbf{M}$ , т.е. все ее собственные значения по модулю меньше единицы.

Приведенные выше условия устойчивости часто оказываются для конкретных систем слишком жесткими. Объясняется это тем обстоятельством, что в указанных первых работах и в более поздних, например [5], рассматривается система в общем случае, т.е. не учитывается характер конкретной зависимости  $a_{ij}(\mathbf{X}_n)$ . Учет свойств конкретной системы, хотя и снижает



общность полученного результата, позволяет приблизить достаточные условия устойчивости к необходимым и достаточным.

Такая попытка представлена ниже для рассматриваемой системы (1). Фазовые координаты и элементы матрицы полагаем безразмерными, чего легко добиться нормированием фазовых координат [1].

**Достаточные условия устойчивости.** Для получения достаточного условия асимптотической устойчивости рассматриваемой нелинейной импульсной системы, т.е. асимптотической устойчивости тривиального решения ее разностного уравнения (1), воспользуемся вторым методом Ляпунова [6]. В качестве пробной функции выбираем квадрат евклидовой нормы вектора фазовых координат

$$V(\mathbf{X}_n) = h^2(\mathbf{X}_n) = \mathbf{X}_n^T \mathbf{X}_n = x_{1n}^2 + x_{2n}^2 + \dots + x_{mn}^2. \quad (3)$$

Поскольку функция Ляпунова (3) инвариантна относительно перестановки элементов вектора  $\mathbf{X}_n$ , удобно считать матрицу  $A_n$  постоянной, а менять местами на каждом шаге элементы вектора  $\mathbf{X}_n$ . Для анализа первой разности пробной функции (3)

$$\Delta V(\mathbf{X}_n) = V(\mathbf{X}_{n+1}) - V(\mathbf{X}_n) = h^2(\mathbf{X}_{n+1}) - h^2(\mathbf{X}_n) \quad (4)$$

удобно использовать матричную норму, индуцированную евклидовой векторной нормой [7] и называемую часто спектральной. Учитывая ее согласованность с евклидовой векторной нормой, получим

$$h(\mathbf{X}_{n+1}) = h(A\mathbf{X}_n) \leq \|A\| h(\mathbf{X}_n), \quad (5)$$

где  $\|A\| = \lambda_{\hat{A}}^{1/2}$  — спектральная норма матрицы  $A$ ,  $\lambda_{\hat{A}}$  — спектральный радиус матрицы  $\hat{A} = A^T A$ . Подстановка оценки  $h(\mathbf{X}_{n+1})$  (5) в выражение первой разности пробной функции (4) дает

$$\Delta V(\mathbf{X}_n) < - (1 - \lambda_{\hat{A}}) h^2(\mathbf{X}_n). \quad (6)$$

Очевидно, что отрицательная определенность первой разности функции Ляпунова (3), гарантирующая асимптотическую устойчивость системы (1), имеет место при выполнении неравенства

$$\lambda_{\hat{A}} < 1. \quad (7)$$

В качестве матрицы  $A$  можно взять любую из  $m!$  возможных в нелинейной системе матриц, получаемых перестановкой столбцов. Оказывается, что независимо от выбранной матрицы получается одно и то же значение  $\lambda_{\hat{A}}$ .

Действительно, каждая из выбранных матриц выражается через любую из них, приняв за базовую, с помощью перестановочной матрицы  $P$ :

$$A_P = AP, \quad (8)$$

где  $A$  — базовая матрица,  $A_P$  — матрица, полученная перестановкой столбцов,  $P = [e_{i_1}, e_{i_2}, \dots, e_{i_m}]$ ,  $e_{i_j}$  — вектор-столбец, все элементы которого равны нулю, кроме  $i_j$ -го, равного единице,  $i_j$  — номер столбца матрицы  $A$ , который в матрице  $A_P$  должен иметь номер  $j$ .

Нетрудно проверить тождества:

$$\det(P) = \det(P^T) = 1, \quad P^T P = E, \quad (9)$$

где  $E$  —  $m \times m$  единичная матрица.

Вычислив с учетом (9) характеристический полином матрицы  $\hat{A}_P = A_P^T A_P$ , убеждаемся в его совпадении с характеристическим полиномом матрицы  $\hat{A}$ :

$$\det(\lambda E - A_P^T A_P) = \det(\lambda P^T P - P^T A^T A P) = \det(P^T) \det(\lambda E - A^T A) \det(P) = \det(\lambda E - A^T A).$$

Из совпадения характеристических полиномов непосредственно следует совпадение спектральных радиусов матриц  $\hat{A}$  и  $\hat{A}_P$ .

В частном случае симметричной матрицы  $A$  ( $A^T = A$ ) получаем  $\hat{A} = A^2$ . Это означает, что собственные значения матрицы  $\hat{A}$  равны квадратам собственных значений матрицы  $A$ . Таким

образом, условие (7) выполняется при устойчивости симметричной матрицы  $A$ , т.е. при всех ее собственных значениях  $\mu_i$  (вещественных) [7], удовлетворяющих неравенству

$$-1 < \mu_i < 1, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (10)$$

Очевидно, что если одна из возможных в системе (1) матриц  $A$  симметрична, то достаточное условие асимптотической устойчивости (7) оказывается необходимым и достаточным. Действительно, положив  $\lambda_{\hat{A}} > 1$ , имеем хотя бы одно из собственных значений симметричной матрицы  $A$ , большее единицы по модулю. В возможном случае равенства  $A_n$  симметричной матрице  $A$  на каждом шаге это означает неустойчивость системы.

**Приближение достаточного условия устойчивости к необходимому и достаточному.** При использовании достаточного условия устойчивости (7) желательно приблизить его к необходимому и достаточному. С этой целью можно изменить базовые значения фазовых координат, принятые при их нормировании [1]. В уже нормированной системе (1) можно выполнить линейное преобразование координат

$$Y_n = DX_n, \quad (11)$$

где  $D = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$  — диагональная матрица с безразмерными элементами.

Покажем возможность получения менее жесткого достаточного условия устойчивости на примере системы второго порядка:

$$A = \begin{bmatrix} a & e \\ c & d \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} d_1 & 0 \\ 0 & d_2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Подставив (11) в (1), с учетом (12) получим

$$Y_{n+1} = A_D Y_n, \quad (13)$$

$$\text{где } A_D = D^{-1}AD = \begin{bmatrix} a & bq \\ cq^{-1} & d \end{bmatrix}, \quad \hat{A}_D = A_D^T A_D = \begin{bmatrix} a^2 + c^2 q^{-2} & abq + cdq^{-1} \\ abq + cdq^{-1} & b^2 q^2 + d^2 \end{bmatrix}, \quad q = d_2 d_1^{-1}.$$

Собственные значения матриц  $A$  и  $A_D$ , как известно [7], совпадают.

Вычисление характеристического полинома матрицы  $\hat{A}_D$  дает

$$\det(\hat{A}_D - \lambda E) = \lambda^2 + \gamma_1 \lambda + \gamma_0, \quad (14)$$

где  $\gamma_1 = -(a^2 + b^2 q^2 + c^2 q^{-2} + d^2) < 0$ ,  $\gamma_0 = (ad + dc)^2 > 0$ .

Используя известное необходимое и достаточное условие расположения собственных значений матрицы второго порядка  $\hat{A}_D$ , внутри круга единичного радиуса [8] получим

$$\left. \begin{aligned} 1 - \gamma_1 + \gamma_0 &= 1 + (a^2 + b^2 q^2 + c^2 q^{-2} + d^2) + (ad + bc)^2 > 0, \\ 1 + \gamma_1 + \gamma_0 &= 1 - (a^2 + b^2 q^2 + c^2 q^{-2} + d^2) + (ad + bc)^2 > 0, \\ 1 - \gamma_0 &= 1 - (ad + bc)^2 > 0. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

В системе (15) первое неравенство выполняется тождественно, третье от  $q$  не зависит, а второе можно „смягчить“, выбрав значение  $q$ , соответствующее максимуму его левой части,

$$q = \frac{d_2}{d_1} = \pm 4 \sqrt{\frac{c^2}{b^2}}. \quad (16)$$

Нетрудно проверить, что матрица  $\hat{A}_D$  при выполнении условия (16) становится симметричной ( $bq = cq^{-1}$ ) или имеет равные по модулю элементы  $bq$  и  $cd^{-1}$ .

Из второго неравенства системы (15) очевидно, что существуют значения  $q$ , при которых это неравенство не выполняется. Это означает, что в случае неудачного выбора базовых значений фазовых координат при их нормировании критерий не выполняется, хотя система устойчива.

Следует отметить, что уже в системе третьего порядка

$$A = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix}$$

получение симметричной матрицы  $\hat{A}_D$  возможно только в частном случае:

$$d/b > 0; \quad g/c > 0 \quad h/f > 0, \quad bfg = cdh. \quad (17)$$

Определение в общем виде значений  $q_1 = d_2/d_1$ ,  $q_2 = d_3/d_1$  ( $q_3 = d_3/d_2 = q_2/q_1$ ), обеспечивающих наименее жесткое достаточное условие устойчивости в случае невыполнения условий (17), весьма трудоемко. Однако в конкретном случае можно определить  $q_1$  и  $q_2$  численными методами, используя возможности таких известных пакетов, как MathLab и MathCad. Аналогичный подход можно использовать и при более высоком порядке системы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кориунов А. И., Кориунов А. А.* Исследование устойчивости в большом по линейному приближению разностных уравнений // Изв. вузов. Приборостроение. 1995. Т. 40, № 5—6. С. 16—19.
2. *Bubnicki Z.* On the stability condition of nonlinear sampled-data system // IEEE Transaction on Automatic Control. 1964. Vol. AC-9, N 3.
3. *Vidal P., Laurent F.* Asymptotic stability of sampled-nonlinear systems with variable sampling periods—a bionic application // Third Congress of IFAC. London, 1966.
4. *Розенвассер Е. Н.* Критерии устойчивости нелинейных дискретных систем // Автоматика и телемеханика. 1966. № 2.
5. *Кириченко Н. Ф.* Введение в теорию стабилизации движения. К.: Вища школа, 1978.
6. *Кунцевич В. М., Чеховой Ю. Н.* Нелинейные системы управления с частотно и широтно-импульсной модуляцией. К.: Техніка, 1970. 338 с.
7. *Ланкастер П.* Теория матриц. М.: Наука, 1978. 280 с.
8. Радиоавтоматика / Под ред. *В. А. Бесекерского*. М.: Высш. шк., 1985. 270 с.

#### Сведения об авторе

**Анатолий Иванович Кориунов** — Военно-морской институт радиозлектроники им. А. С. Попова, Санкт-Петербург; E-mail: a.i.korshunov@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
микрорадиоэлектроники

Поступила в редакцию  
07.11.07 г.

В. В. НИКИФОРОВ, В. И. ШКИРТИЛЬ

## ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ОТКЛИКА ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ В СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С МНОГОЯДЕРНЫМИ ПРОЦЕССОРАМИ

Представлен подход к оценке выполнимости прикладных программных систем жесткого реального времени, реализуемых вычислительными комплексами на базе многоядерных процессоров. Рассматривается класс вычислительных моделей систем со статическими приоритетами асинхронных вытесняемых задач, с миграцией исполняемых заданий между ядрами процессора. Для рассматриваемого класса моделей предложен метод оценки времени отклика составляющих систему прикладных задач.

*Ключевые слова:* выполнимость задач, системы жесткого реального времени, критические сценарии системных событий, время отклика прикладных задач.

**Введение.** Требования надежного, предсказуемого поведения систем реального времени (СРВ), эффективного использования аппаратных средств обеспечиваются, в частности, использованием рациональных методов планирования и анализа выполнимости программных приложений. В 1990-х гг. начались интенсивные исследования в области методов построения СРВ на базе симметричных и асимметричных многопроцессорных архитектур. Значительная часть результатов, полученных для моделей симметричных однопроцессорных систем, непосредственно применима и к системам на базе современных многоядерных процессоров. Это относится и к теоретическим результатам, полученным ранее — до появления возможности использовать многоядерные процессоры для построения СРВ. Актуальность этих теоретических результатов существенно возрастает в связи с расширением производства аппаратных средств с многоядерными процессорами. В настоящей работе рассматриваются результаты исследований в области СРВ на многоядерных процессорах и для случаев, когда в первоисточниках упоминаются только симметричные многопроцессорные системы.

Ряд положений, определяющих подходы к построению СРВ на базе классических однопроцессорных архитектур, неприменим к системам, строящимся на базе многоядерных процессоров. Методы планирования, оптимальные в случае однопроцессорных СРВ, не являются таковыми для систем на многоядерных процессорах [1]. Сценарии событий, являющиеся критическими для однопроцессорных СРВ, перестают быть таковыми в случае симметричных систем [2]. Тем не менее результаты разработки методов построения СРВ на многоядерных процессорах в определенном смысле повторяют соответствующие результаты для классических однопроцессорных систем. Это относится к вычислительным моделям программных приложений СРВ различных типов, к методам оценки выполнимости.

**Вычислительные модели программных приложений СРВ.** Ряд простейших разновидностей программных приложений СРВ представляется вычислительными моделями, отвечающими следующим условиям.

1. Система строится в виде множества задач  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ ; межзадачные информационные связи отсутствуют, в этом смысле задачи являются независимыми.

2. В общем случае каждая из задач  $\tau_i$  выполняется многократно, каждое исполнение задачи  $\tau_i$  называется заданием типа  $\tau_i$ . Таким образом, каждой задаче соответствует последовательность заданий соответствующего типа — задания  $1\tau_i, 2\tau_i, \dots, j\tau_i, \dots$ , порождаемые в моменты времени  $t_{\text{beg}}(j\tau_i)$  и завершаемые в моменты времени  $t_{\text{end}}(j\tau_i)$ . Интервал времени, ограниченный моментами  $t_{\text{beg}}(j\tau_i)$  и  $t_{\text{end}}(j\tau_i)$ , является интервалом существования задания  $j\tau_i$ . Для каждой задачи  $\tau_i$  определяется константа  $T_i$ , называемая периодом задачи  $\tau_i$ . Величина  $T_i$  ограничивает снизу длину интервала времени ( $t_{\text{beg}}(j\tau_i), t_{\text{beg}}(j+1\tau_i)$ ) между моментами активизации задачи  $\tau_i$  (моментами порождения однотипных заданий  $j\tau_i$  и  $(j+1)\tau_i$ ), т.е.  $T_i \leq |t_{\text{beg}}(j\tau_i) - t_{\text{beg}}(k\tau_i)|$  для всех  $j \neq k$ .

3. На протяжении интервала своего существования задание  $j\tau_i$  расходует процессорное время объемом  $j c_i$ . Для различных однотипных заданий значения  $j c_i$  и  $k c_i$  могут не совпадать. Еще один параметр каждой из задач  $\tau_i$  — нагрузка  $C_i$ . Величина  $C_i$  представляет оценку предельного объема процессорного времени, требуемого для выполнения заданий типа  $\tau_i$ , т.е.  $C_i \geq \max\{1c_i, 2c_i, \dots\}$ .

4. Задание  $j\tau_i$  считается действующим в рамках интервала ( $t_{\text{beg}}(j\tau_i), t_{\text{end}}(j\tau_i)$ ) своего существования. Длина интервала ( $t_{\text{beg}}(j\tau_i), t_{\text{end}}(j\tau_i)$ ) называется временем отклика  $j r_i$  задания  $j\tau_i$ . Интервалы существования заданий могут пересекаться, т.е. в конкретный момент времени  $t$  несколько заданий могут оказаться действующими. В каждый момент времени состав действующих заданий определяется предшествующим сценарием системных событий.

Если в одноядерной системе в момент времени  $t$  имеется непустое множество действующих заданий, то лишь одно из них  $j\tau_i$  (текущее задание) выполняется процессором, остальные действующие задания находятся в состоянии „ожидание ресурса процессора“ (далее — состояние ожидания). Если в момент времени  $t$  действующих заданий нет, то процессор простаивает.

В  $m$ -ядерной системе до  $m$  действующих заданий могут находиться в состоянии „текущее задание“. Если число  $n$  действующих заданий не превосходит  $m$ , то все они находятся в состоянии „текущее задание“, т.е. выполняются выделенными им ядрами процессора ( $m - n$  ядер процессора простаивают). Если  $m < n$ , то  $n - m$  действующих заданий находятся в состоянии ожидания. При  $m < n$  действующие задания конкурируют за предоставление ресурса процессора. В этом случае действующие задания оказывают взаимное влияние на время отклика конкурентов (так называемая интерференция заданий). В результате такой интерференции для различных однотипных заданий значения  $j r_i$  и  $k r_i$  могут не совпадать даже при  $j c_i = k c_i$ . Максимальное значение времени отклика однотипных заданий  $R_i = \max\{1r_i, 2r_i, \dots\}$  называется временем отклика задачи  $\tau_i$ .

5. Для каждой задачи реального времени  $\tau_i$  указывается *предельно допустимая* величина  $D_i$  времени отклика. Это означает, что система должна быть реализована таким образом, чтобы  $\max\{1r_i, 2r_i, \dots\} \leq D_i$ .

Наряду с основным набором параметров задач  $T_i, C_i, D_i$  при анализе вычислительных моделей приложений широко используются значения производных параметров — в частности, значения плотности нагрузки  $u(\tau_i) = C_i/D_i$  на процессор от каждой из задач, суммарная

плотность нагрузки на процессор от всех задач приложения  $U = \sum_{i=1}^n u(\tau_i)$ .

Класс **A** вычислительных моделей, отвечающий перечисленным условиям, соответствует системам с независимыми асинхронными задачами. Для жестких СРВ нарушение крайних сроков выполнения задач недопустимо (например, может повлечь значительные материальные потери или человеческие жертвы). Для мягких СРВ подобные нарушения могут рассматриваться как допустимые, но ведущие к снижению качества работы системы.

В классе **A** вычислительных моделей рассматриваются три подкласса.

**A<sub>1</sub>**. Приложения с буферизацией однотипных заданий — для части (или для всех) задач таких приложений допускается превышение величины времени отклика относительно периода задачи ( $D_i > T_i$ ).

**A<sub>2</sub>**. Приложения без буферизации заданий ( $D_i = T_i$ ).

**A<sub>3</sub>**. Приложения с укороченными сроками выполнения заданий ( $D_i \leq T_i$ ).

**Дисциплины планирования.** Порядок предоставления процессорного времени действующим заданиям определяется установленной дисциплиной планирования. Любая дисциплина планирования, применяемая для реализации системы, может быть задана определением способа назначения приоритетов заданий. Различаются две разновидности дисциплин — планирование со статическими и динамическими приоритетами.

Статические приоритеты задач устанавливаются в ходе разработки системы: каждой задаче  $\tau_i$  (тем самым всем заданиям типа  $\tau_i$ ) назначается фиксированное значение приоритета. Примеры планирования со статическими приоритетами — планирование, монотонное по периодам (RM — rate monotonic, приоритеты задач возрастают в порядке уменьшения их периодов), и планирование, монотонное по срокам (DM — deadline monotonic, приоритеты задач возрастают в порядке уменьшения предельных сроков их выполнения).

При использовании дисциплин планирования с динамическими приоритетами значения приоритетов заданий определяются в ходе работы системы в зависимости от сценария системных событий. К наиболее широко используемым дисциплинам планирования с динамическими приоритетами относится планирование по моментам завершения заданий (EDF — earliest deadline first, приоритеты действующих заданий  $j\tau_i$  устанавливаются в порядке значений  $t_{\text{beg}}(j\tau_i) + D_i$  крайних сроков их завершения).

В большинстве СРВ применяется принцип вытеснения: если появляется задание  $j\tau_i$  с приоритетом, более высоким, чем приоритет текущего задания, то низкоприоритетное задание переводится в состояние ожидания — оно вытесняется заданием  $j\tau_i$ , которое становится текущим.

**Выполнимость задач и приложений.** Для фиксированной модели приложения и определенной дисциплины планирования можно ставить вопрос о выполнимости отдельных задач и приложения в целом. Задача  $\tau_i$  считается выполнимой при использовании выбранной дисциплины планирования, если для любых сценариев системных событий гарантируется своевременность завершения всех задний типа  $\tau_i$ . Приложение считается выполнимым, если выполнимы все составляющие его задачи. Использование методов проверки выполнимости задач и приложений — один из важнейших этапов разработки жестких СРВ. Один из таких методов — использование UB-теста

$$U \leq \text{UB}(n) = n(2^{-n} - 1), \quad (1)$$

применяемого в качестве средства проверки выполнимости приложений для одноядерных процессоров: в [3] показано, что при использовании RM-дисциплины планирования с вытеснением положительный результат UB-теста гарантирует выполнимость приложений из подкласса **A<sub>2</sub>**.

При реализации приложений подкласса **A<sub>3</sub>** одноядерными процессорами обычно используется DM планирование с вытеснением. В подклассе **A<sub>3</sub>** DM-дисциплина является оптимальной в том смысле, что если приложение подкласса **A<sub>3</sub>** невыполнимо при использовании DM-планирования, то оно невыполнимо и при использовании любой другой дисциплины

планирования. Для проверки выполнимости приложений подкласса  $\mathbf{A}_3$  вычисляются оценки  $R_i$  значений времени отклика каждой из задач  $\tau_i$ , выражаемые рекуррентным соотношением

$$R_i = C_i + \sum_{j < i} \lceil R_j / T_j \rceil C_j, \quad (2)$$

где  $\lceil x \rceil$  — сверху к  $x$  целое число. Индексы задач упорядочены по значениям приоритетов: наиболее приоритетная из задач обозначается символом  $\tau_1$ . Вычислительные модели подкласса  $\mathbf{A}_2$  являются подмножеством моделей подкласса  $\mathbf{A}_3$ , поэтому соотношение (2) может использоваться и для проверки выполнимости приложений подкласса  $\mathbf{A}_2$ .

**Реализация СРВ многоядерными процессорами.** Наличие нескольких ядер ставит вопрос о выборе подхода к распределению задач (и заданий) по ядрам процессора. Вариантом решения этого вопроса является статическое распределение задач по ядрам: определяются группы смежных задач; каждая группа приписывается отдельному ядру, в рамках отдельного ядра планирование заданий и оценка выполнимости производятся методами, разработанными для одноядерных процессоров. Более гибкий способ реализации СРВ на базе многоядерных процессоров предполагает динамическое распределение текущих заданий по ядрам процессора. При этом ядро, выделенное текущему заданию  $\tau_i$ , остается в распоряжении  $\tau_i$  до тех пор, пока оно не будет вытеснено более приоритетным заданием. Вытесненное задание ожидает момента освобождения любого из ядер процессора — таким образом, при возобновлении выполнения задания  $\tau_i$  оно может занимать уже не то ядро, которым обслуживалось до момента вытеснения. В этом смысле каждое из действующих заданий в рамках интервала своего существования может мигрировать между различными ядрами процессора.

Снятие ограничений, накладываемых статической привязкой задач к ядрам процессора, открывает возможность более эффективного использования вычислительных ресурсов. Чтобы в полной мере использовать эту возможность, необходимо определить для систем с миграцией эффективные дисциплины планирования, методы оценки выполнимости задач и приложений.

Между тем оказывается, что ряд положений, определяющих подходы к построению СРВ на базе одноядерных процессоров, теряет силу при переходе к многоядерным процессорам. Например, дисциплины планирования EDF и RM, оптимальные в случае одноядерных процессоров, перестают быть таковыми для СРВ на базе многоядерных процессоров [1]. В статье [2] приведен пример такого сценария системных событий, который является критическим для одноядерного процессора, но уже не является таковым для многоядерного.

В ходе исследований по методам построения СРВ на базе многоядерных процессоров был получен широкий ряд результатов как в области разработки эффективных дисциплин планирования, так и в области методов оценки выполнимости. В частности, были разработаны „пропорциональные“ методы динамического назначения приоритетов, являющиеся оптимальными для систем на базе многоядерных процессоров [4, см. также *Cho B. H., Ravindran B., Jensen E. D. An Optimal Real-Time Scheduling Algorithm for Multiprocessors*]. Методы оценки выполнимости приложений, аналогичные UB-тесту (1), были разработаны для различных подклассов вычислительных моделей и различных дисциплин планирования на многоядерных процессорах. В частности, в работе [5] показано, что для приложений подкласса  $\mathbf{A}_2$  при использовании EDF-планирования выполнимость приложения гарантируется в случае справедливости неравенства

$$U \leq m(1 - \lambda) + \lambda, \quad (3)$$

где  $m$  — число ядер процессора,  $\lambda = \max \{ u_1, u_2, \dots, u_n \}$ .

Заметим, что выражение (3) является обобщением условия выполнимости для одноядерных процессоров  $U \leq 1$ , представленного в одной из первых работ по планированию и выполнимости приложений реального времени [1]. Аналогичный UB-тесту (1) метод проверки выполнимости приложений для многоядерных процессоров представлен в [6]: приложения

подкласса  $\mathbf{A}_2$  при использовании RM-планирования выполнимы на  $m$ -ядерном процессоре, если для каждой из задач плотность нагрузки не превышает  $m/(3m - 2)$  и суммарная плотность загрузки не превышает  $m^2/(3m - 2)$ . В работе [7] построены тесты выполнимости приложений подкласса  $\mathbf{A}_3$  при использовании DM-планирования.

**Оценка времени отклика для систем на многоядерных процессорах.** Методы проверки выполнимости приложений ориентированы не только на конкретный класс (подкласс) моделей, но и на конкретную дисциплину планирования. Более универсальны методы проверки выполнимости, основанные на оценке времени отклика задач, строящиеся на решении рекуррентных соотношений типа (2) — такие методы применимы к системам с любым способом назначения статических приоритетов. Ниже предлагается обобщение подхода к оценке времени отклика задач для систем с  $m$ -ядерными процессорами. Рассмотрение ведется для вычислительных моделей подкласса  $\mathbf{A}_3$ .

**Интерференция заданий в СРВ на  $m$ -ядерном процессоре.** Продолжительность  $L(k\tau_j)$  интервала существования  $(t_{\text{beg}}(k\tau_j), t_{\text{end}}(k\tau_j))$  задания  $k\tau_j$  зависит от характера интерференции  $k\tau_j$  с заданиями типов  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{j-1}$  (задачи индексируются в порядке убывания приоритетов). При  $j \leq m$  задания не интерферируют: в этом случае  $L(k\tau_j) = R(\tau_j) = kc_j$ .

Рассмотрим случай  $j > m$ . На величину  $L(k\tau_j)$  существенное влияние оказывает объем суммарной нагрузки  $W(k\tau_j)$  на процессор от экземпляров задач  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{j-1}$  на интервале  $(t_{\text{beg}}(k\tau_j), t_{\text{end}}(k\tau_j))$ . Влияние задач  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{j-1}$  на величину  $L(k\tau_j)$  зависит не только от вклада  $w_i(k\tau_j)$  каждой из них в суммарную нагрузку  $W(k\tau_j)$ , но и от того, как эта нагрузка распределяется в рамках интервала  $(t_{\text{beg}}(k\tau_j), t_{\text{end}}(k\tau_j))$ . Заметим, что на интервале  $(t_{\text{beg}}(k\tau_j), t_{\text{end}}(k\tau_j))$  задание  $k\tau_j$  находится в состоянии ожидания в течение  $L(k\tau_j) - kc_j$  единиц времени, когда все  $m$  ядер заняты обслуживанием более приоритетных заданий, т.е. пока  $k\tau_j$  вытеснено, процессор выполняет для задач  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{j-1}$  вычисления объемом  $m(L(k\tau_j) - kc_j)$ .

В наихудшем (для времени отклика  $k\tau_j$ ) случае весь объем вычислений для  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{j-1}$  приходится на интервалы, когда вытеснено  $k\tau_j$ . В этом случае  $m(L(k\tau_j) - kc_j) = W(k\tau_j)$ ; в общем случае  $m(L(k\tau_j) - kc_j) \leq W(k\tau_j)$ , отсюда имеем

$$L(k\tau_j) \leq kc_j + W(k\tau_j) / m \leq kc_j + \left( \sum_{i=1}^{j-1} w_i(k\tau_j) \right) / m \leq C_j + \left( \sum_{i=1}^{j-1} \tilde{w}_i(k\tau_j) \right) / m, \quad (4)$$

где  $\tilde{w}_i(k\tau_j)$  — максимально возможный вклад задачи  $\tau_i$  в  $W(k\tau_j)$ .

**Критический сценарий.** Как было отмечено в [2], ключевым моментом для отыскания оценки времени отклика для задачи  $\tau_j$  является построение критического сценария системных событий, связанных с исполнением более приоритетных задач  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{j-1}$ . Под критическим здесь будем понимать такой сценарий, который приводит к наибольшему значению  $W(k\tau_j)$ .

Вклад  $\tau_i$  в  $W(k\tau_j)$  максимален, если на интервале  $(t_{\text{beg}}(k\tau_j), t_{\text{end}}(k\tau_j))$  выполняются следующие условия.

а) Моменты порождения соседних экземпляров  $i\tau_i$  и  $(i+1)\tau_i$  задачи  $\tau_i$  максимально приближены друг к другу, т.е. отстоят ровно на  $T_i$ .

б) Значения  $iC_i$  для заданий типа  $\tau_i$  равны  $C_i$ .

в) Время отклика первого на интервале  $(t_{\text{beg}}(k\tau_j), t_{\text{end}}(k\tau_j))$  задания типа  $\tau_i$  равно  $R_i$ . Время отклика последнего равно  $C_i$ .

г) Фазы заданий типа  $\tau_i$  таковы, что момент завершения последнего на интервале  $(t_{\text{beg}}(k\tau_j), t_{\text{end}}(k\tau_j))$  задания типа  $\tau_i$  совпадает с моментом  $t_{\text{end}}(k\tau_j)$ .

Включение условий в, г обусловлено необходимостью учета возможности внесения вклада в  $W(k\tau_j)$  тем из заданий типа  $\tau_i$ , которое было порождено до момента  $t_{\text{beg}}(k\tau_j)$ . Если этот



вклад нулевой, то  $w_i(k\tau_j) = \lceil T_i/L(k\tau_j) \rceil C_i$  (как в случае одноядерного процессора), но этот вклад будет ненулевым, если

$$(L(k\tau_j) - C_i) - \left( C_i \lceil T_i/L(k\tau_j) \rceil - R_i \right) > 0, \quad (5)$$

тогда левая часть неравенства и будет соответствовать увеличению времени отклика, привносимому в  $w_i(k\tau_j)$  заданием, порожденным до момента  $t_{\text{beg}}(k\tau_j)$ . Таким образом, максимально возможный вклад  $\tilde{w}_i(k\tau_j)$  задачи  $\tau_i$  в  $W(k\tau_j)$  равен

$$\tilde{w}_i(k\tau_j) = \lceil C_i/L(k\tau_j) \rceil C_i + \max \left\{ 0, (L(k\tau_j) - C_i) \left( C_i \lceil T_i/L(k\tau_j) \rceil - R_i \right) \right\}. \quad (6)$$

Учитывая (4), заключаем, что максимальное значение  $R_j$  времени отклика задачи  $\tau_j$  может быть найдено из уравнения

$$R_j = C_j + \left( \sum_{i=1}^{j-1} \lceil T_i/R_j \rceil C_i + \max \left\{ 0, (R_i - C_i) - \left( C_i \lceil T_i/R_j \rceil - R_i \right) \right\} \right) / m. \quad (7)$$

Отметим, что при  $i \leq m$  время отклика задачи  $\tau_i$  равно ее нагрузке  $R_i = C_i$ ; при  $i > m$  время отклика задачи  $\tau_i$  выражается уравнением (7). Решение уравнения (7) получим, вычислив последовательные приближения  $R_i^0, R_i^1, \dots$  с начальным значением  $R_i^0 = C_i$ . Значения  $R_i$  ищутся последовательно для задач  $\tau_{m+1}, \tau_{m+2}$  и так далее в порядке уменьшения приоритетов задач.

**Заключение.** Предложенный метод оценки времени отклика задач для СРВ на базе многоядерных процессоров ориентирован на класс систем со статическими приоритетами асинхронных вытесняемых задач, с миграцией исполняемых заданий между ядрами процессора. В рамках систем со статическими приоритетами задач возможность оценивать время отклика задач позволяет осуществлять проверку выполнимости задач и приложений в целом при использовании любой дисциплины планирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dhall S., Liu C. On a Real-Time Scheduling Problem // Operation Research. 1978. Vol. 26. P. 127—140.
2. Никифоров В. В., Шкиртиль В. И. Использование многоядерных процессоров для построения систем реального времени // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 10. С. 28—35.
3. Liu C. L., Layland J. W. Scheduling Algorithms for Multiprogramming in Hard Real-Time Environment // J. of the ACM. 1973. Vol. 20. P. 46—61.
4. Baruah B., Cohen N., Plaxton C., Varvel D. Proportionate progress: A notion of fairness in resource allocation // Algorithmica. 1996. Vol. 15. P. 600—625.
5. Srinivasan A., Baruah S. Deadline-based scheduling of periodic task systems on multiprocessors // Information Processing Lett. 2002. Vol. 84. P. 93—98.
6. Andersen B., Baruah S., Jonson J. Static-Priority Scheduling on Multiprocessors // Proc. IEEE Real-Time Systems Symp. 2001. P. 193—202.
7. Baker T. Multiprocessor EDF and Deadline Monotonic Schedulability Analysis // Proc. IEEE Real-Time Systems Symp. 2003. P. 120—129.

#### Сведения об авторах

- Виктор Викентьевич Никифоров** — Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН;  
E-mail: nik@iias.spb.su
- Вячеслав Иванович Шкиртиль** — Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН,  
лаборатория технологий и систем программирования;  
E-mail: jvatlas@mail.rcm.ru

Рекомендована институтом

Поступила в редакцию  
16.11.07 г.

О. В. ПОЛУБЕЛОВА, И. В. КОТЕНКО

## ВЕРИФИКАЦИЯ ПРАВИЛ ФИЛЬТРАЦИИ ПОЛИТИКИ БЕЗОПАСНОСТИ МЕТОДОМ ПРОВЕРКИ НА МОДЕЛИ

Предложен подход к верификации правил фильтрации, предназначенный для обнаружения и разрешения аномалий фильтрации в спецификациях политики безопасности компьютерных сетей. Подход основан на методе проверки на модели. Рассмотрены модели компьютерной системы, межсетевое экран и аномалий фильтрации, служащие для верификации правил фильтрации данным методом, а также алгоритмы выявления таких аномалий. Предложена методика верификации правил фильтрации политик безопасности на базе этих моделей.

*Ключевые слова:* правила фильтрации, метод проверки на модели, верификация.

**Введение.** Задача верификации правил фильтрации межсетевых экранов актуальна для любой системы управления корпоративной компьютерной сетью на основе политик безопасности. Формирование набора правил фильтрации, не содержащих аномалий, позволяет обеспечить работоспособность и безопасность компьютерных сетей. Под аномалией подразумевается несоответствие в задании правил политики безопасности и(или) описании сети, из-за которого эти правила (одно или более) никогда не будут активированы. В связи с увеличением числа правил фильтрации для их верификации необходима автоматизация. Предлагаемые в настоящей работе модели, алгоритмы и методика верификации базируются на методе проверки на модели (model checking).

Метод проверки на модели основан на переборе состояний, в которые может перейти исследуемая система в зависимости от запросов пользователей и ответов компонента, принимающего решение о разрешении или отклонении такого запроса. Перебор управляется условиями, которые формулируются на языке темпоральной логики и выражают корректные состояния системы. Состояние системы определяется набором значений переменных, а изменение состояния вызывается некоторыми параллельными процессами. При этом выбор процесса, который должен осуществляться в очередной момент времени, происходит случайным образом. Рассматриваются все возможные последовательности шагов для заданных процессов, и генерируется сигнал о некорректном состоянии, если в таковое возможно прийти. Пользователю выдается трасса, т.е. последовательность шагов, приведшая к некорректному состоянию системы относительно заданных условий. Метод проверки на модели имеет существенное ограничение: рассматриваются лишь системы с конечным набором состояний (хотя сам моделируемый процесс может быть бесконечным).

В процессе решения задачи верификации правил фильтрации политики безопасности были рассмотрены опубликованные работы по обнаружению и разрешению конфликтов в политиках безопасности. В [1] предлагается использовать аргументационную логику для спецификации и анализа правил фильтрации межсетевое экрана. В статье [2] рассмотрен подход к обнаружению конфликтов авторизации в системе контроля доступа. В [3] для верификации правил авторизации применяется метод проверки на модели. В [4] описываются разработанный язык и инструмент (программное средство) Rebeca, позволяющий верифицировать параллельные и событийно управляемые системы, а также рассматриваются элементы моделирования верифицируемых систем с примерами для SPIN [5]. В статье [6] предлагается подход, основанный на SPIN, для формального моделирования и анализа реализации атак на компьютерную сеть. Авторы предлагают набор функций, типов данных и процессов для моделирования компьютерных атак. В [7] приведены требования к подходу, основанному на

использовании шаблонов. Он применяется при разработке UML-диаграмм, где каждый шаблон имеет секцию ограничений для спецификации безопасности и других неизменяемых свойств. Авторы анализируют диаграммы этих спецификаций, используемые в SPIN.

В настоящей статье предлагаются разработанные авторами модели компьютерной системы, межсетевого экрана и аномалий фильтрации, служащие для верификации правил фильтрации методом проверки на модели.

**Модели компьютерной системы, межсетевого экрана и аномалий фильтрации.** Метод проверки на модели подразумевает моделирование основных объектов рассматриваемой предметной области и их поведение. В процессе решения задачи верификации правил фильтрации были выделены три основных объекта, подлежащих моделированию: компьютерная сеть, межсетевой экран и аномалии фильтрации.

Предлагаемая модель компьютерной сети характеризует структуру сети, ее основные элементы и сетевые процессы. Она включает в себя два базовых компонента: топологию сети и генерируемый в сети трафик. Для верификации правил фильтрации из общей топологии выделяется расположение хостов и межсетевых экранов в сети. При генерации трафика все адресное пространство сокращается до минимума, необходимого для выявления всех возможных аномалий, при этом рассматриваются только хосты, которые специфицированы в правилах фильтрации. При решении задачи ограничения диапазона сетевых адресов используется методика сегментации правил политики безопасности, предложенная в [8].

Модель межсетевого экрана предназначена для описания межсетевого экрана и алгоритмов его работы. Основными компонентами этой модели являются сетевые идентификаторы, заданные наборы правил фильтрации, а также алгоритм обработки сетевого трафика.

Модель аномалий фильтрации задана совокупностью свойств аномалии, определяющей ее тип. Модель также определяет масштабируемость аномалии в рамках сети. Для задания аномалий была использована таксономия аномалий фильтрации, предложенная в работе [9]. Выделяются аномалии затенения, обобщения, корреляции и обобщения.

**Методика верификации правил фильтрации методом проверки на модели.** Основные этапы методики представлены на рис. 1.

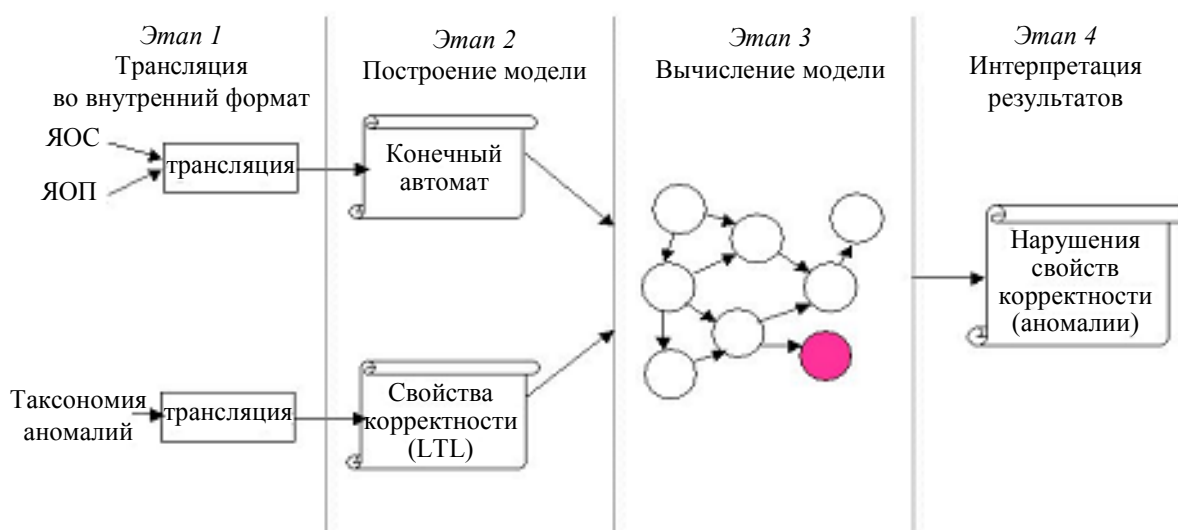


Рис. 1

Основными входными данными в предлагаемой методике являются описания правил фильтрации политики на языке описания политики (ЯОП) и конфигурации компьютерной сети на языке описания системы (ЯОС), а также выявляемые аномалии фильтрации. ЯОП и ЯОС — это xml-подобные языки, созданные на основе CIM [10].

На первом этапе входные данные, включающие в себя описание политики, компьютерной системы и аномалий, преобразуются во внутренний формат системы верификации. Затем строится общая модель для верификации правил фильтрации, представленная в виде конечного автомата, она включает в себя модели компьютерной системы, межсетевого экрана и аномалий. Модель инициализируется входными данными во внутреннем формате, она должна обеспечивать: отображение топологии сети, генерацию необходимого набора значений сетевых адресов, позволяющего обработать все задаваемые на входе правила; передачу сетевого трафика по заданному диапазону адресов; обработку сетевого трафика межсетевыми экранами с накоплением статистики по применяемым правилам; анализ статистики работы межсетевых экранов на предмет существующих аномалий. Аномалии в модели выражены формальными утверждениями, для метода проверки на модели эти формальные утверждения будут являться свойствами, нарушение которых приводит исследуемую систему в некорректное состояние.

На третьем этапе общая модель для верификации правил фильтрации вычисляется специальными программными средствами, реализующими метод проверки на модели, например, SPIN [5, 11], SMV [12], MOCHA [13] и т.п. В процессе верификации выявляются все некорректные состояния системы (на рис. 1 одно из таких некорректных состояний помечено серым цветом).

На завершающем этапе полученные результаты верификации интерпретируются. Если были обнаружены аномалии, то пользователь получает адреса межсетевых экранов и правила, приводящие к возникновению аномалии, а также тип аномалии.

**Реализация методики верификации правил фильтрации.** Для реализации методики верификации в работе использовалось программное средство SPIN [5, 11]. Внутренним языком SPIN является Promela. Основные объекты, такие, как правило политики, сетевой пакет, конфликт, отображаются в виде структур данных на языке Promela.

Ниже приведен код на языке Promela для представления адреса сетевого пакета:

```
typedef Address {
    byte octet1;
    byte octet2;
    byte octet3;
    byte octet4;
}
typedef Port {
    int portNum;
}
typedef NetPacket {
    Address sourceAddress;
    Port sourcePort;
    Address destinationAddress;
    Port destinationPort;
}
```

Хранилище правил представлено одной из базовых структур языка Promela — буферизованным каналом сообщений, представляющим собой аналог массива:

```
chan policyRules = [50] of {FilteringRule};
```

Пример схемы реализации обнаружения аномалий в правилах фильтрации представлен на рис. 2.

Первый шаг — это инициализация модели. Она осуществляется на основе загрузки входных данных и запуска основных процессов, таких как генерация трафика, межсетевой экран и обнаружение аномалий. Все процессы вычисляются параллельно, для обмена данными используются каналы сообщений. После того как будет обработан весь диапазон сетевых

адресов, верификация завершается. Информация обо всех обнаруженных аномалиях преобразуется в формат, удобный для представления пользователю.

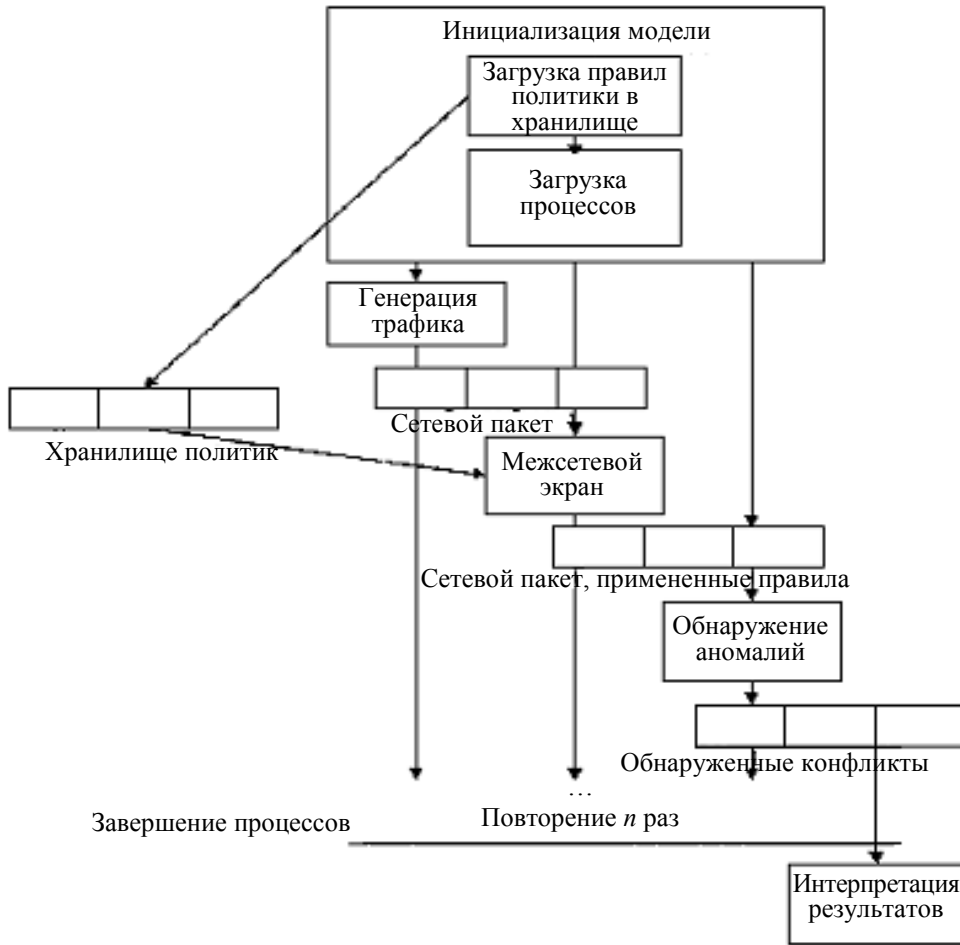


Рис. 2

Пример представления правила фильтрации на языке Promela представлен на рис. 3.

**Правило фильтрации:**

```
1: tcp, 140.192.37.20, any, *.*.*/*, 80, deny
```

**Представление на языке Promela:**

```
typedef FilteringRule {
mtype ruleName;
short prior;
mtype = {tcp, udp};
chan traffType=[1] of {mtype};
Address sAdd;
Port sourcePort;
Address dAdd;
Port destinationPort;
bool action = true; /*true - allow, false - deny*/
mtype = {Enabled, Disabled};
chan en = [1] of {mtype};}
```

**Инициализация правила:**

```
FilteringRule fRule1;
fRule1.ruleName = fR1;
fRule1.trafficType! tcp;
fRule1.sAdd.octet 1=140
fRule1.sAdd.octet2=192
```

Рис. 3

**Экспериментальные данные.** Результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 4. Вычисления производились на 12 выборках, в которых изменялись число правил,  $P$  ( $1 — 5, 2 — 10, 3 — 15$  правил) и число аномалий,  $A$  ( $1 — 0, 2 — 1, 3 — 3, 4 — 8$  аномалий). Число правил увеличивалось с 5 до 15, а число аномалий — с 0 до 5. По результатам экспериментов все аномалии были обнаружены.

Согласно полученным данным, время поиска аномалий в зависимости от числа правил растет экспоненциально. Была выявлена линейная зависимость времени поиска от количества аномалий в правилах. Проведенные эксперименты показали, что предлагаемый подход позволяет выявлять все аномалии правил фильтрации межсетевых экранов, но может эффективно использоваться до определенного количества правил. В ходе дальнейших экспериментов планируется уточнить данное ограничение. Преимуществами данного подхода являются его высокий уровень абстракции при представлении данных и возможность исследовать динамическое поведение системы. К недостаткам относится вычислительная сложность подхода.

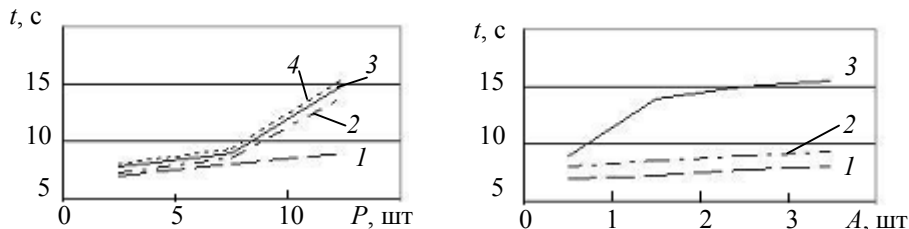


Рис. 4

**Заключение.** В настоящей статье предложены модели компьютерной сети, межсетевого экрана, аномалий фильтрации, а также методика верификации правил фильтрации методом проверки на модели. Предложена реализация методики с использованием программного средства SPIN с примерами на языке Promela. Представлены результаты проведенных экспериментов.

В предлагаемом подходе к верификации методом проверки на модели осуществляются моделирование передачи ограниченного набора адресов и обработка их межсетевым экраном. Результаты обработки правил межсетевым каналом анализируются на предмет аномалий фильтрации, заданных формальными утверждениями.

По результатам проведенных экспериментов было показано, что предлагаемый подход позволяет выявлять все аномалии в правилах фильтрации политики безопасности, однако имеет экспоненциальную вычислительную сложность в зависимости от количества верифицируемых правил. Планируется дальнейшая доработка моделей и алгоритмов обнаружения аномалий, что позволит использовать данный подход для верификации правил фильтрации существующих корпоративных компьютерных сетей.

В настоящее время продолжается реализация компонентов верификации, служащих для выявления внешних аномалий при работе сети с несколькими межсетевыми экранами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 07-01-00547), программы фундаментальных исследований ОИТВС РАН (контракт № 3.2/03), Фонда содействия отечественной науке и при частичной финансовой поддержке, осуществляемой в рамках проектов Евросоюза POSITIF (контракт № IST-2002-002314) и RE-TRUST (контракт № 021186-2).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bandara A. K., Kakas A. S., Lupu E. C., Russo A. Using of Argumentation Logic for Firewall Policy Specification and Analysis // 17th IFIP/IEEE Int. Workshop on Distributed Systems: Operations and Management. DSOM-2006, 2006. P. 185—196.
2. Jajodia S., Samarati P., Sapino M. L., Subrahmanian V. S. Flexible support for multiple access control policies // ACM Transaction Database Systems. 2001. Vol. 26, N 2. P. 214—260.
3. Zhang N., Ryan M. D., Guelev D. Evaluating Access Control Policies Through Model Checking // 8th Information Security Conf. (ISC'05). Singapore: Lecture Notes in Computer Sci. Springer-Verlag. 2005. Vol. 3650. P. 446—460.
4. Sirjani M. Formal specification and verification of concurrent and reactive systems. Ph.D. Thesis. Sharif University of Technology, 2004. P. 175.

5. *Holzmann G.* The Spin Model Checker // IEEE Transactions on Software Engineering. 1997. Vol. 23, N 5. P. 279—295.
6. *Rothmaier G., Kneiphoff T., Krumm H.* Using SPIN and Eclipse for Optimized High-Level Modeling and Analysis of Computer Network Attack Models // Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag, 2005. Vol. 3639. P. 236—250.
7. *Conrad S., Campbell L. A., Cheng B. H. C., Deng M.* A requirements patterns-driven approach to specify systems and check properties // Int. SPIN workshop. 2003. Vol. 2648. P. 18—33.
8. *El-Atawy A., Ibrahim K., Hamed H., Al-Shaer E.* Policy Segmentation for Intelligent Firewall Testing // Proc. 1st Workshop on Secure Network Protocols. Boston, Massachusetts, 2005. P. 67—72.
9. *Hamed H., Al-Shaer E.* Taxonomy of Conflicts in Network Security Policies // IEEE Communications Magazine. 2006. Vol. 44, N 3. P. 134—141.
10. Common Information Model (CIM) Standards [Электронный ресурс]: <<http://www.dmtf.org/standards/cim>>.
11. On-The-Fly, LTL Model Checking with SPIN [Электронный ресурс]: <<http://netlib.bell-labs.com/netlib/spin/whatispin.html>>.
12. *McMillan K.* The SMV System [Электронный ресурс]: <[http://www.cs.cmu.edu/\\_modelcheck/smv.html](http://www.cs.cmu.edu/_modelcheck/smv.html)>.
13. *Alur R., Anand H., Grosu R., Ivancic F., etc.* Mocha User Manual. JMocha Version 2.0 [Электронный ресурс]: <<http://embedded.eecs.berkeley.edu/research/mocha/doc/j-doc/>>.

**Сведения об авторах**

- Ольга Витальевна Полубелова** — Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, научно-исследовательская группа компьютерной безопасности; E-mail: ovch@comsec.spb.ru
- Игорь Витальевич Котенко** — Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, научно-исследовательская группа компьютерной безопасности; E-mail: ivkote@iiias.spb.su

Рекомендована институтом

Поступила в редакцию  
14.02.08 г.

---

---

# ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

---

---

УДК 531.77

Д. О. ТАРАНОВСКИЙ

## ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ БЛОКА МАЯТНИКОВЫХ ПОПЛАВКОВЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ НА ОДНООСНОМ СТЕНДЕ

Представлены результаты разработки и исследования методики автономной калибровки трехканального блока акселерометров, учитывающей особенности маятниковых поплавковых акселерометров и специфику их использования в морских инерциальных навигационных системах.

Методика калибровки предусматривает развороты в поле силы тяжести при установке прибора в двух положениях относительно оси вращения стенда. Проведен анализ погрешностей, представлены экспериментальные данные, подтверждающие эффективность методики.

*Ключевые слова:* маятниковый акселерометр, калибровка, одноосный стенд, модель показаний, статистическое оценивание.

**Введение.** Для блоков акселерометров (БА), предназначенных для использования в составе инерциальных навигационных систем (ИНС), требуется проведение предварительной калибровки параметров модели, адекватно описывающей показания БА в диапазоне измеряемых ускорений. Особенность морских ИНС состоит в относительной малости инерционных ускорений (не более  $1 \text{ м/с}^2$ ) и ограниченности углов отклонения объекта относительно горизонта — углов качки (не более  $\pm 45^\circ$ ), поэтому для БА, устанавливаемых на стабилизированной в плоскости горизонта платформе, достаточно калибровки нулевых сигналов и масштабных коэффициентов акселерометров. Установка БА на корпусе гироприбора ИНС, характерная для бесплатформенных ИНС, приводит к необходимости определения параметров более полной модели показаний (коэффициентов нелинейности и перекрестных связей) [1]. Специфика использования БА в морских ИНС состоит также в том, что ввиду значительного времени непрерывной работы таких ИНС (превышающего среднее время наработки на отказ БА) БА является типовым элементом замены, в связи с чем его калибровка должна быть автономной, т.е. проводиться в процессе изготовления (до установки в ИНС).

Традиционно калибровку БА проводят при разворотах его в поле силы тяжести на углы  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$  и  $180^\circ$  вокруг трех измерительных осей блока [2, 3]. Характеристики поплавковых маятниковых акселерометров зависят от углового положения „поплавок“ относительно вектора действующего ускорения, что приводит к дополнительным погрешностям калибровки при использовании модели БА с постоянными коэффициентами. Поэтому повысить точность калибровки БА морских ИНС возможно при проведении калибровки в условиях ограниченных углов разворота БА в поле силы тяжести.

Результаты разработки и исследования такой методики калибровки приведены в настоящей работе.



**Модель показаний блока акселерометров.** БА содержит три одноосных акселерометра, измерительные оси которых  $OAx Ay Az$  ориентированы по направлениям, близким к взаимно ортогональным. БА предназначается для измерения линейных ускорений, действующих вдоль осей ортогональной системы координат (СК)  $Ox_a Y_a Z_a$ , связанной с местом установки БА в гиросприборе ИНС, оси которой в общем случае не совпадают с измерительными осями акселерометров.

Модель показаний БА может быть представлена в следующем векторно-матричном виде [4, 5]:

$$\mathbf{W}^{\text{пп}} = M(A\mathbf{W} + N(W)\mathbf{W} + \mathbf{W}_0), \quad (1)$$

где

$$\mathbf{W}^{\text{пп}} = \begin{bmatrix} W_{Ax}^{\text{пп}} \\ W_{Ay}^{\text{пп}} \\ W_{Az}^{\text{пп}} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{W} = \begin{bmatrix} W_{X_a} \\ W_{Y_a} \\ W_{Z_a} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{W}_0 = \begin{bmatrix} W_{XO} \\ W_{YO} \\ W_{ZO} \end{bmatrix}; \quad M = \begin{bmatrix} M_X & 0 & 0 \\ 0 & M_Y & 0 \\ 0 & 0 & M_Z \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{\Delta\alpha}{2} & -\frac{\Delta\beta}{2} \\ -\frac{\Delta\alpha}{2} & 1 & -\frac{\Delta\gamma}{2} \\ -\frac{\Delta\beta}{2} & -\frac{\Delta\gamma}{2} & 1 \end{bmatrix}; \quad N(W) = \begin{bmatrix} N_{KX}W_{X_a} & N_{XY}W_{X_a} & N_{XZ}W_{X_a} \\ N_{YX}W_{Y_a} & N_{KY}W_{Y_a} & N_{YZ}W_{Y_a} \\ N_{ZX}W_{Z_a} & N_{ZY}W_{Z_a} & N_{KZ}W_{Z_a} \end{bmatrix}.$$

Здесь:  $\mathbf{W}^{\text{пп}}$ ,  $\mathbf{W}$ ,  $\mathbf{W}_0$  — векторы приборного, истинного ускорения и смещений „нулевых“ сигналов акселерометров, заданные проекциями на соответствующие оси;  $M_X, M_Y, M_Z$  — масштабные коэффициенты соответствующих акселерометров,  $N_{KX}, N_{KY}, N_{KZ}$  — коэффициенты нелинейности;  $N_{XY}, N_{XZ}, N_{YX}, N_{YZ}, N_{ZX}, N_{ZY}$  — коэффициенты перекрестных связей;  $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$  — углы неортогональности измерительных осей БА в плоскостях  $X_a O Y_a$ ,  $X_a O Z_a$ ,  $Y_a O Z_a$  соответственно.

**Основные положения методики.** Под калибровкой БА понимается определение параметров модели показаний БА в виде (1). Наблюдаемость параметров модели обеспечивается путем наклонов БА в поле силы тяжести на специальном стенде, при этом точность калибровки прежде всего зависит от точности измерения угла наклона.

В качестве стенда было выбрано одноосное поворотное устройство (ПУ) УМ1-Ц производства НПО „Прецизионные системы“ с предельной погрешностью измерения угла  $0,5''$ . Схема стенда (вид сверху) представлена на рис. 1. На планшайбе ПУ закреплен кронштейн с двумя гранями 1 и 2 для установки БА, расположенными под углом  $K_j = 45^\circ$  ( $j = 1, 2$  — номер грани кронштейна) к оси вращения. Грань 3 кронштейна ортогональна установочным граням и предназначена для выставки кронштейна в плоскость горизонта при помощи уровня. Стенд аттестован по параметру, характеризующему

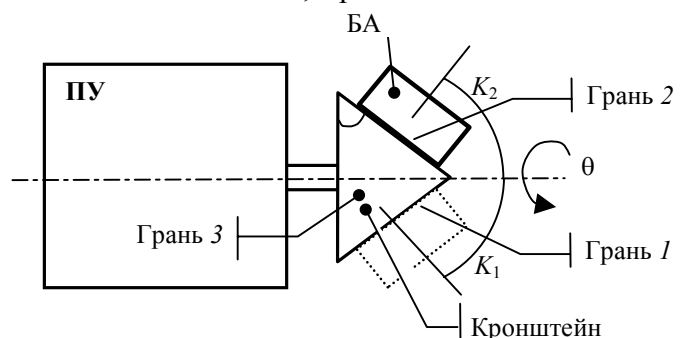


Рис. 1

угол между установочными гранями кронштейна (о необходимости и достаточности данной процедуры будет сказано ниже).

Управление разворотом ПУ и опрос данных ПУ и БА производится автоматически с помощью компьютера. БА последовательно устанавливается на грани 1 и 2 кронштейна, где производится съем осредненных данных об угле и составляющих ускорения на фиксированных углах поворота планшайбы.

**Формирование и обработка измерений.** В обеих установках БА на кронштейне измерения, на основе которых оцениваются искомые параметры модели (1), формируются ускорения как разность приборных  $\mathbf{W}_j^{\text{пп}}$  и эталонных  $\mathbf{W}_j^{\text{эт}}$  значений:

$$\mathbf{Z}_j = \mathbf{W}_j^{\text{пп}} - \mathbf{W}_j^{\text{эт}}. \quad (2)$$

Выражение для эталонного ускорения в проекциях на оси СК  $OX_a Y_a Z_a$  с учетом погрешностей установки БА на стенде имеет вид

$$\mathbf{W}_j^{\text{эт}} = \delta C_j C_j \Delta C_j \mathbf{g}, \quad (3)$$

$\Delta C_j$  — матрица ориентации СК ПУ относительно горизонтной СК, элементы которой являются известными функциями погрешностей установки грани 3 кронштейна относительно плоскости горизонта  $\Delta\psi_j, \Delta\theta_j$ ;  $C$  — матрица ориентации СК  $j$ -й грани кронштейна относительно СК ПУ, элементы которой являются известными функциями углов  $\theta, K_j$  (см. рис. 1);  $\delta C_j$  — матрица ориентации СК  $OX_a Y_a Z_a$  относительно СК  $j$ -й грани кронштейна, элементы которой являются известными функциями погрешностей установки БА на гранях кронштейна  $\delta\psi_j, \delta\theta_j, \delta K_j$ ;  $\mathbf{g}$  — вектор ускорения силы тяжести.

Согласно выражениям (1) и (3), определению подлежат 28 параметров. Особенность алгоритма обработки данных заключается в том, что он строится на основе анализа функций влияния искомых параметров. Целью алгоритма является определение 15 коэффициентов  $B_j^{i,k}$  (где  $i = X_a, Y_a, Z_a; k = 1, 2, \dots, 15$ ), стоящих при функциях аппроксимирующего выходные сигналы акселерометров гармонического ряда, и производится методом статистического оценивания. Съем измерений производится на фиксированных углах наклона БА вокруг оси стенда с малым шагом в рабочем диапазоне углов. Коэффициенты  $B_j^{i,k}$  определяются для каждого положения БА на кронштейне и представляют собой комбинации параметров акселерометров с индивидуальными для каждой грани кронштейна погрешностями установки. В качестве примера ниже приведен вид функций  $f_k(\theta)$  и выражений коэффициентов  $B_j^{i,k}$  для измерения по каналу  $X$ :

$$Z_j^X = B_j^{X,1} f_1(\theta) + B_j^{X,2} f_2(\theta) + B_j^{X,3} f_3(\theta) + B_j^{X,4} f_4(\theta) + B_j^{X,5},$$

где

$$\text{— } f_1(\theta) = g \sin \theta$$

$$B_j^{X,1} = -(1 - M_X) \cos K_0 + (-1)^j \delta K_j M_X \sin K_0 + (-1)^j \frac{\Delta\alpha}{2} M_X \sin K_0,$$

$$\text{— } f_2(\theta) = g \cos \theta$$

$$B_j^{X,2} = -\frac{\Delta\beta}{2} M_X - \delta\theta_j M_X - \Delta\theta_j \cos K_0 M_X,$$

$$— f_3(\theta) = g^2 \sin 2\theta$$

$$B_j^{X,3} = -\frac{1}{2} N_{KX} M_X \cos^2 K_0 + (-1)^j \frac{1}{2} N_{XY} M_X \cos K_0 \sin K_0,$$

$$— f_4(\theta) = g^2 \cos 2\theta$$

$$B_j^{X,4} = \frac{1}{2} N_{XZ} M_X \cos K_0,$$

$$— f_5(\theta) = 1$$

$$B_j^{X,5} = (-1)^j g \Delta \Psi_j M_X \sin K_0 + \frac{1}{2} N_{KX} g^2 M_X \cos^2 K_0 - \\ - (-1)^j \frac{1}{2} N_{XY} g^2 M_X \cos K_0 \sin K_0 + W_{XO} M_X.$$

При этом учет ненаблюдаемых углов  $\Delta\theta_j$  и  $\delta K$  производится с использованием внешних средств следующим образом: первый из них,  $\Delta\theta_j$ , сводится к нулю при помощи уровня, устанавливаемого на грань 3, а второй,  $\delta K$ , характеризующий отличие горизонтальной проекции угла между установочными гранями кронштейна от  $90^\circ$ , аттестуется оптическими средствами при сборке стенда.

Окончательный расчет параметров модели БА и погрешностей установки по коэффициентам  $B_j^{i,k}$ , полученным в обеих установках, производится путем решения системы линейных алгебраических уравнений. Знание величин масштабных коэффициентов  $M_i$ , как видно из представленных выражений, необходимо для расчета остальных параметров, поэтому они определяются в первую очередь.

Расчет производится итеративно, на каждой итерации при формировании измерений используются эталонные и приборные значения ускорений, рассчитанные с учетом погрешностей установки и параметров модели, найденных на предыдущей.

План измерений, т.е. последовательность и диапазон наклонов, выбирался с учетом описанных выше ограничений на величину входных ускорений. Съём данных производился при разворотах ПУ в диапазонах углов  $0 \pm 45^\circ$  и  $180 \pm 45^\circ$ , при этом входные ускорения в каналах  $X$ ,  $Y$  не превышали рабочего диапазона. Акселерометр канала  $Z$  в положениях  $0$  и  $180^\circ$  изменяет свою ориентацию на противоположную, однако в обоих положениях торсион остается в положении, близком к горизонтальному, т.е. условия функционирования подвеса маятника в акселерометре не изменяются.

**Результаты экспериментальной проверки методики.** Корректность разработанной методики калибровки оценивалась по сходимости итерационного процесса оценивания искомым параметров БА, повторяемости оценок параметров одного и того же БА при целенаправленном изменении погрешностей установки, а также по повторяемости оценок погрешностей установки, определяемых в процессе калибровки разных БА. В качестве характеристики сходимости алгоритма оценивания использовались невязки, формируемые для каждого из каналов как разность приборных значений ускорения, исправленных с учетом найденных параметров модели показаний, и эталонных ускорений, полученных с использованием определенных в процессе калибровки погрешностей установки блока на кронштейне. Дополнительно сходимость алгоритма оценивалась по погрешности измерения БА известной величины модуля действующего ускорения

$$\Delta g = |\mathbf{g}| - \sqrt{(W_X^{\text{пп}})^2 + (W_Y^{\text{пп}})^2 + (W_Z^{\text{пп}})^2}.$$

По результатам экспериментальной проверки методики калибровки эквивалентная погрешность измерения ускорения (в рабочем диапазоне наклонов) не превысила  $1,5 \cdot 10^{-4}$  м/с<sup>2</sup>. Характерные графики погрешностей выработки ускорений по каналам представлены на рис. 2.

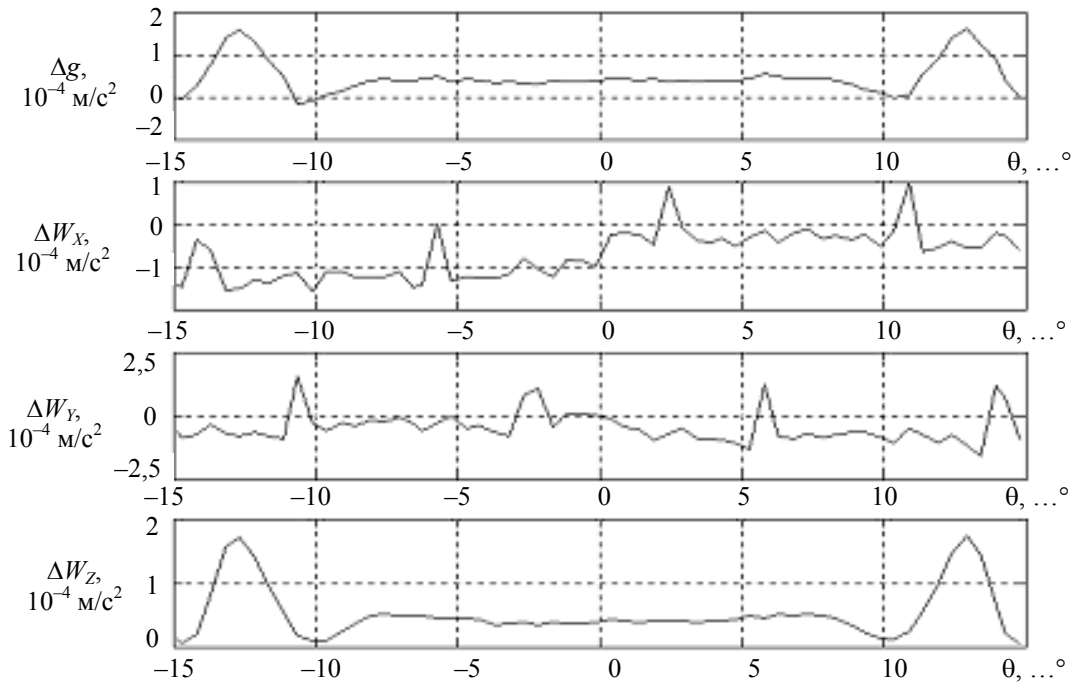


Рис. 2

Создание стенда и разработка методики калибровки позволили провести ряд дополнительных исследований БА. Так, например, на рис. 2 видно наличие дополнительных погрешностей в виде пиков на определенных значениях входного ускорения. Кроме того, в канале  $X$  наблюдается скачкообразное изменение уровня погрешности в зоне малых углов наклона. Полученные данные используются разработчиками БА для его дальнейшего совершенствования.

**Выводы.** Разработанная методика стендовой калибровки блока акселерометров корабельной ИНС на одноосном поворотном устройстве предусматривает определение параметров модели БА в рабочем диапазоне измеряемых ускорений. Калибровка производится по избыточному количеству измерений, полученных в двух установках БА, при этом погрешности установки прибора на стенде не искажают результатов калибровки. Необходимым условием использования данной методики калибровки является аттестация одноосного стенда по одному параметру – горизонтальной проекции угла между гранями кронштейна для установки БА.

Данная методика прошла экспериментальную отработку на нескольких серийных образцах БА, результаты которой подтвердили ее работоспособность и эффективность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарановский Д. О., Троицына Ю. С. Особенности калибровки трехканального измерителя ускорений корабельной инерциальной навигационной системы // Мат. VII конф. молодых ученых „Навигация и управление движением“. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2006. С. 43—49.
2. Гусинский В. З., Лесючевский В. М., Литманович Ю. А., Столбов А. А. Алгоритм калибровки трехосного блока акселерометров, предназначенного для использования в БИНС // Гироподия и навигация. 2000. № 4. С. 86.
3. Бранец В. Н., Дибров Д. Н., Рыжков В. С., Калихман Л. Я., Калихман Д. М., Полушкин А. В., Нахов С. Ф. Методика аттестации блока измерения линейного ускорения с неортогональной ориентацией осей чувствительности шести кварцевых маятниковых акселерометров и методика аттестации рабочих мест для контроля блока и акселерометров // 13-я Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2006. С. 226—232.

4. IEEE Std. 836-1991, IEEE Recommended Practice for Precision Centrifuge Testing of Linear Accelerometers.

5. Тарановский Д. О., Яковлев Е. А. Калибровка трехканального измерителя ускорений в составе инерциальной навигационной системы // Мат. VIII конф. молодых ученых „Навигация и управление движением“. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2007. С. 29—37.

**Сведения об авторе**

**Дмитрий Олегович Тарановский** — Центральный научно-исследовательский институт „Электроприбор“, Санкт-Петербург; E-mail:office@eprib.ru

Рекомендована  
ЦНИИ „Электроприбор“

Поступила в редакцию  
19.02.08 г.

---

---

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

---

---

УДК 681.587.3

П. А. Лошицкий, В. Т. Шароватов

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ ОБОЛОЧКОВОГО ТИПА

Применение оболочковых двигателей в системах управления ограничено из-за недостаточности данных о процессах, протекающих в оболочках, нужных для построения его математической модели. Показано, как на основе принципов работы, особенностей конструкции и свойств материала оболочки можно восполнить этот пробел идентификацией недостающих параметров.

*Ключевые слова:* идентификация параметров, двигатель оболочкового типа, объемно-деформационная характеристика.

**Введение.** Используя успехи современной науки и техники, разработчики не оставляют настойчивых попыток по созданию оригинальных конструкций, элементов и узлов с качественно новыми эксплуатационными характеристиками. Примером тому может служить применение специалистами по автоматизации производственных процессов силовых оболочковых элементов (СОЭ) в качестве силовых частей пневматических исполнительных двигателей (ИД) в системах автоматического управления (САУ). При этом по соотношению „цена—качество“ САУ с этими ИД в системах стабилизации, активной виброзащиты, роботостроении и т.д. выигрывают по сравнению с их электрическими или гидравлическими аналогами в сопоставимых областях применения.

Между тем для того чтобы максимально точно сформировать динамическую модель ИД на СОЭ, необходим достаточно полный спектр его статических характеристик. Однако в документах, сопровождающих новые разработки, приводят крайне ограниченный набор статических характеристик. Естественно, это сужает сферу возможного использования разработок, вынуждает пользователей проводить дополнительные дорогостоящие экспериментальные исследования, чтобы восполнить имеющиеся пробелы.

**Постановка задачи.** Подобная ситуация возникла с чрезвычайно перспективной идеей применения в качестве силовой части ИД СОЭ фирмы „FESTO“ (Германия) <www.FESTO.ru>.

В [1, 2] приведены математическая модель ИД оболочкового типа и результаты его экспериментальных исследований. В частности, передаточная функция по управлению ИД на СОЭ, полученная в [1], представлена в форме

$$W_{\text{упр}}(s) = \frac{2k_{xp}k_zQ E}{V_0(1+k_vk_{xp}2E/V_0)} \cdot \frac{1}{s \left( \frac{m}{k_F(1+k_vk_{xp}2E/V_0)} s^2 + \frac{k_{тр}}{1+k_vk_{xp}2E/V_0} s + 1 \right)}, \quad (1)$$

где  $s$  — оператор преобразования Лапласа;  $V_0$  — внутренний объем СОЭ при нейтральном положении объекта управления (ОУ);  $k_v$  — объемно-деформационный коэффициент СОЭ;  $k_{xp}$  — коэффициент, связывающий перемещение ОУ с изменением внутреннего давления в СОЭ;  $k_F$  — коэффициент передачи ИД по усилию;  $k_{zQ}$  — коэффициент, связывающий расход воздуха  $Q$  с перемещением золотника  $z$ ;  $k_{тр}$  — коэффициент вязкого трения;  $E$  — приведенный модуль упругости воздуха;  $m$  — масса ОУ, приведенная к продольной оси СОЭ.

Параметры  $k_v$ ,  $k_{xp}$ ,  $k_F$  и  $k_{zQ}$  являются коэффициентами линеаризации соответствующих статических характеристик ИД на СОЭ в диапазоне рабочих давлений.

Однако применить математическую модель в виде соотношения (1) для ИД на СОЭ фирмы „FESTO“ практически невозможно ввиду отсутствия в ее каталогах статических характеристик, необходимых для построения математической модели ИД, таких как объемно-деформационная характеристика СОЭ ( $V = f(\delta)$ ), где  $\delta$  — величина относительного сокращения длины СОЭ), объем СОЭ при нейтральном положении ОУ ( $V_0$ ), зависимость перемещения ОУ от величины давления внутри СОЭ при их дифференциальном соединении,  $X = f(\Delta p)$ .

Для обеспечения возможности инженерам-проектировщикам САУ широко использовать ИД на СОЭ, по мнению авторов, упомянутый выше пробел наиболее целесообразно восполнить идентификацией недостающих параметров.

Покажем, как это можно сделать для СОЭ типа „пневматический мускул“ (ПМ), или MAS (по классификации фирмы „FESTO“).

Пневматический мускул изготовлен из эластомера в виде герметичной оболочки, торцы которой выполнены в виде присоединительных элементов. Оболочка армирована нерастяжимыми нитями (АН), образующими ромбическую сетку. При подаче внутрь ПМ сжатого воздуха происходит деформация оболочки, что приводит к сокращению ПМ в продольном направлении и появлению значительного тянущего усилия, следовательно, СОЭ обладает свойствами силового бесштокового пневмоцилиндра одностороннего действия. Встречное (дифференциальное) включение СОЭ (по отношению к ОУ) или применение возвратной пружины позволяет создать быстродействующий высокоточный пневматический ИД малых линейных или угловых перемещений (аналог пневмоцилиндра двустороннего действия).

Примем допущение, что оболочка пренебрежимо малой толщины выполнена из материала с неограниченной эластичностью. Также будем считать, что при расширении оболочка сохраняет цилиндрическую форму, приобретая лишь на концах форму усеченного конуса (рис. 1, а).

Геометрические параметры ПМ следующие:  $d_t$  — текущее значение диаметра оболочки ПМ;  $d_n$  — начальный диаметр оболочки ПМ;  $\Delta r$  — приращение радиуса оболочки;  $x_{кт}$  — текущее значение высоты участка конической формы оболочки;  $\Delta l$  — рассматриваемый участок АН;  $\Delta y_n$  и  $\Delta x_n$  — диагональ ромба сетки АН, лежащая в поперечной и продольной плоскости ПМ соответственно в его начальном состоянии;  $\Delta y_t$  и  $\Delta x_t$  — текущее значение диагонали ромба сетки АН, лежащей в поперечной и продольной плоскости ПМ соответственно;  $l$  — длина АН ПМ;  $l_{кт}$  и  $l_{цт}$  — текущее значение длины АН на участке конической и цилиндрической формы оболочки соответственно;  $\alpha_n$  — значение угла укладки АН оболочки в начальном ее состоянии;  $\alpha_t$  — текущее значение угла укладки АН на цилиндрическом участке оболочки;  $\beta$  — угол при основании усеченного конуса;  $L_n$  — длина оболочки в несокращенном состоянии;  $L_t$  — текущее значение длины оболочки в сокращенном состоянии;  $L_{цт}$  — текущее значение длины участка цилиндрической формы оболочки;  $V_{кт}$  и  $V_{цт}$  — текущее значение объема конической и цилиндрической формы оболочки соответственно;  $V_t$  и  $V_n$  — текущее и начальное значение объема ПМ.

**Процедура идентификации.** Выделим на поверхности ПМ элементарный участок размером, не меньшим размера ромба сетки АН (рис. 1, а).

Изменение диаметра цилиндрической части оболочки при ее сокращении можно описать следующим уравнением:

$$\frac{\Delta y_{\text{H}}}{\Delta y_{\text{T}}} = \frac{\pi d_{\text{H}}}{\pi d_{\text{T}}} = \frac{2\Delta l \sin \alpha_{\text{H}}}{2\Delta l \sin \alpha_{\text{T}}}, \quad \text{или} \quad d_{\text{T}} = d_{\text{H}} \frac{\sin \alpha_{\text{T}}}{\sin \alpha_{\text{H}}}. \quad (2)$$

Для описания взаимосвязи геометрических параметров необходимо знать, как изменяется угол укладки АН на участках конической формы оболочки.

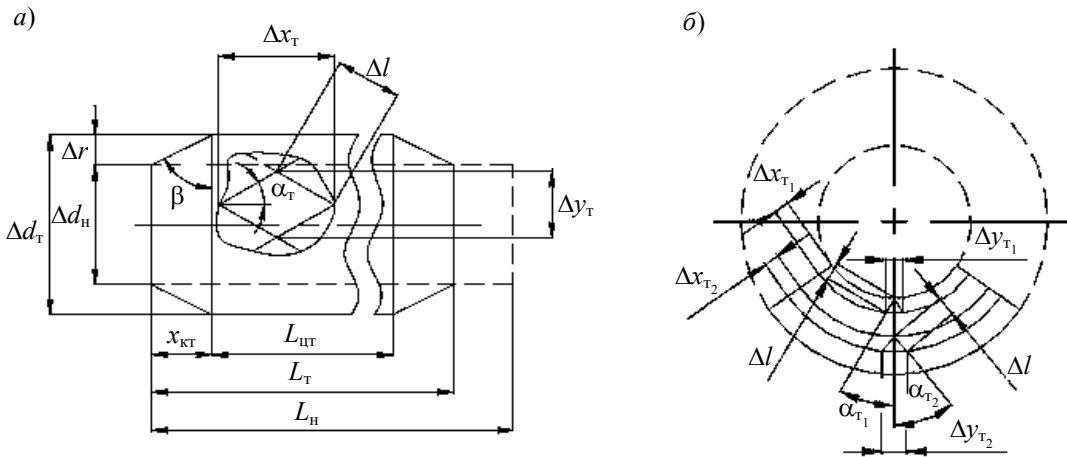


Рис. 1

Воспользуемся разверткой конического участка оболочки пневматического мускула (рис. 1, б). Выделим на развертке участки  $\Delta x_{T1}$  и  $\Delta x_{T2}$ , ограничивающие участки АН одинаковой длины  $\Delta l$ , настолько малые, что можно считать углы  $\alpha_{T1}$  и  $\alpha_{T2}$  не изменяющимися в пределах этих участков, тогда

$$\Delta y_{T_{1,2}} = 2\Delta l \sin \alpha_{T_{1,2}}. \quad (3)$$

Учитывая соотношения (2) и (3), получим следующее выражение:

$$\frac{d_{T1}}{d_{T2}} = \frac{\Delta y_{T1}}{\Delta y_{T2}} = \frac{2\Delta l \sin \alpha_{T1}}{2\Delta l \sin \alpha_{T2}} = \frac{\sin \alpha_{T1}}{\sin \alpha_{T2}}. \quad (4)$$

Зная изменение угла укладки АН на коническом участке, найдем  $l_{\text{KT}}$ . Так как

$$\Delta r = \frac{d_{\text{T}} - d_{\text{H}}}{2} = \frac{d_{\text{H}}}{2} \left( \frac{\sin \alpha_{\text{T}}}{\sin \alpha_{\text{H}}} - 1 \right), \quad (5)$$

то

$$x_{\text{KT}} = \Delta r \operatorname{tg} \beta = \frac{d_{\text{H}}}{2} \left( \frac{\sin \alpha_{\text{T}}}{\sin \alpha_{\text{H}}} - 1 \right) \operatorname{tg} \beta.$$

Перепишем выражение (5) для произвольного места на участке конической формы оболочки

$$x = \frac{d_{\text{H}}}{2} \left( \frac{\sin \alpha(x)}{\sin \alpha_{\text{H}}} - 1 \right) \operatorname{tg} \beta. \quad (6)$$

Длину АН на коническом участке ПМ найдем из следующего выражения:

$$dl_{\text{KT}} = \frac{dx}{\sin \beta \cos \alpha(x)}, \quad \text{или} \quad l_{\text{KT}} = \int_0^{x_{\text{KT}}} \frac{dx}{\sin \beta \cos \alpha(x)}. \quad (7)$$



Для решения этого интеграла подставим (6) в (7), заменив при этом пределы интегрирования соответствующим образом:

$$l_{\text{КТ}} = \frac{1}{\sin \beta} \int_{\alpha_{\text{H}}}^{\alpha_{\text{T}}} \frac{d \left( \frac{d_{\text{H}}}{2} \left( \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_{\text{H}}} - 1 \right) \text{tg} \beta \right)}{\cos \alpha} = \frac{d_{\text{H}}}{2 \sin \alpha_{\text{H}} \cos \beta} \int_{\alpha_{\text{H}}}^{\alpha_{\text{T}}} \frac{\cos \alpha d \alpha}{\cos \alpha} = \frac{d_{\text{H}} (\alpha_{\text{T}} - \alpha_{\text{H}})}{2 \cos \beta \sin \alpha_{\text{H}}}. \quad (8)$$

Найдем значение  $l_{\text{ЦТ}}$

$$l_{\text{ЦТ}} = l - 2l_{\text{КТ}}, \quad (9)$$

из которого значение  $l$  можно найти, если представить развертку оболочки ПМ в начальном состоянии с изображенными на ней АН, расположенными под некоторым углом  $\alpha_{\text{H}}$ :

$$l = \frac{L_{\text{H}}}{\cos \alpha_{\text{H}}}. \quad (10)$$

Длину цилиндрической части оболочки найдем при помощи (9) и (10):

$$L_{\text{ЦТ}} = l_{\text{ЦТ}} \cos \alpha_{\text{ЦТ}} = \left( \frac{L_{\text{H}}}{\cos \alpha_{\text{H}}} - \frac{d_{\text{H}} (\alpha_{\text{ЦТ}} - \alpha_{\text{H}})}{\cos \beta \sin \alpha_{\text{H}}} \right) \cos \alpha_{\text{ЦТ}}, \quad (11)$$

соответственно длина оболочки в сокращенном состоянии:

$$L_{\text{T}} = 2x_{\text{КТ}} + L_{\text{ЦТ}} = d_{\text{H}} \left( \frac{\sin \alpha_{\text{ЦТ}}}{\sin \alpha_{\text{H}}} - 1 \right) \text{tg} \beta + L_{\text{H}} \frac{\cos \alpha_{\text{ЦТ}}}{\cos \alpha_{\text{H}}} - d_{\text{H}} \frac{\cos \alpha_{\text{ЦТ}} (\alpha_{\text{ЦТ}} - \alpha_{\text{H}})}{\cos \beta \sin \alpha_{\text{H}}}. \quad (12)$$

Как известно, объем усеченного конуса:

$$V_{\text{КТ}} = \frac{\pi x_{\text{КТ}}}{12} (d_{\text{H}}^2 + d_{\text{T}}^2 + d_{\text{H}} d_{\text{T}}),$$

или с учетом (2) и (5) имеем:

$$V_{\text{КТ}} = \frac{\pi d_{\text{H}}^3}{24} \left( \frac{\sin^3 \alpha_{\text{ЦТ}}}{\sin^3 \alpha_{\text{H}}} - 1 \right) \text{tg} \beta,$$

$$V_{\text{ЦТ}} = L_{\text{T}} \frac{\pi d_{\text{T}}^2}{4} = \frac{\pi d_{\text{H}}^2}{4} \left( \frac{L_{\text{H}} \cos \alpha_{\text{ЦТ}}}{\cos \alpha_{\text{H}}} - \frac{d_{\text{H}} (\alpha_{\text{ЦТ}} - \alpha_{\text{H}})}{\cos \beta \sin \alpha_{\text{H}}} \right) \frac{\sin^2 \alpha_{\text{ЦТ}}}{\sin^2 \alpha_{\text{H}}}, \quad (13)$$

$$V_{\text{T}} = 2V_{\text{КТ}} + V_{\text{ЦТ}} = \frac{\pi d_{\text{H}}^2}{4} \left[ \frac{d_{\text{H}} \text{tg} \beta}{3} \left( \frac{\sin^3 \alpha_{\text{ЦТ}}}{\sin^3 \alpha_{\text{H}}} - 1 \right) + \frac{\sin^2 \alpha_{\text{ЦТ}}}{\sin^2 \alpha_{\text{H}}} \left( \frac{L_{\text{H}} \cos \alpha_{\text{ЦТ}}}{\cos \alpha_{\text{H}}} - \frac{d_{\text{H}} (\alpha_{\text{ЦТ}} - \alpha_{\text{H}})}{\cos \beta \sin \alpha_{\text{H}}} \right) \right].$$

Так как силовая характеристика ПМ в [1] представлена в виде функции от его сокращения, выраженного в процентах от ее длины —  $\delta$ , то преобразуем (12) и (13) к такому же виду и перейдем в (13) от текущего значения объема к его относительной величине:

$$\delta = \frac{L_{\text{H}} - L_{\text{T}}}{L_{\text{H}}} 100 \% = \left[ 1 - \frac{d_{\text{H}}}{L_{\text{H}}} \left( \frac{\sin \alpha_{\text{ЦТ}}}{\sin \alpha_{\text{H}}} - 1 \right) \text{tg} \beta - \frac{\cos \alpha_{\text{ЦТ}}}{\cos \alpha_{\text{H}}} + \frac{d_{\text{H}} \cos \alpha_{\text{ЦТ}} (\alpha_{\text{ЦТ}} - \alpha_{\text{H}})}{L_{\text{H}} \cos \beta \sin \alpha_{\text{H}}} \right] 100 \%, \quad (14)$$

$$\Delta = \frac{V_T}{V_H} = \frac{d_H}{L_H} \left[ \frac{\operatorname{tg} \beta}{3} \left( \frac{\sin^3 \alpha_{\text{цт}}(\delta)}{\sin^3 \alpha_H} - 1 \right) + \frac{\sin^2 \alpha_{\text{цт}}(\delta)}{\sin^2 \alpha_H} \left( \frac{L_H \cos \alpha_{\text{цт}}}{d_H \cos \alpha_H} - \frac{\alpha_{\text{цт}}(\delta) - \alpha_H}{\cos \beta \sin \alpha_H} \right) \right], \quad (15)$$

где  $\alpha_{\text{цт}}(\delta)$  — обратная функция от соотношения (14).

Используя выражения (14) и (15), построим объемно-деформационные характеристики для трех типоразмеров ПМ (рис. 2, 1 — MAS-10, 2 — MAS-20, 3 — MAS-40).

Для определения характеристики, связывающей перемещение ОУ с изменением давления внутри ПМ, входящего в состав ИД, требуется найти силовую характеристику ПМ.

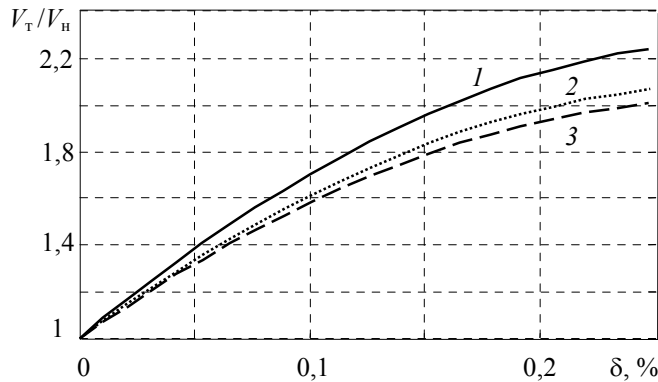


Рис. 2

На рис. 3, а представлены силы, действующие в оболочке пневматического мускула. Поясним приведенные обозначения и выполним соответствующие выкладки, используя этот рисунок:  $\Delta T$  — сила, действующая на армирующие нити оболочки;  $\Delta T_x$  и  $\Delta T_y$  — проекция силы  $\Delta T$  на ось  $x$  и  $y$  соответственно;  $F$  — осевая сила;  $p$  — внутреннее давление, действующее на оболочку.

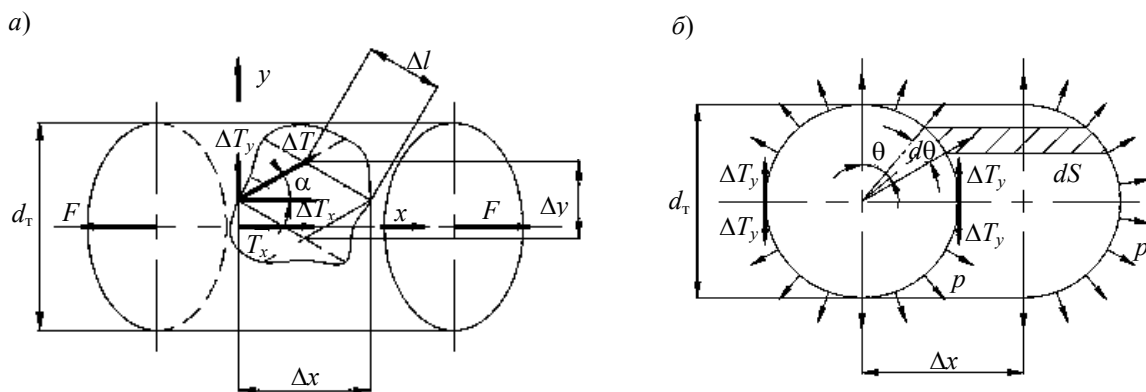


Рис. 3

При ширине рассматриваемого сегмента  $\Delta x$  и его длине  $\Delta y$  между этими параметрами существует следующая связь:

$$\Delta y = \Delta x \operatorname{tg} \alpha. \quad (16)$$

Аналогично для проекций силы  $\Delta T$  на соответствующие оси:

$$\Delta T_y = \Delta T_x \operatorname{tg} \alpha. \quad (17)$$

Значение  $T_y$  можно найти, если рассмотреть ПМ в разрезе (рис. 3, б):

$$d(\Delta T_y) = p \cos \theta dS, \quad (18)$$

где  $dS = \Delta x \frac{d_\tau}{2} d\theta$ , тогда

$$\Delta T_y = \int_0^{\pi/2} p \cos \theta \frac{d_T}{2} \Delta x d\theta = p \Delta x \frac{d_T}{2},$$

$dS$  — элементарная площадь оболочки.

Используя (16)—(18), найдем составляющую  $\Delta T_x$  силы  $\Delta T$ :

$$\Delta T_x = \frac{\Delta T_y}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{d_T \Delta x}{2 \operatorname{tg} \alpha} p = \frac{d_T \Delta y}{2 \operatorname{tg}^2 \alpha} p. \quad (19)$$

Полное значение силы получим, используя следующий интеграл:

$$T_x = \int_0^{\pi d_\alpha} p \frac{d_T}{2 \operatorname{tg}^2 \alpha} dy = p \frac{\pi d_T^2}{2 \operatorname{tg}^2 \alpha}. \quad (20)$$

Теперь полную осевую силу  $F$  (тянущее усилие) ПМ можно найти, вычитая из (20) усилия, развиваемые на торцах ПМ давлением воздуха внутри СОЭ:

$$F = T_x - p \frac{\pi d_T^2}{4} = p \frac{\pi d_T^2}{2 \operatorname{tg}^2 \alpha} - p \frac{\pi d_T^2}{4} = p \frac{\pi d_T^2}{4} \frac{2 - \operatorname{tg}^2 \alpha}{\operatorname{tg}^2 \alpha}. \quad (21)$$

Используя (2), выражение (21) можно записать следующим образом:

$$F = p \frac{\pi d_H^2}{4 \sin^2 \alpha_H} (3 \cos^2 \alpha - 1). \quad (22)$$

Изменение длины ПМ можно найти по аналогии с (2):

$$\frac{\Delta x_H}{L_H} = \frac{\Delta x_T}{L_T}, \quad \text{или} \quad \frac{\Delta l \cos \alpha_H}{L_H} = \frac{\Delta l \cos \alpha}{L_T}, \quad (23)$$

отсюда

$$\delta = \frac{L_H - L_T}{L_H} 100 \% = \frac{\cos \alpha_H - \cos \alpha}{\cos \alpha_H} 100 \%.$$

Из (23) найдем обратную зависимость угла  $\alpha$  от величины  $\delta$ :

$$\alpha = \arccos \left( \cos \alpha_H - \frac{\delta}{100 \%} \cos \alpha_H \right). \quad (24)$$

Таким образом, выражение (22) можно записать в следующем виде:

$$F = p \frac{\pi d_H^2}{4 \sin^2 \alpha_H} \left( 3 \cos^2 \alpha_H \left( 1 - \frac{2\delta}{100} + \frac{\delta^2}{100^2} \right) - 1 \right). \quad (25)$$

На рис. 4, а показана зависимость развиваемого ПМ усилия от его сокращения (силовая характеристика), приводимая фирмой „FESTO“ (сплошная кривая) для ПМ MAS-20 для давления 0,1—0,6 МПа (пунктир), и идентифицированная характеристика, полученная из выражения (25) для ПМ того же типоразмера.

Сравнив эти силовые характеристики для различных значений давления, легко заметить, что они полностью совпадают только при начальном состоянии ПМ. Это вызвано деформационными потерями в оболочке ПМ —  $F_{об}$ , которые оказывают существенное влияние

на его работу. Учтя эти потери любым из методов аппроксимации, можно скорректировать идентифицированные силовые характеристики ПМ для всех трех типоразмеров (рис. 4, б).

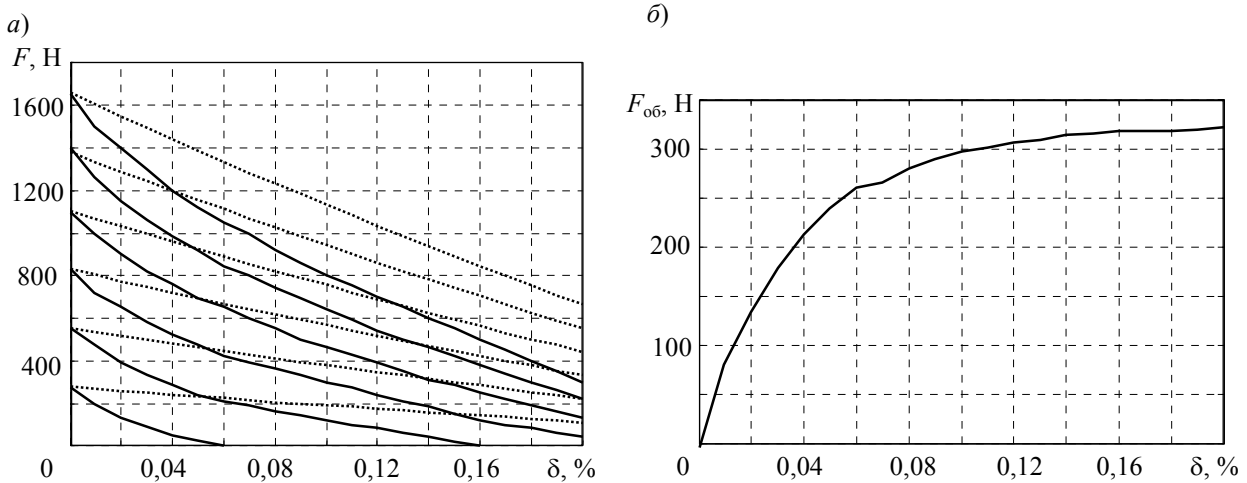


Рис. 4

Теперь можно найти характеристику, связывающую перемещение ОУ в функции от изменения давления в ПМ для ИД, выполненного по дифференциальной схеме. Усилия, развиваемые каждым из ПМ в таком ИД, с учетом изменения их длины и внутреннего давления, согласно (25), равны:

$$F_{1,2} = 3 \frac{\pi d_H^2 (p \pm \Delta p)}{4 \sin^2 \alpha_H} \left( \cos^2 \alpha_H \left( 1 - \left( \frac{\delta \pm \Delta \delta}{100} \right)^2 \right) - 1 \right) - F_{об} \left( \frac{\delta \pm \Delta \delta}{100} \right). \quad (26)$$

Так как ПМ включены встречно и уравнивают друг друга в статике, то

$$F_1 = F_2. \quad (27)$$

Используя (26) и (27), получим следующее выражение:

$$\Delta p = \frac{3\pi d_H^2 p \left( 1 + \frac{\delta}{100} \right) \frac{\Delta \delta}{100} + F_{об} \left( \frac{\delta + \Delta \delta}{100} \right) - F_{об} \left( \frac{\delta - \Delta \delta}{100} \right)}{2 \operatorname{tg}^2 \alpha_H \left( \frac{2}{3} - \frac{2\delta}{100} - \frac{\delta^2 - \Delta \delta^2}{100^2} \right)}. \quad (28)$$

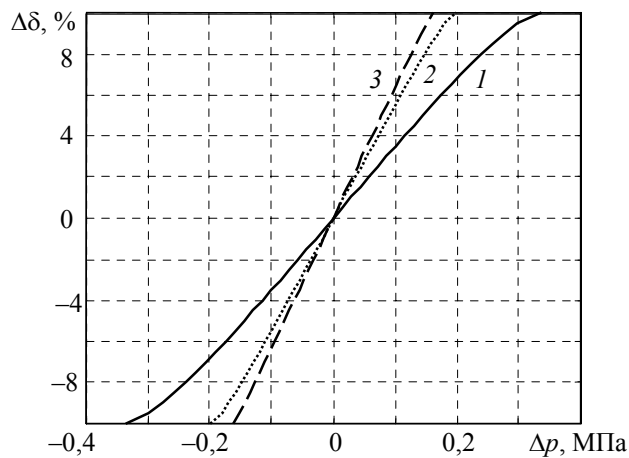


Рис. 5

Соотношение (28) позволяет построить обратную зависимость  $\Delta \delta$  от  $\Delta p$ . Эти зависимости для трех типоразмеров (1 — MAS-10, 2 — MAS-20, 3 — MAS-40) ПМ приведены на рис. 5. Для получения зависимости  $X = f(\Delta p)$  можно воспользоваться следующим выражением:

$$X = \frac{\Delta \delta}{100 \%} L_H. \quad (29)$$

**Заключение.** Применение геометрического подхода к решению задачи идентификации ряда статических характеристик СОЭ фирмы „FESTO“ подтвердило его целесообразность и эффективность для решения данного круга задач.

Последующее сопоставление силовых характеристик ПМ, полученных путем идентификации и заявленных в каталоге (см. <www.FESTO.ru>), позволило скорректировать

итоговый результат, который представлен в виде статических характеристик для трех типовых размеров ПМ, отсутствующих в каталоге фирмы-изготовителя.

Таким образом, совокупность идентифицированных статических характеристик, представленных в настоящей статье, вместе с экспериментальными силовыми характеристиками, имеющимися в электронном каталоге продукции компании „FESTO“, позволяют сформировать в рамках принятых ограничений достаточно полную математическую модель ИД на СОЭ типа ПМ с целью создания САУ с высокими эксплуатационными показателями.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Липатов А. А., Марти А. Н., Шароватов В. Т.* Исследование статики и динамики оболочкового гидропневмодвигателя // Изв. вузов. Машиностроение. 2002. № 4. С. 36—49.
2. *Липатов А. А., Шароватов В. Т.* Экспериментальное исследование пневматических исполнительных двигателей оболочкового типа // Изв. вузов. Машиностроение. 2005. № 3. С. 17—23.

#### Сведения об авторах

- Петр Анатольевич Лошицкий** — Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург;  
E-mail: adressad@pochta.ru
- Валерий Тимофеевич Шароватов** — Балтийский государственный технический университет им. Д. Ф. Устинова („Военмех“), кафедра мехатроники и робототехники, Санкт-Петербург; E-mail: kaf\_nl@bstu.spb.su

Рекомендована кафедрой  
мехатроники и робототехники

Поступила в редакцию  
26.02.08 г.

УДК 629.194

Б. И. ПОЛЕТАЕВ, В. Д. АТАМАСОВ, А. В. БЕЛЯНКИН, Д. Ю. МИХАЙЛОВ,  
А. В. ЛЕВАНДОВИЧ, М. М. ПОЛУЯН

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ МЕТЕОРНЫХ ЧАСТИЦ НА ПОВЕРХНОСТЬ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

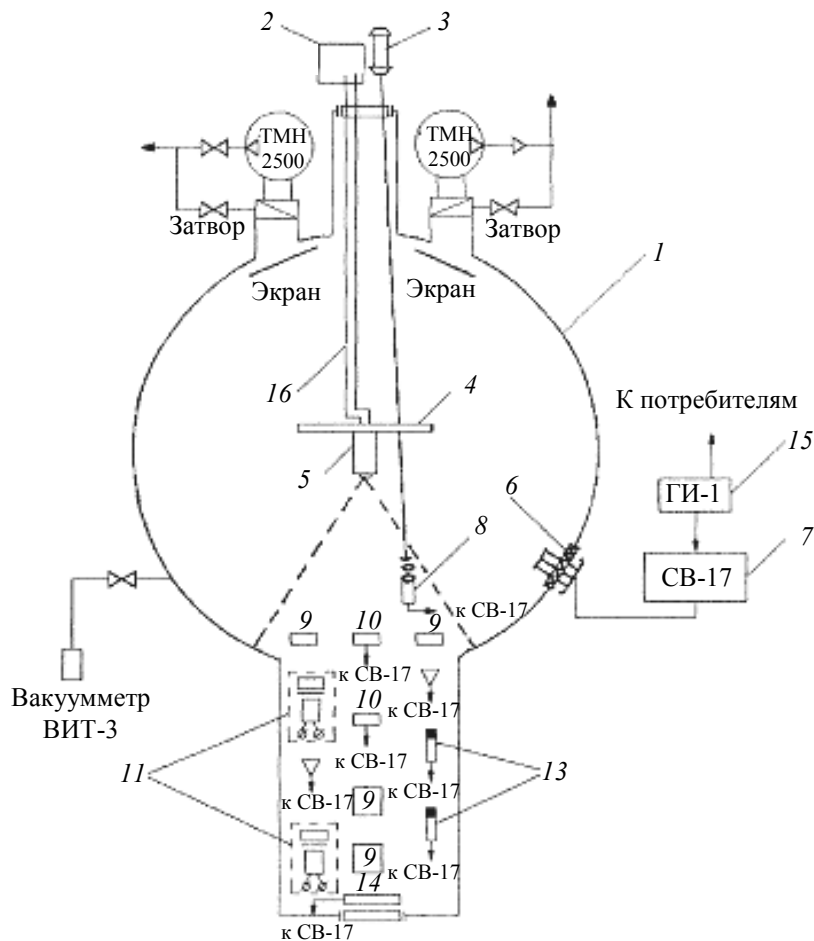
Приведено описание экспериментального комплекса, позволяющего имитировать условия космического пространства, для проведения экспериментальных исследований воздействия факторов естественного и искусственного происхождения на функционирование космического аппарата. Комплекс позволяет получить сведения, используемые при проектировании космического аппарата, об изменении физических характеристик внешних элементов бортовых систем и деградации их свойств в процессе летной эксплуатации.

**Ключевые слова:** метеорный поток, высокоскоростные частицы, космический аппарат, взрывчатое вещество.

В космическом пространстве в поле тяготения Солнца движутся твердые частицы, называемые метеорами. Метеорные потоки (рои) и спорадические метеоры образуются при разрушении комет и астероидов. Максимальная скорость частиц относительно Солнца на расстоянии около 150 млн километров (среднее расстояние между Землей и Солнцем) составляет 42 км/с. Скорость частиц относительно Земли, имеющей, в свою очередь, орбитальную скорость 30 км/с, находится в пределах 12—72 км/с [1]. Поверхность космических аппаратов (КА), находящихся в околоземном пространстве, подвергается

бомбардировке метеорами. В частности, на третьем искусственном спутнике Земли была зафиксирована частота 4—11 ударов в секунду частицами массой приблизительно  $10^{-8}$  г. При прохождении метеорного потока космический аппарат „Марс-1“ подвергался в среднем 104 ударам малых частиц в секунду.

Физическая картина взаимодействия поверхности конструкции КА с метеорной частицей сложна, поэтому для оценок влияния соударений на работоспособность бортовых энергоизлучающих систем используются соотношения, полученные эмпирическим путем. Для осуществления таких исследований был создан экспериментальный комплекс [2], позволяющий в наземных условиях имитировать условия космического пространства. Принципиальная схема комплекса ВК-1 представлена на рисунке. Здесь 1 — вакуумная камера, 2 — высоковольтный детонатор, 3 — лазер, 4 — бронеплита (выступающая в качестве защитного экрана), 5 — генератор потока высокоскоростных малодисперсных частиц (МДЧ), 6 — гермоприводы, 7 — осциллограф С8-17, 8 — фотоэлектронный умножитель, 9 — панель с исследуемыми образцами для определения диаметра и плотности МДЧ, 10 — индукционный датчик, 11 — динамический импактор, 12 — пьезодатчик, 13 — контактный датчик, 14 — устройство щелевой развертки, 15 — генератор импульсов, 16 — пиропровод (тоководы).



Основу комплекса составляет вакуумная камера 1 объемом  $15 \text{ м}^3$  с двумя цилиндрическими удлинителями и вакуумной системой, позволяющей с помощью двух турбомолекулярных насосов ТМН-2500 получать остаточное давление в объеме камеры порядка  $10^{-5}$  мм рт.ст.

Потоки высокоскоростных МДЧ создавались с помощью взрывных генераторов 5, ускоряющих частицы до требуемой скорости. Варьирование скорости частиц в экспериментах

осуществлялось подбором типа взрывчатого вещества (октоген, гексоген, тетрил и окфол) и наполнителя (например,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), температура возгорания равнялась  $335^\circ\text{C}$ . При проведении экспериментов использовались заряды. Подрыв зарядов производился с помощью высоковольтных детонаторов 2, существенно снижающих задержки срабатывания по сравнению с низковольтными детонаторами.

В качестве мишеней использовались фрагменты реальных элементов КА (солнечных батарей, стекол иллюминаторов), закрепленных на панели 9. Регистрация скорости и концентрации МДЧ осуществлялась контактными и оптическими методами, а также методами динамической селекции потоков частиц.

Для реализации контактного метода использовались датчики замыкания, основанные на внедрении токопроводящих МДЧ в тонкий диэлектрический слой, расположенный между двумя электродами.

Измерение диаметров частиц и их плотности в различных областях потока производилось с помощью экспонирования фольги различной толщины, на которой после срабатывания генератора МДЧ оставались характерные пробоины. Для исследования дефектов на поверхности элементов применялись оптическая и сканирующая электронная микроскопия, а также микрозондный анализ.

Динамическая селекция МДЧ осуществлялась с помощью щелевых регистраторов обтюраторного и барабанного типов. Скорость частиц в потоке определялась по скорости вращения диска и барабана с учетом следов, оставленных МДЧ на экране из фольги и на пленке, при известном расстоянии от генератора до датчиков.

С целью экспериментального изучения способности малодисперсной среды осуществлять экранирование лучеиспускающих поверхностей выносных и корпусных радиаторов приборных отсеков, а также холодильников-излучателей ядерных энергоустановок был разработан измерительный прибор, использующий аналог солнечного излучения. Поток света направлялся поперек струи МДЧ, истекающей из генератора, и воспринимался фотоэлементом, сила тока которого тарировалась с помощью вольфрамных сеток с известной геометрией ячеек.

Влияние факторов воздействия высокоскоростных МДЧ на функциональные характеристики элементов систем КА анализировалось путем сведения многофакторного эксперимента к однофакторному, в котором осуществлялось поочередное изменение одного параметра при фиксированных значениях других параметров. Проводились также эксперименты по исследованию воздействия отдельных тел размером до 1 см, моделирующих отдельные обломки компонент космического мусора, на материалы конструкции КА при скорости до 8 км/с.

Таким образом, разработанный экспериментальный комплекс позволяет формировать высокоскоростные потоки МДЧ с заданным распределением скоростей и флюенсов потоков частиц, определять основные параметры потоков частиц и исследовать механизмы воздействия МДЧ на элементы космического аппарата. Результатом исследований явилось получение нелинейных зависимостей функциональных характеристик элементов систем КА от параметров потоков модельных техногенных частиц.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аскеров Ф. А., Атамасов В. Д., Полетаев Б. И. Космонавтика XXI века и ядерные термоэмиссионные энергетические установки / Под ред. А. П. Ковалева, В. Ф. Фатеева. СПб: „РДК-принт“, 2002. 384 с.
2. Инженерный справочник по космической технике / Под ред. А. В. Солодова. М.: Воениздат, 1977. 430 с.

	<i>Сведения об авторах</i>
<i>Борис Иванович Полетаев</i>	— Генеральный директор, генеральный конструктор Конструкторского бюро „АРСЕНАЛ“ им. М. В. Фрунзе, Санкт-Петербург
<i>Владимир Дмитриевич Атамасов</i>	— Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург
<i>Александр Васильевич Белянкин</i>	— Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург; тел. 8-911-151-7935
<i>Дмитрий Юрьевич Михайлов</i>	— Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург
<i>Александр Витальевич Левандович</i>	— Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург
<i>Максим Михайлович Полуян</i>	— Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург

Рекомендована академией

Поступила в редакцию  
21.11.07 г.

УДК 629.785

Н. Ф. АВЕРКИЕВ, С. А. ВАСЬКОВ, В. В. САЛОВ

## БАЛЛИСТИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СВЯЗИ И ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рассматриваются принципы баллистического построения систем космических аппаратов (КА) связи и пассивной радиолокации лунной поверхности. Обосновано положение начальных фазовых векторов состояния КА в лагранжевых точках либрации системы Земля—Луна с целью обеспечения наилучшего обзора лунной поверхности на фиксированном временном интервале. Даны оценки площадных показателей обзора лунной поверхности системой КА, расположенных в лагранжевых точках либрации системы Земля—Луна.

**Ключевые слова:** лунная поверхность, точка либрации Луны, система космических аппаратов.

В космических программах ведущих стран мира возросла заинтересованность в освоении Луны и окололунного космического пространства [1, 2]. При этом все большую практическую значимость приобретает использование точек либрации Луны (от лат. *libratio* — качание, колебание) — таких точек в системе Земля—Луна, в которых третье тело с пренебрежимо малой массой, на которое не действуют никакие другие силы, кроме гравитационных со стороны Земли и Луны, может оставаться неподвижным относительно этих тел. Однако на практике на материальное тело пренебрежимо малой массы помимо гравитационных сил Земли и Луны оказывают воздействие и другие возмущающие силы, обусловленные притяжением Солнца, других планет, нецентральностью гравитационного поля Земли, световым давлением.

Всего существует пять точек либрации Луны (рис. 1). Три точки  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  были открыты Л. Эйлером в 1767 г. Они находятся на прямой, проходящей через центры масс Земли ( $O_3$ ) и Луны, и являются неустойчивыми точками либрации Луны. Космические частицы, попадающие в окрестность эйлеровой точки либрации с нулевой скоростью (относительно этой точки), из-за действия возмущающих сил с течением времени покидают ее окрестности.

В 1772 г. Ж. Лагранжем были найдены еще две точки пространства  $L_4$  и  $L_5$  (рис. 1), являющиеся точками устойчивого равновесия. Если в район этих точек попадает какой-либо



объект с нулевой начальной скоростью (во вращающейся системе Земля—Луна), то при отсутствии сильных возмущений он будет длительное время совершать колебательные движения в окрестности этой точки.

Практический интерес представляет использование космического пространства в окрестностях лагранжевых точек либрации благодаря следующим свойствам. Здесь нет атмосферы, являющейся одним из основных факторов, ограничивающих возможности астрономических и астрофизических наблюдений с Земли. Практически отсутствуют магнитное поле и радиационные пояса, затрудняющие изучение потоков заряженных частиц с искусственных спутников Земли в ближнем космосе. Длительность непрерывных наблюдений космических объектов практически не ограничена в любых направлениях. Постоянная освещенность Солнцем упрощает решение проблемы снабжения космических станций электроэнергией [3].

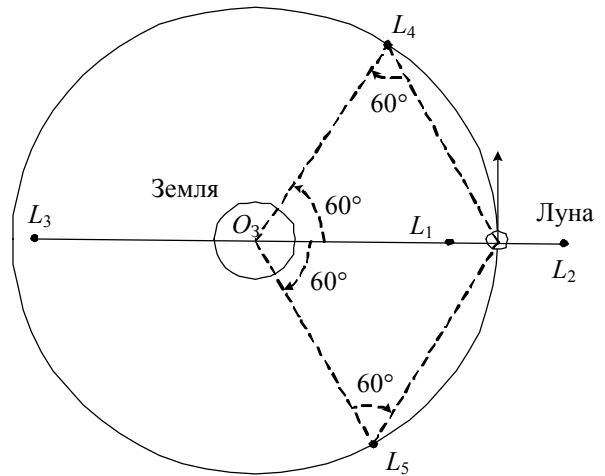


Рис. 1

Размещение КА и станций, оснащенных специальной аппаратурой, в точках либрации  $L_4$  и  $L_5$  не потребует дополнительных затрат энергии для удержания их в окрестностях этих точек и позволит решать такие задачи, как

- а) пассивная радиолокация лунной поверхности;
- б) обеспечение потребителей связью:
  - ретрансляция сообщений на Землю с лунной поверхности, в том числе и с обратной стороны Луны, а также с Земли на Луну;
  - ретрансляция команд для управления космическими аппаратами и станциями.

Пассивная радиолокация обеспечивает мониторинг поверхности Луны, т.е. систематическое слежение, сбор информации, контроль за Луной и деятельностью на ее поверхности международных организаций с целью выявления нарушений соглашений по осуществлению деятельности на Луне и своевременного доведения данной информации до потребителя.

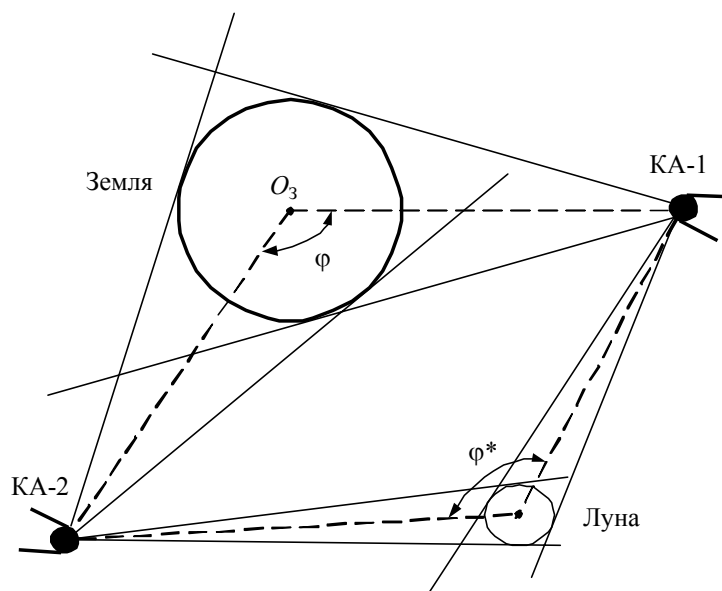


Рис. 2

Система из двух КА, размещенных в различных лагранжевых точках либрации системы Земля—Луна, позволяет осуществлять обзор лунной ( $\varphi^*$ ) и земной ( $\varphi$ ) поверхности (рис. 2). При этом будем считать, что с объектом, находящимся в зоне обзора, может устанавливаться связь, а также возможна пассивная радиолокация этого объекта.

В зависимости от целевых задач, выполняемых КА, к обзору лунной поверхности системой КА можно выдвинуть следующие требования:

- а) для ретрансляции сигналов с лунной поверхности на фиксированном интервале времени необходимо обеспечить постоянный обзор площади поверхности Луны не менее заданной из возможных на этом временном интервале;

б) при пассивной радиолокации лунной поверхности необходимо обеспечить максимально возможный обзор площади поверхности Луны на фиксированном интервале времени;

в) для решения ряда задач (например, приема собственного излучения от лунной поверхности и предметов, расположенных на ней) необходимо, чтобы обзор площади поверхности Луны в среднем был максимальным из возможных за фиксированный интервал времени.

Анализ движения КА в окрестностях лагранжевых точек либрации Луны [4] показывает, что из-за воздействия возмущающих сил КА не будут неподвижными относительно этих точек, а будут перемещаться в их окрестностях — удаление КА от точки  $L_4$  ( $L_5$ ) может достигать при этом 280 000 км. На рис. 3 представлено движение КА относительно точки либрации системы Земля—Луна  $L_5$  ( $t = 1460$  суток):  $a$  — движение в плоскости орбиты Луны (отклонение КА от точки  $L_5$  по осям  $X$ ,  $Y$ );  $b$  — зависимость расстояния  $r$  между точкой  $L_5$  и КА от времени;  $в$  — зависимость скорости КА  $V$  относительно точки  $L_5$  от времени.

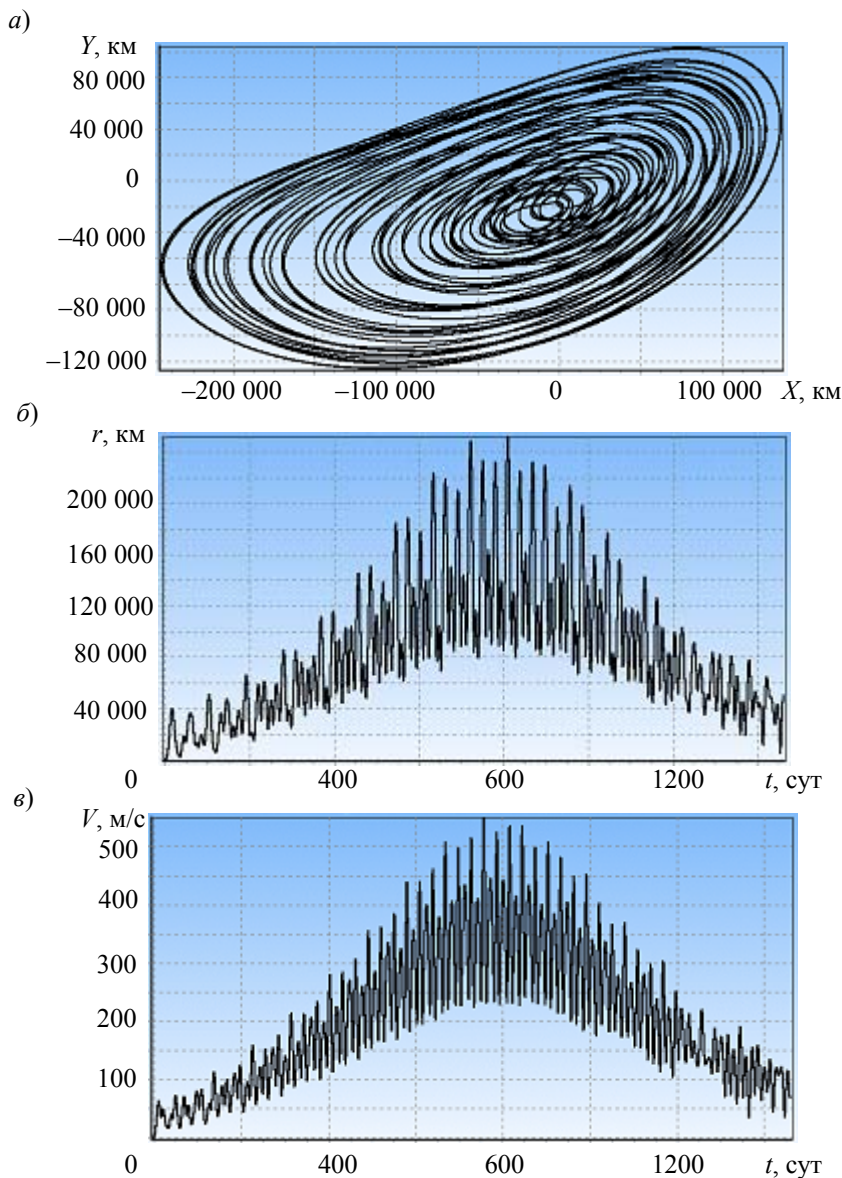


Рис. 3

При численном исследовании движения КА вблизи лагранжевой точки либрации могут быть использованы системы координат, описанные в работах Б. Д. Тэпли, Дж. М. Льюэллена, Б. Е. Шульца и А. П. Маркеева [4].

Предполагается, что Земля и Луна движутся по круговым орбитам относительно их общего центра масс —  $O$ , при этом центр масс относительно Солнца движется также по круговой орбите. Каждое из тел является материальной точкой.

Вращающаяся система координат  $O\xi\eta\zeta$  связана с центром масс Земли и Луны, ее ось  $O\xi$  направлена вдоль линии, соединяющей центры масс Земли и Луны, ось  $O\eta$  лежит в плоскости орбиты Земли и Луны, а ось  $O\zeta$  направлена по вектору угловой скорости движения Земля—Луна.

Система координат (СК)  $L_4x_4y_4z_4$  имеет своим началом точку либрации  $L_4$  и получается из системы координат  $O\xi\eta\zeta$  параллельным переносом. Система координат  $L_5x_5y_5z_5$  имеет своим началом точку либрации  $L_5$  и получается из системы координат  $O\xi\eta\zeta$  также параллельным переносом (рис. 4).

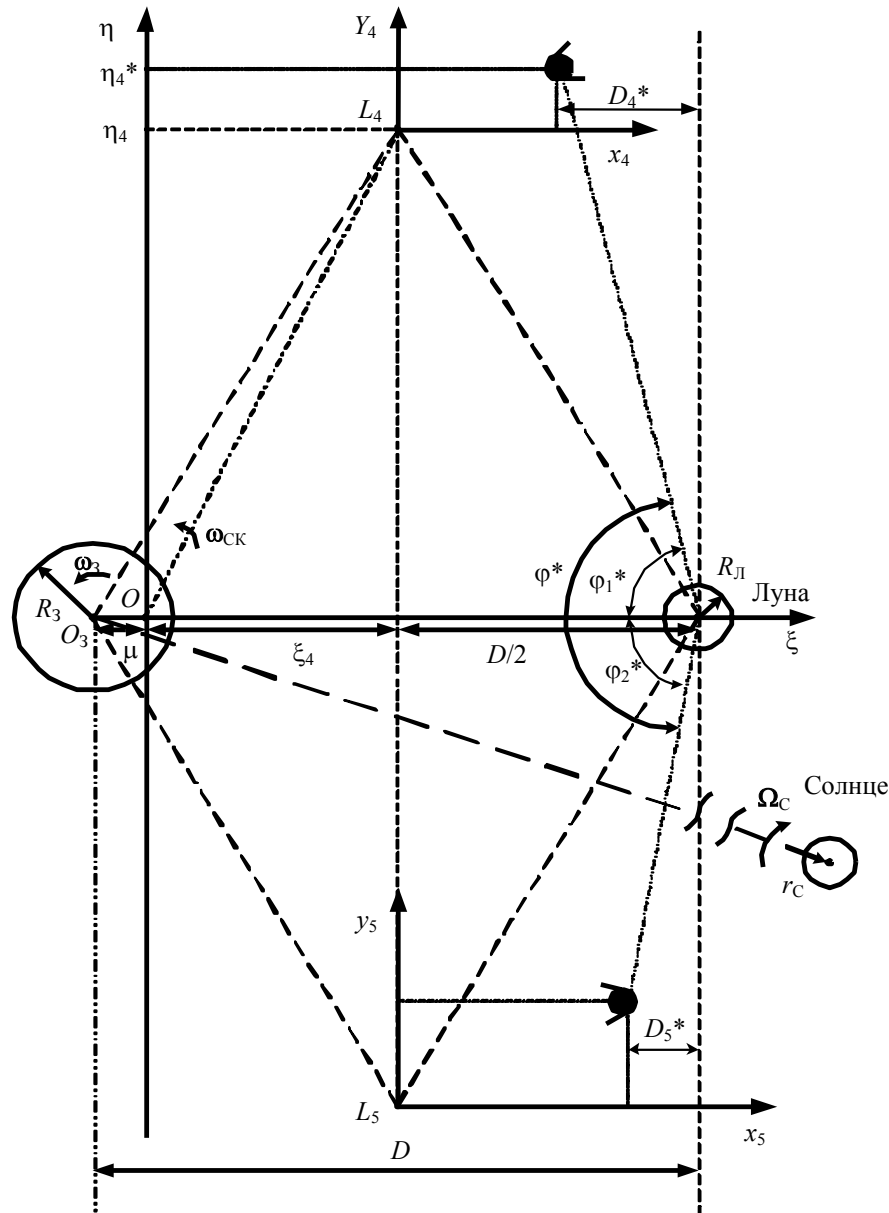


Рис. 4

Здесь  $\omega_{СК}$  — угловая скорость вращения системы Земля—Луна,  $R_{Л}$  — радиус Луны,  $r_{С}$  — расстояние от центра масс Земли до центра масс Солнца,  $R_3$  — радиус Земли,  $\Omega_{С}$  — угловая скорость вращения системы Земля—Луна относительно Солнца,  $\omega_3$  — угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси —  $7,292 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ .

Обозначим КА, выполняющий целевые задачи из окрестности точки либрации  $L_4$  — КА-1, из окрестности точки либрации  $L_5$  — КА-2. Для обзора поверхности Луны важно взаимное расположение КА-1 и КА-2. Так, при наилучших условиях, когда селеноцентральный угол (центр Луны—КА) между КА ( $\varphi^*$ ) приблизительно равен  $160^\circ$ , обзор Луны составляет до 94,2 %, а при наихудших условиях, когда селеноцентральный угол  $\varphi^*$  между КА-1 и КА-2 приблизительно равен  $80^\circ$ , обзор Луны не превышает 72 %.

Одномоментное выведение КА-1 и КА-2 практически нереально, поэтому развертывание системы КА целесообразно производить поэтапно. Например, доставить КА-1 в точку  $L_4$ , а затем создать систему КА обзора выведением КА-2 в точку  $L_5$ . Лучших показателей обзора Луны на некотором фиксированном временном интервале можно достичь вариацией начальных условий движения КА-2 на момент времени постановки его в систему с учетом вектора состояния КА-1.

Пусть в общем случае текущие координаты КА-1 описываются вектором состояния  $\mathbf{X}^{(1)} = [x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_6^{(1)}]^T$ , а текущие координаты КА-2 —  $\mathbf{X}^{(2)} = [x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots, x_6^{(2)}]^T$ .

Эти координаты изменяются во времени согласно системе дифференциальных уравнений движения:

$$\dot{x}_i^{(k)} = f_i^{(k)}(\mathbf{X}^{(k)}, t) \quad i = 1(1)6, k = 1, 2, \quad (1)$$

где  $f_i^{(k)}(\mathbf{X}^{(k)}, t)$  — функции текущих координат  $\mathbf{X}^{(k)} \in \Omega_{\mathbf{X}^{(k)}}$  и времени  $t \in [t_1; t_2]$  ( $t_1$  и  $t_2$  — время начала и окончания обзора лунной поверхности соответственно);  $\Omega_{\mathbf{X}^{(k)}}$  — множество допустимых значений  $\mathbf{X}^{(k)}$ , границы которого зависят от времени нахождения  $k$ -го КА в окрестности точки либрации Луны от момента выведения до момента выхода за ее пределы.

Исходя из выдвинутых выше требований к обзору лунной поверхности возможна реализация одной из следующих задач баллистического построения системы КА. Среди всех возможных  $\mathbf{X}^{(2)}(t_1) \in \Omega_{\mathbf{X}^{(2)}}$  необходимо найти один, доставляющий максимум:

а) наименьшему на интервале времени  $t \in [t_1; t_2]$  углу  $\varphi^*$ :

$$J = \max_{\mathbf{X}^{(2)} \in \Omega_{\mathbf{X}^{(2)}}} \min_{t \in [t_1; t_2]} \varphi^*(\mathbf{X}^{(1)}, \mathbf{X}^{(2)}, t); \quad (2)$$

б) на интервале времени  $t \in [t_1; t_2]$  углу  $\varphi^*$ :

$$J = \max_{\substack{\mathbf{X}^{(2)} \in \Omega_{\mathbf{X}^{(2)}} \\ t \in [t_1; t_2]}} \varphi^*(\mathbf{X}^{(1)}, \mathbf{X}^{(2)}, t); \quad (3)$$

в) на интервале времени  $t \in [t_1; t_2]$  среднему значению угла  $\varphi^*$ :

$$J = \max_{\mathbf{X}^{(2)} \in \Omega_{\mathbf{X}^{(2)}}} \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} \varphi^*(\mathbf{X}^{(1)}, \mathbf{X}^{(2)}, t) dt. \quad (4)$$

Определив вектор состояния  $\mathbf{X}^{(2)}(t_1)$ , зная движение этой точки относительно точки либрации  $L_5$ , необходимо доставить в нее КА-2 до времени начала обзора лунной поверхности  $t_1$ .

Из анализа, проведенного Х. Шехтером [5], следует, что на движение КА вне плоскости орбит Земли и Луны Солнце оказывает незначительное воздействие, а влияние пространственности движения КА на проекцию его траектории на плоскость орбит Земли и Луны пренебрежимо мало.

С учетом вышеизложенного селеноцентральный угол обзора между КА-1 и КА-2 ( $\varphi^*$ ) на фиксированное время рассчитывается с помощью следующих зависимостей:

$$\operatorname{tg} \varphi_1^* = \frac{\eta_{L_4}^*}{D_4^*} = \frac{\eta_{L_4} + y_{L_4}}{D - \mu - \xi_{L_4} - x_{L_4}}, \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2^* = \frac{\eta_{L_5}^*}{D_5^*} = \frac{y_{L_5} - \eta_{L_4}}{D - \mu - \xi_{L_4} - x_{L_5}}, \quad (6)$$

$$\xi_4 = \frac{D}{2} - \mu, \quad \eta_4 = \sqrt{D^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}, \quad \mu = \frac{m_2}{m_1 + m_2} D, \quad (7)$$

$$\varphi^* = \varphi_1^* + \varphi_2^*, \quad (8)$$

где  $D$  — расстояние между центрами масс Земли и Луны;  $\eta_{L_4}, \xi_{L_4}$  — константы, являющиеся координатами лагранжевой точки  $L_4$  в системе координат  $O\xi\eta\zeta$ ;  $m_1, m_2$  — массы Земли и Луны соответственно;  $\mu$  — расстояние от центра масс Земли до центра масс системы Земля—Луна.

Решение указанных задач проведено при следующих исходных данных (численные значения выбраны произвольным образом и в каждом конкретном случае зависят от времени выведения КА-1 и КА-2, начала и окончания просмотра поверхности Луны и т.д.):

— КА-1 выведен 19.04.2004 в 12:29:23,4 в точку  $L_4$  с нулевыми отклонениями по координатам и проекциям скоростей в СК  $L_4x_4y_4z_4$ ;

— пусть КА-2 необходимо поставить в систему КА 16.10.2004 в 12:29:23,4 в точку  $L_5$ ;

— область допустимых отклонений  $\Omega_{X^{(2)}}$  при выведении КА-2 рассчитана при условии дальнейшего существования в ней КА не менее 10 лет;

— время начала обзора Луны 19.04.2005 в 12:29:23,4, продолжительность обзора составляет один год.

Расчеты проведены численным интегрированием точных уравнений движения. Получены следующие результаты:

а) на заданном интервале времени можно обеспечить максимальный постоянный обзор не менее 77,32 % поверхности Луны при выведении КА-2 в окрестность точки либрации  $L_5$  с отклонениями от этой лагранжевой точки  $\mathbf{X}^{(2)} = [-10\,000 \text{ км}; -5000 \text{ км}; 0; -0,005 \text{ км/с}; 0,01 \text{ км/с}; 0]^T$ , что соответствует  $J^{\text{opt}} = 99,18^\circ$ .

б) на заданном интервале времени можно обеспечить максимальный обзор не менее 93,15 % поверхности Луны при выведении КА-2 в окрестность точки либрации  $L_5$  с отклонениями от этой лагранжевой точки  $\mathbf{X}^{(2)} = [200 \text{ км}; -1100 \text{ км}; 0; -0,025 \text{ км/с}; 0,02 \text{ км/с}; 0]^T$ , что соответствует  $J^{\text{opt}} = 156,16^\circ$ .

в) на заданном интервале времени можно обеспечить максимальный обзор в среднем не менее 82,77 % поверхности Луны при выведении КА-2 в окрестность точки либрации  $L_5$  с отклонениями от этой лагранжевой точки  $\mathbf{X}^{(2)} = [-4900 \text{ км}; 1000 \text{ км}; 0; 0,01 \text{ км/с}; 0,02 \text{ км/с}; 0]^T$ , что соответствует  $J^{\text{opt}} = 118,79^\circ$ .

Для сравнения можно отметить, что для этих же исходных данных при наихудшем, с точки зрения выбранного критерия, выведении КА-2 результаты обзора будут следующими:

а) максимально возможный постоянный обзор составит не менее 73,22 % поверхности Луны;

б) максимально возможный обзор составит не менее 87,95 % поверхности Луны;

в) максимально возможный обзор составит в среднем не менее 81,72 % поверхности Луны.

Таким образом, для рассмотренного варианта исходных данных выбором начальных условий движения КА-2 можно варьировать площадными показателями в зависимости от требований, предъявляемых к обзору лунной поверхности, соответственно:  $\Delta S(\varphi_{\min}^*) = 1\,557\,333,73$ ,  $\Delta S(\varphi_{\max}^*) = 1\,974\,872,1$ ,  $\Delta S(\varphi_{\text{ср}}^*) = 339\,613,73$  км<sup>2</sup> поверхности Луны.

При этом представленные показатели обзора Луны относятся непосредственно к ненаблюдаемой с Земли лунной поверхности.

Размещенные в результате решения задачи баллистического построения системы КА в лагранжевых точках либрации системы Земля—Луна два космических аппарата или станции, оснащенные соответствующей аппаратурой, обеспечат в течение фиксированного промежутка времени обслуживание лунной поверхности с наилучшими показателями обзора. Это позволит проводить мониторинг лунной поверхности и ретранслировать сигналы с 94,2 % площади Луны, контролировать соблюдение международных соглашений более чем на 90 % территории Луны, ретранслировать команды для управления космическими аппаратами и станциями, находящимися на околоземных и окололунных орбитах, осуществляющими перелет от Земли к Луне и обратно, а также посадку на обратную поверхность Луны и стартующими с нее.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черный И. Подробности китайской программы исследования Луны // Новости космонавтики. 2005. № 1. С. 48.
2. Павельцев П. Российские приборы на новых американских АМС // Новости космонавтики. 2005. № 2. С. 49.
3. Брыков А. В. Станция в точке либрации // Авиация и космонавтика. 1987. № 7. С. 42.
4. Маркеев А. П. Точки либрации в небесной механике и космодинамике. М.: Наука, 1978. 312 с.
5. Шехтер Х. Нелинейный анализ трехмерной устойчивости равносторонних точек системы Земля—Луна с учетом возмущений от Солнца // Ракетная техника и космонавтика. 1967. № 7. С. 9—15.

#### Сведения об авторах

- Николай Федорович Аверкиев** — Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра баллистики ракет-носителей и полета космических аппаратов, Санкт-Петербург
- Сергей Арсеньевич Васьков** — Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра баллистики ракет-носителей и полета космических аппаратов, Санкт-Петербург
- Вячеслав Викторович Салов** — Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра баллистики ракет-носителей и полета космических аппаратов, Санкт-Петербург

Рекомендована кафедрой  
баллистики ракет-носителей  
и полета космических аппаратов

Поступила в редакцию  
09.10.07 г.

А. А. Колчев, В. В. Шумаев, А. О. Щирый

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТОВ МНОГОЛУЧЕВОГО ИОНОСФЕРНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОТКИХ ВОЛН

Описан аппаратно-программный измерительный комплекс, предназначенный для исследования многолучевого распространения коротких волн (КВ). В комплексе использована аппаратура наклонного зондирования ионосферы сигналами с линейно-частотной модуляцией. По данным зондирования программно вычисляются характеристики многолучевого распространения КВ. Измеренные характеристики классифицируются по эмпирическим моделям многолучевости — типичным сочетаниям числа и типов мод распространения КВ-сигнала.

**Ключевые слова:** модель радиоканала, многолучевость, наклонное зондирование, линейная частотная модуляция.

Коротковолновые (КВ) ионосферные радиолнии характеризуются многолучевостью распространения, ведущей к замираниям принимаемого сигнала вследствие интерференции лучей. Дискретная многолучевость вызвана приходом в точку приема нескольких мод распространения радиосигнала ( $1F_2$ ,  $3F_2$ ,  $1E$ ), а также магнитоионным расщеплением мод.

Современным методом исследования модовой структуры является наклонное зондирование ионосферы (НЗИ) сигналами с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ) [1]. По результатам зондирования определяются следующие важные параметры: наименьшая и максимальная наблюдаемые частоты (ННЧ и МНЧ), отношение сигнал/шум и межмодовые задержки  $\Delta t$  в полосе частот зондирования (обычно 100 кГц).

Для определения радиотехнических характеристик многолучевых КВ-радиолний в литературе [2] используется подход классификации результатов исследования по эмпирическим моделям многолучевости (ММЛ), когда диапазон распространения разбивается на интервалы по числу и типам мод распространения сигнала. В [2] этот подход был реализован на базе аппаратуры, существенно уступающей современному ЛЧМ-ионозонду в точности и информативности результатов измерений.

Целью настоящей работы была разработка аппаратно-программного комплекса исследования модовой структуры распространения КВ с повышенной разрешающей способностью по частоте, основанного на наклонном ЛЧМ-ионозонде и обеспечивающего дополнительно классификацию данных о многолучевом распространении КВ по эмпирическим моделям многолучевости.

**Измерительные методики.** При наклонном зондировании ионосферы передатчик излучает непрерывный ЛЧМ-сигнал во всем КВ-диапазоне (обычно от 2 до 30 МГц):

$$a(t) = \begin{cases} a_0 \exp[j\varphi_{\text{изл}}(t)], & t \in [0, T], \\ 0, & t \notin [0, T], \end{cases} \quad (1)$$

где  $\varphi_{\text{изл}}(t) = 2\pi f_0 t + \pi f \dot{t}^2$ ,  $f_0$  — начальная частота,  $\dot{f} = df/dt$  — скорость изменения частоты,  $a_0$  — амплитуда сигнала,  $T$  — длительность сигнала.

Полоса частот этого сигнала равна  $\Delta f = \dot{f}T$ , а мгновенная частота в момент времени  $t$ :

$$f_{\text{изл}}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_{\text{изл}}(t)}{dt} = f_0 + \dot{f}t,$$

т.е. частота линейно зависит от времени. Сигнал распространяется в ионосферной радиолонии и поступает на вход приемника. Для многомодовой КВ-радиолонии сигнал в точке приема можно записать следующим образом:

$$a_{\text{пр}}(t) = \sum_{i=1}^M a_{1i} \exp[j\varphi_{\text{изл}}(t - \tau_i)], \quad (2)$$

где  $M$  — количество принимаемых мод,  $a_{1i} = H_i a_0$  — амплитуда,  $H_i$  — коэффициент прохождения,  $\tau_i$  — время фазового запаздывания сигнала  $i$ -й моды.

При наклонном зондировании расстояние между приемником и передатчиком обычно составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч километров, поэтому время запаздывания изменяется от единиц до десятков миллисекунд.

Принятый сигнал при обработке методом сжатия в частотной области умножается на сигнал гетеродина приемника, комплексно-сопряженный излучаемому сигналу, спектр полученного в результате сигнала анализируется. Этим операциям с сигналом соответствуют следующие соотношения:

$$A(t) = a_{\text{пр}}(t) a_{\text{изл}}^*(t); S(F) = \int_{-\infty}^{\infty} A(t) e^{-j2\pi ft} dt, \quad (3)$$

где  $A(t)$  — сигнал разностной частоты.

Из выражений (2) и (3) находим:

$$A(t) = \sum_{i=1}^M a_{2i}(t) \exp[j\varphi_{\text{рази}}(t)], \quad (4)$$

где  $a_{2i}(t) = a_{1i}(t) a_0$ ,  $\varphi_{\text{рази}}(t) = \dot{f} \tau_i t - \frac{\tau_i^2}{2} \dot{f} + f_0 \tau_i$ .

Мгновенная частота разностного сигнала  $f_i$   $i$ -й моды равна

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_{\text{рази}}(t)}{dt} = \dot{f} \tau_i,$$

следовательно, разностный сигнал  $i$ -й моды является гармоническим сигналом с амплитудой  $a_{2i}$  и частотой  $f_{\text{рази}}$ . При его дальнейшем спектральном анализе в соответствии с выражением (3) каждой принимаемой моде будет соответствовать своя спектральная составляющая на частоте  $f_i$  со спектральной плотностью  $a_{2i} T$  и шириной  $1/T$ .

Из-за частотной дисперсии волны различной частоты после прохождения ионосферной радиолонии имеют разные коэффициенты отражения и значения времени фазового запаздывания. Поэтому амплитуда и время фазовой задержки принимаемого сигнала являются функциями частоты зондирования:  $a_{1i} = a_{1i}(f)$  и  $\tau_i = \tau_i(f)$ . Однако для небольшого диапазона частот ( $f - \Delta f_k / 2$ ,  $f + \Delta f_k / 2$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ ), такой зависимостью можно пренебречь. На излучение сигнала в этом диапазоне частот требуется затратить время  $T_k = \Delta f_k / \dot{f}$ . Для определения зависимостей  $a_{1i}(f)$  и  $\tau_i(f)$  всю полосу частот зондирования разбивают на  $K$  неперекрывающихся элементов с полосой  $\Delta f_k$  и центральной частотой  $f_k$ .

Результатом работы ионозонда является ионограмма, характеризующая зависимость времени группового запаздывания  $\tau_i(f_k)$  и амплитуды  $a_{1i}(f_k)$  каждой моды распространения от частоты излучения  $f$ . В ЛЧМ-ионозонде характерными значениями параметров яв-



ляются  $\dot{f} = 100$  кГц/с и  $T_k = 1$  с, что обеспечивает разрешение по частоте в 100 кГц и по времени группового запаздывания  $\delta\tau = 10$  мкс.

Для классификации результатов зондирования по эмпирическим моделям многолучевости необходимо идентифицировать на ионограмме каждую моду распространения, что в наклонном ЛЧМ-ионозонде невозможно. Для реализации такой возможности предложено добавить к ионозонду блок синтеза ионограмм. Идентификация производится путем сопоставления экспериментальной ионограммы с искусственно синтезированной. Однако для адекватной идентификации необходимо построить по эмпирической ионограмме не дискретные, а непрерывные зависимости  $a_{1i}(f)$  и  $\tau_i(f)$ , что требует повышения разрешающей способности ионозонда по частоте. Для этого предложено вести обработку сигнала на выходе приемника ионозонда скользящим окном, разбивая полосу частот зондирования на  $N$  перекрывающихся элементов с полосой  $\Delta f_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) длительностью  $T_n$ , центральной частотой  $f_n$  и частотным смещением между соседними элементами  $\Delta f_{см}$  длительностью  $T_{см}$  (рис. 1). В работе использовалось значение  $\Delta f_{см} = 10$  кГц, т.е. разрешение по частоте было в 10 раз выше, чем при стандартном режиме зондирования ионосферы.

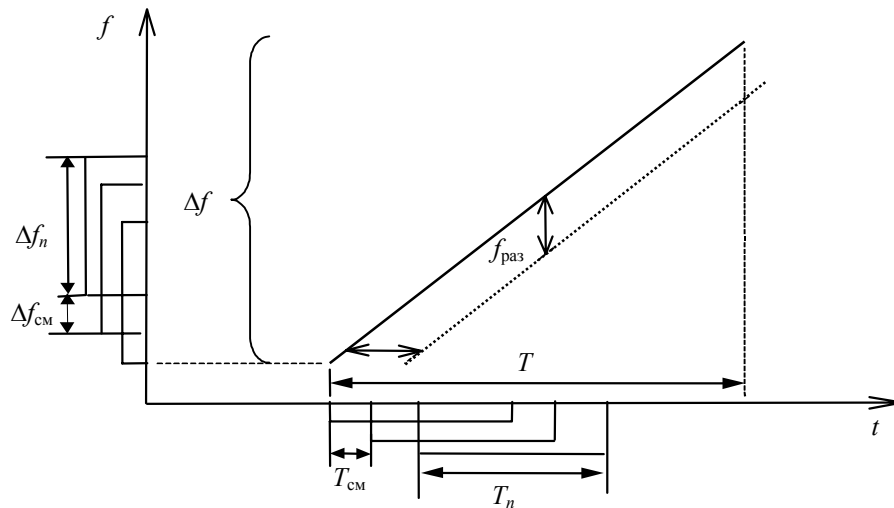


Рис. 1

Для получения непрерывных зависимостей и сглаживания случайных колебаний амплитуды и времени запаздывания дискретные отсчеты  $a_{1i}(f_k)$  и  $\tau_i(f_k)$  аппроксимируются полиномами степени  $n$  и  $m$ :  $H_{ni}(f)$  и  $\tau_{mi}(f)$  соответственно. Тогда  $a_{1i}(f) \approx H_{ni}(f)$  и  $\tau_i(f) \approx \tau_{mi}(f)$ .

**Аппаратура измерительного комплекса.** Структурная схема комплекса диагностики ионосферных радиолоний, реализующего данные измерительные методики, показана на рис. 2 (ФНЧ — фильтр низких частот, БПФ — быстрое преобразование Фурье). Комплекс состоит из трех блоков: радиоприемного комплекса (РПК), радиопередающего комплекса (РПДК) и ПЭВМ управления и обработки. РПДК используется в режиме передачи диагностирующего сигнала и служит для формирования диагностирующего непрерывного ЛЧМ-сигнала, его усиления по мощности и излучения в пространство. В состав РПДК входят: синтезатор непрерывного ЛЧМ-сигнала [3]; широкополосный усилитель мощности (ШУМ); согласующее устройство (СУ); передающая антенна. РПК служит для приема диагностирующего ЛЧМ-сигнала, его первичной обработки, в его состав входят: синтезатор непрерывного ЛЧМ-сигнала; радиоприемное устройство (РПУ); приемная антенна. ПЭВМ управляет

работой всех технических средств комплекса диагностики в режимах приема и передачи диагностирующего сигнала, а также обрабатывает результаты диагностики радиолиний.

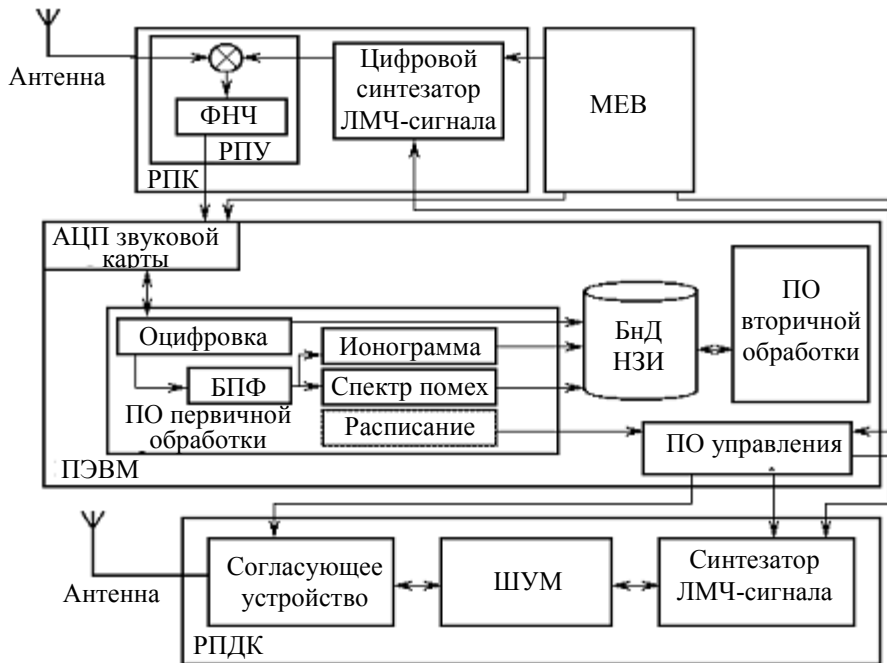


Рис. 2

В ПЭВМ установлено программное обеспечение (ПО) управления аппаратурой, первичной и вторичной обработки. ПО управления обеспечивает работу измерительного комплекса в автоматическом режиме по заданному расписанию сеансов зондирования. ПО первичной обработки реализует оцифровку сигнала с выхода РПУ, спектральный анализ сигнала, формирование ионограмм и занесение их в банк данных (БД). ПО вторичной обработки позволяет просматривать сохраненные данные и производить их дальнейшую обработку, в том числе классификацию по эмпирическим моделям многолучевости. В ПЭВМ также находится модуль единого времени (МЭВ). Кроме того, в состав диагностирующего комплекса входит опорный генератор, формирующий высокостабильный опорный сигнал заданной частоты. Этот сигнал используется для формирования когерентных ЛЧМ-сигналов. Также этот сигнал поступает в МЭВ для формирования импульса запуска аппаратуры в режиме диагностики и выработки тактовых последовательностей управления электронными часами.

**Обработка ионограммы.** Процесс обработки каждой ионограммы в целях извлечения информации о многолучевом распространении КВ в соответствии с описанной выше методикой включает в себя выделение парциальных мод распространения КВ радиосигнала и построение их непрерывных моделей, идентификацию парциальных мод, классификацию результатов [2] по диапазонам эмпирических моделей многолучевости. Взаимосвязь основных этапов показана на рис. 3.

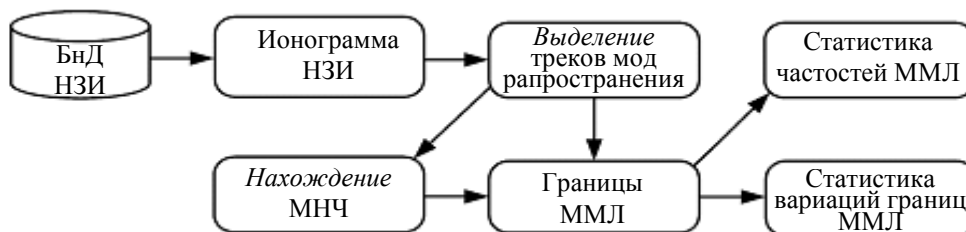


Рис. 3

Накопление больших массивов данных, классифицированных по ММЛ, позволяет получить статистические характеристики интересующих параметров, например, статистику частот ММЛ\* и статистику вариаций частотных границ ММЛ.

В качестве примера в настоящей работе показана обработка ионограммы наклонного зондирования радиолинии Кипр (35N34E)—Нижний Новгород, полученной 17.12.2003 в 15:15 (рис. 4, а).

Выделение треков (т.е. зависимости максимальной амплитуды сигнала выделенной моды от частоты) включает два этапа: нахождение областей полезного сигнала на ионограмме [4] (рис. 4, б) и поиск максимумов амплитуды в найденных областях с последующей аппроксимацией траектории трека полиномом для сглаживания и уменьшения влияния помех.

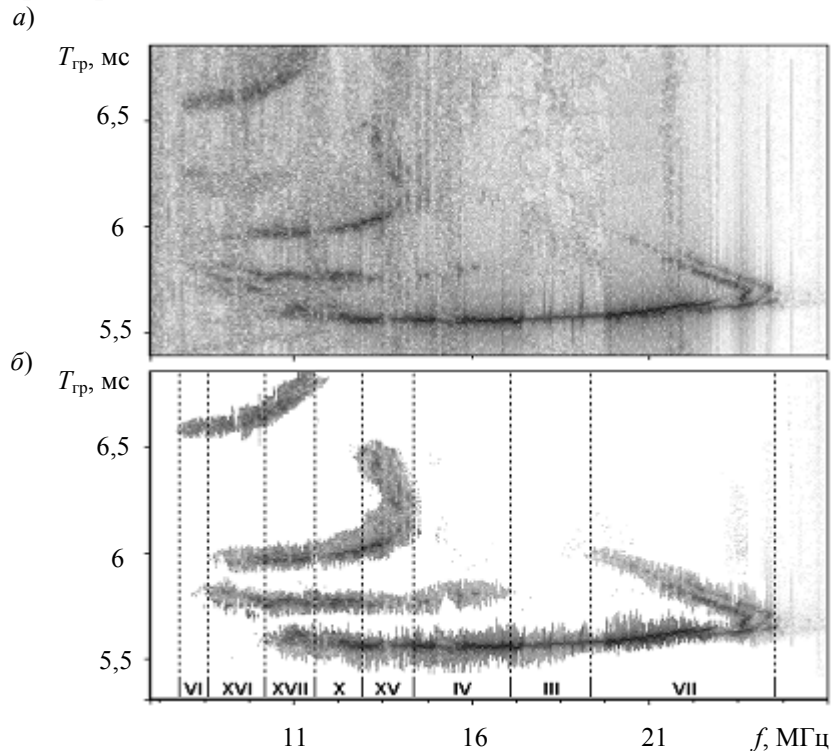


Рис. 4

Упомянутый в [2] подход к классификации результатов исследования характеристик распространения радиосигнала по так называемым ММЛ заключается в том, что диапазон распространения разбивается на интервалы по числу и типам мод распространения сигнала ( $1E$ ,  $1F_2$ ,  $2F_2$  и т.п.), идентификация трека производится путем сопоставления экспериментальной ионограммы с синтезированной [5]. На рис. 4, б в качестве примера показаны результаты такого разбиения, ММЛ пронумерованы римскими цифрами (нумерация сквозная для всех исследованных ионограмм всех радиолиний, так что на конкретной ионограмме номера указаны в произвольном порядке).

Описанная обработка автоматизирована, что позволяет легко обрабатывать большие массивы данных НЗИ и получать обширную статистику [6] по ММЛ. Каждой такой модели соответствуют определенные значения пропускной способности и вероятности ошибок.

Разработан автоматизированный измерительный комплекс, основанный на наклонном ЛЧМ-иозонде, для получения характеристик многолучевого ионосферного распространения КВ с повышенной разрешающей способностью по частоте, обеспечивающий дополнительно

\* Для всех моделей многолучевости подсчитывается процент ионограмм, на которых присутствует эта модель. В результате получается статистическая оценка частоты появления той или иной модели многолучевости, которая и названа „статистикой частот ММЛ“.

идентификацию мод распространения и классификацию данных по эмпирическим моделям многолучевости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 07-01-00293.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филипп Н. Д., Блаунштейн Н. Ш., Ерухимов Л. М., Иванов В. А., Урядов В. П. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере. Кишинев: Штиинца, 1991. 286 с.
2. Хмельницкий Е. А. Оценка реальной помехозащищенности приема сигналов в КВ диапазоне. М.: Связь, 1975. 232 с.
3. Чернов А. Г. Программируемый синтезатор непрерывного ЛЧМ-сигнала с заданным уровнем шумов для диагностики КВ радиолиний. Дис. ... канд. техн. наук. Казань: КГТУ, 2000.
4. Колчев А. А., Щирый А. О. Алгоритм автоматического выделения спектральных компонентов сигнала на ионограмме // Новые информационные технологии: мат. 10-го науч.-практич. семинара. М.: Мос. гос. ин-т электроники и математики, 2007. С. 102—107.
5. Крашенинников И. В., Егоров И. Б., Коломийцев О. П., Черкашин Ю. Н. Погрешности прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн на основе глобальной ионосферной модели // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44, № 2. С. 221—226.
6. Колчев А. А., Шумаев В. В., Щирый А. О. Наиболее вероятные модели многолучевости при распространении коротких волн на магистральных среднеширотных радиолиниях // Информационные технологии моделирования и управления. 2007. № 1 (35). С. 70—76.

#### Сведения об авторах

- Алексей Анатольевич Колчев** — Марийский государственный университет, кафедра прикладной математики и информатики, Йошкар-Ола; E-mail: kolchevaa@mail.ru
- Владимир Васильевич Шумаев** — Марийский государственный университет, кафедра высшей математики, Йошкар-Ола; E-mail: shvvladimir@mail.ru
- Андрей Олегович Щирый** — Марийский государственный университет, кафедра прикладной математики и информатики, Йошкар-Ола; E-mail: saovu@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
прикладной математики и информатики

Поступила в редакцию  
27.05.08 г.

## SUMMARY

P. 5—12.

### PARALLEL PERFORMANCE OF STOCHASTIC ALGORITHMS

Issues of parallel algorithm performance models construction for various task classes are discussed. Parametric approach which allows parallel speedup description in form of deterministic function is proposed. Parameters of this function are stochastic variables that characterize objective properties of algorithm and are independent of software and hardware implementation. This makes possible analytical study of dependences between performance probabilistic characteristics, algorithm and parallel architecture.

**Keywords:** stochastic algorithms, parallel performance, high-performance computing.

#### *Data on authors*

- Sergey Valerievich Kovalchuk* — Research Institute of Science-Intensive Computer Technologies, St. Petersburg; E-mail: iterater@mail.ru
- Aleksander Valerievich Boukhanovsky* — Research Institute of Science-Intensive Computer Technologies, St. Petersburg; E-mail: avb\_mail@mail.ru

P. 13—17.

### EFFICIENCY ESTIMATION OF THE SCANNING ROBOT APPLICATION FOR INFORMATION SEARCH IN THE INFORMATION NETWORKS

The index method for the efficiency estimation (on the test results) of the scanning robot application for search and collection of required information in the information network has been examined. Scanning information arrays can contain the multiplicity information having the different value for the utilizing person. This method allows rather concerning to estimate and compare on the efficiency of different methods of the using network scanning robot. It don't demand fair quantities input data and the efforts are interpreted simply.

**Keywords:** efficiency, indices and criterions of efficiency, safeguarding of the information security, indices.

#### *Data on authors*

- Vadim Petrovich Zabolotsky* — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation, Russian Academy of Sciences; E-mail: lai@iias.spb.su
- Rafael Midkhatovich Yusupov* — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation, Russian Academy of Sciences; E-mail: spiiran@iias.spb.su
- Aleksander Alekseevich Demidov* — Administration of the Governor of St. Petersburg

P. 17—22.

### ADAPTIVE PROTECTION OF INFORMATION SYSTEMS

For construction of perspective information systems (IS), first of all global computer, focused on use in institutes of the government, financial structures, the enterprises of a military-industrial complex, are necessary эволюционирующие adaptive means of monitoring of safety in structure IS. Architectural decisions of means of intellectual protection IS and bases of methodology of monitoring safety IS focused on a principle of biosystem analogy are considered(examined).

**Keywords:** biosystem analogy, monitoring of safety, adaptive means, intellectual protection.

#### *Data on authors*

- Andrey Vjacheslavovich Sukhanov* — Closed Joint-Stock Company „EUREKA“, St. Petersburg;  
E-mail: avsuhanov@eureca.ru
- Aleksander Izotovitch Krylov* — Closed Joint-Stock Company „EUREKA“, St. Petersburg;  
E-mail: a\_krylov@eureca.ru

P. 22—26.

### METHOD OF SEGMENTATION OF THE IMAGE FOR RECOGNITION OF PRINTED DOCUMENTS

In work methods of recognition of printed documents are briefly considered, their basic lacks are shown. Manyscales segmentations on the basis of a dynamic local card of communication of the image the method is developed for reception of a hierarchical tree of blocks of documents.

**Keywords:** processing of images, the printed document, segmentation of the image, the analysis of page.

#### *Data on authors*

- Anatoly Grigorievich Korobeynikov* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Faculty Designing of Computer Systems;  
E-mail: Korobeynikov\_A\_G@mail.ru
- Hoang Zayng* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Faculty Designing of Computer Systems;
- Svetlana Nikolaevna Kuznetsova* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Faculty Designing of Computer Systems;
- Igor Borisovich Tronikov* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Faculty Designing of Computer Systems;
- Veniamin Aleksandrovich Semenov* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Faculty Designing of Computer Systems;  
E-mail: veny-semenov@yandex.ru

P. 27—33.

### PERIODIC MODES IN SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL WITH PULSE-WIDTH MODULATIONS OF THE SECOND KIND

Periodic modes in systems with pulse-width modulation of the second kind are investigated. The mathematical model of discrete system of automatic control as system discrete the equations is resulted. Conditions of existence of a periodic mode are received. The example for system of the second order is considered and results of modelling are resulted. Application of a periodic mode for vibrating smoothing nonlinearity is considered, that promotes reduction of errors in automatic systems.

**Keywords:** periodic modes, pulse-width modulation of the second kind, discrete system of automatic control.

#### *Data on authors*

- Sergey Viktorovich Luchko* — Mozhajskiy Military-Space Academy, Faculty of Automatics and Electronics, St. Petersburg
- Sergey Yurievich Baluev* — Mozhajskiy Military-Space Academy, Faculty of Automatics and Electronics, St. Petersburg; E-mail: s.baluev@mail.ru
- Mikhail Alekseevich Vatutin* — Mozhajskiy Military-Space Academy, Faculty of Automatics and Electronics, St. Petersburg
- Victor Alekseevich Rogatchev* — Bontch-Bruevich University of Telecommunications, St. Petersburg

P. 34—37.

### SUFFICIENT CONDITION FOR NONLINEAR SAMPLING SYSTEM ASYMPTOTIC STABILITY OF DISCRETE SYSTEM WITH CHANGING PARAMETERS

A sufficient condition for nonlinear sampling system asymptotic stability at large is obtained. Places of system matrix columns depend on phase co-ordinate vector. It is demonstrated possibility to obtain the less hard sufficient stability condition with phase co-ordinate scale changing. Sometimes it is possible to obtain the necessary and sufficient stability condition.

**Keywords:** asymptotic stability, nonlinear discrete system, a sufficient condition of stability.

#### *Data on author*

- Anatoly Ivanovich Korshunov* — Popov Naval Institute of Radio Electronics, St. Petersburg; E-mail: a.i.korshunov@mail.ru

P. 38—43.

### ESTIMATION OF APPLICATION TASK RESPONSE TIME IN THE MULTIPROCESSOR SYSTEMS

An approach is represented for estimation of feasibility of hard real-time program applications that are build on the base of multicore processors. The class of computational models is regarded that permit asynchronous tasks with static priorities, job preemption and job migration between the processors. The method of task response time estimation is suggested for such class of computational models.

**Keywords:** task feasibility, hard real-time systems, critical scenario of system events, task response time.

#### *Data on authors*

- Victor Vikentievich Nikiforov* — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation, Russian Academy of Science; E-mail: nik@iiias.spb.su
- Vyacheslav Ivanovich Shkirtil* — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation, Russian Academy of Science, Laboratory of Technologies and Programming Systems; E-mail: jvatlas@mail.rcm.ru

P. 44—49.

### VERIFICATION OF FILTERING RULES OF SECURITY POLICY BY MODEL CHECKING

An approach to verification of filtering rules for detection and resolution of filtering anomalies in computer network security policy is proposed. The approach is based on model checking method. The models of computer system, firewall, and filtering anomalies, which are used for verification of filtering rules by proposed method, along with algorithms of filtering anomaly detection are considered. Based on those models, methodic for verification of filtering rules of security policies is proposed.

**Keywords:** security policy, filtering rules, verification, model checking.

#### *Data on authors*

- Olga Vitalievna Polubelova* — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation, Russian Academy of Science, Research Group of Computer Safety;  
E-mail: ovch@comsec.spb.ru
- Igor Vitalievich Kotenko* — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation, Russian Academy of Science, Research Group of Computer Safety;  
E-mail: ivkote@iias.spb.su

P. 50—55.

### PENDULUM PULSE-REBALANCE ACCELEROMETER UNIT PARAMETER ESTIMATION USING A SINGLE AXIS TURNTABLE

The results of development of a pendulum pulse-rebalance accelerometer unit (AU) calibration procedure are presented. For AU used on mobile objects with a smaller acceleration range, development of a procedure for calibration in the AU operating range of angles is relevant.

For calibration the AU is mounted on a single-axis turn-table which provides the possibility for the AU to be fixed in two opposite positions at an angle of 45° relative to the axis of rotation. The experimental results presented provide support for the efficiency of the proposed calibration technique.

**Keywords:** pendulum pulse-rebalance accelerometer, calibration, single-axis turn-table.

#### *Data on author*

- Dmitry Olegovich Taranovsky* — State Research Center „Elektropribor“, St. Petersburg;  
E-mail: office@eprib.ru

P. 56—63.

### IDENTIFICATION OF SOME PARAMETERS OF THE ENGINE MEMBRANE TYPE

In the article established, that application of membrane engines in the control systems restrains temper from incompleteness of descriptions of catalogues of shells, necessary for the construction of its mathematical model. It is shown, as on the basis of principles of work, features of construction and properties of material of shell it is possible to fill in this blank identification of failings parameters.

**Keywords:** identification of parameters, engine of membrane type, volumetric-deformation characteristic.

#### *Data on authors*

- Peter Anatolievich Loshitskiy* — Central Scientific-Research Institute for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg; E-mail: adressad@pochta.ru
- Valery Timofeevich Sharovатов* — Ustinov Baltic State Technical University („Voenmekh“), Faculty Mechatronics and Robotics, St. Petersburg; E-mail: kaf\_nl@bstu.spb.su



P. 63—66.

### EXPERIMENTAL COMPLEX FOR STUDYING OF HIGH-SPEED EFFECT OF FLOWS OF METEORIC PARTICLES ON A SPACE VEHICLE SURFACE

The description of the experimental complex is resulted, allowing to simulate space conditions, for carrying out of experimental researches of influence of factors of a natural and artificial origin on space vehicle functioning. The complex allows to receive the data used at designing of a space vehicle, on change of physical characteristics of external elements of onboard systems and degradation of their properties in the course of flight operation.

**Keywords:** meteoric shower, high-speed particle, space craft, explosive.

#### *Data on authors*

- Boris Ivanovich Poletaev* — Frunze Design Bureau „ARSENAL“, St. Petersburg, General Director, General Designer,  
*Vladimir Dmitrievich Atamasov* — Mozhajskiy Military-Space Academy, St. Petersburg  
*Aleksandr Vasilievich Belyankin* — Mozhajskiy Military-Space Academy, St. Petersburg  
*Dmitrij Yurievich Mikhaylov* — Mozhajskiy Military-Space Academy, St. Petersburg  
*Aleksandr Vitalievich Levandovich* — Mozhajskiy Military-Space Academy, St. Petersburg  
*Maksim Mikhaylovich Poluyan* — Mozhajskiy Military-Space Academy, St. Petersburg

P. 66—72.

### BALLISTIC CONSTRUCTION OF COMMUNICATION SYSTEMS AND PASSIVE RADIOLOCATION OF LUNAR SURFACE

Principles of ballistic build-up of systems of space vehicle of link and passive radiolocation of a lunar surface are observed. The position of initial phase state vectors of space vehicle in Lagrange points of a libration of system an Earth-moon with the purpose of security of the best survey of a lunar surface on the fixed time frame is justified. Estimations of the area parameters of survey of a lunar surface are given by system of the space vehicles had in Lagrange points of a libration of system an Earth-moon.

**Keywords:** lunar surface, lunar libration point, systems of space.

#### *Data on authors*

- Nikolay Fedorovich Averkiev* — Mozhajskiy Military-Space Academy, St. Petersburg, Faculty of Ballistics of Rockets-Carriers and Flight of Space Vehicles;  
Ph.: 8-911-224-58-24.  
*Sergey Arsenievich Vas'kov* — Mozhajskiy Military-Space Academy, St. Petersburg, Faculty of Ballistics of Rockets-Carriers and Flight of Space Vehicles;  
Ph.: 8-911-220-26-27.  
*Vyacheslav Viktorovich Salov* — Mozhajskiy Military-Space Academy, St. Petersburg, Faculty of Ballistics of Rockets-Carriers and Flight of Space Vehicles;  
Ph.: 8-911-247-37-72.

**P. 73—78.**

### **EQUIPMENT FOR RESEARCH OF HF IONOSPHERIC MULTIPATH PROPAGATION EFFECTS**

Description of equipment for research of HF ionospheric multipath propagation effects is given. This equipment based on chirpsounding hardware, which used frequently-modulated continuous wave (FMCW) signals. The functional structure of this equipment is described, its working algorithms are given. HF multipath propagation characteristics are computed by software on basis of chirpsounding data. Obtained HF multipath propagation characteristics are classified by empirical multipath models; empirical multipath model is a combination of the certain types of partial HF rays.

**Keywords:** model of the radio link, multipath, oblique sounding, linear frequency modulation.

#### ***Data on authors***

- Aleksey Anatolievich Kolchev*** — Mari State University, Faculty of Applied Mathematics and Computer Science, Ioshkar Ola; E-mail: kolchevaa@mail.ru
- Vladimir Vasilievich Shumaev*** — Mari State University, Faculty of Higher Mathematics, Ioshkar Ola; E-mail: shvvladimir@mail.ru
- Andrey Olegovich Shiriy*** — Mari State University, Faculty of Applied Mathematics and Computer Science, Ioshkar Ola; E-mail: saovu@mail.ru

# УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2008 Г.

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
<b>ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ</b>		
Алешкин А. П., Гавриленко А. В., Иванов К. В., Красный В. П., Новиков В. А., Хоружий А. И.	Метод обработки радиолокационных характеристик малого космического аппарата с учетом априорных ограничений	1
Алешкин А. П., Савочкин П. В., Манташян М. Ю., Курушкин С. М.	Метод обработки результатов оптических измерений на основе векторного редуцированного оценивания	10
Багаутдинов З. З., Гейда А. С., Лысенко И. В.	Моделирование и оценивание эффективности комплекса мероприятий на основе алгебры нечетких чисел	1
Баглюк С. С.	Модель процесса передачи данных между прикладными уровнями распределенной вычислительной системы	5
Бурсиан Е. Ю.	Алгоритм распознавания чертежных рукописных символов	7
Вознюк В. В., Зайцев С. А., Толстоухов Д. А., Булаев О. А., Гусаков Н. В.	Определение времени задержки приема сигнала с пространственно разнесенными сверхмалыми космическими аппаратами	3
Гаценко О. Ю., Максимов С. В.	Модель многошагового процесса подавления несанкционированных воздействий на информационные системы	5
Дмитриев А. К., Кравцов А. Н.	Информационно-поисковая система диагностирования объекта на основе принципа согласованного оптимума	1
Долгов А. И., Ванюлин Е. В.	Метод функциональной коррекции устройств преобразования данных с временной избыточностью	1
Заболотский В. П., Юсупов Р. М., Демидов А. А.	Оценивание эффективности применения сканирующего робота для поиска информации в информационных сетях	12
Иванов С. В., Колыхматов И. И., Бухановский А. В.	Параллельные алгоритмы моделирования комплексных сетей	10

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Извозчикова В. В., Матвейкин И. В., Гатчин И. Ю., Нестерова Н. А., Тронников И. Б., Семенов В. А.	Концептуальная модель управления предприятием	5
Ковальчук С. В., Бухановский А. В.	Параллельная производительность стохастических алгоритмов	12
Коробейников А. Г., Хоанг Зянг, Кузнецова С. Н., Троники И. Б., Семенов В. А.	Метод сегментации изображения для распознавания печатных документов	12
Кузнецов В. И.	Система автономного определения орбит космических аппаратов спутниковых радионавигационных систем	5
Мысливцев Т. О., Иванов В. Ф.	Использование адаптивного метода сопряженных направлений для коррекции параметров модели ионосферы	3
Носенков А. А., Покидько С. В., Соколов М. И.	Контроль качества узлов технических систем с помощью многофакторного эксперимента	3
Осипов С. Л.	Разработка САПР, реализующих плохо формализуемые подходы	7
Потапов А. С.	Выбор представлений изображений на основе минимизации репрезентационной длины их описания	7
Соколов Б. В., Зайчик Е. М., Охтилев М. Ю., Тарасов О. М.	Комбинированные модели и алгоритмы многокритериального выбора структуры технической системы	5
Суханов А. В., Крылов А. И.	Адаптивная защита информационных систем	12
Суханов А. В., Нестерук Г. Ф.	Обеспечение безопасности автоматизированных информационных сетей	10
Тимофеев А. В., Зотов Ю. К.	Стабилизация программы полета и управляемость автономных летательных аппаратов с нелинейной динамикой	3

### ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Акунов Т. А., Сударчиков С. А., Ушаков А. В.	Анализ алгоритмических проблем при исследовании чувствительности дискретных систем	7
Боженкова Н. Ю., Осипцева О. С., Ушаков А. В.	Фактор канальной среды в задаче синтеза цифрового дистанционного управления непрерывным объектом	3

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Бочков А. Л., Дударенко Н. А., Ушаков А. В.	Синтез многомерных функционально вырожденных динамических систем	1
Гончаренко М. Р., Исаков А. С.	Система управления активным кондиционером электросети	3
Григорьев В. В., Медынский Ю. В., Мотылькова М. М., Мансурова О. К.	Прогнозирование процесса вертикальной качки корабля	1
Кабанов Д. С., Крашенинников Б. А.	Управление траекторией движения автомобиля с использованием алгоритма последовательной оптимизации	10
Коршунов А. И.	Достаточное условие асимптотической устойчивости нелинейной дискретной системы	12
Крашенинников Б. А.	Активное оптимальное демпфирование колебаний кузова автомобиля	5
Левский М. В.	Об одной задаче пространственного разворота космического аппарата	7
Левский М. В.	Оптимальное управление ориентацией космического аппарата	5
Лучко С. В., Балуев С. Ю., Ватугин М. А., Рогачев В. А.	Периодические режимы в системах автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией второго рода	12
<b>ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА</b>		
Бураков В. В.	Методика оценки качества программных средств	1
Гончаренко В. А.	Анализ реактивности узла вычислительной сети в условиях интервальной неопределенности	7
Гончаренко В. А.	Модели адаптивного перераспределения нагрузки в кластерных вычислительных системах	3
Ковалев И. В., Завьялова О. И., Лайков А. Н.	Формирование избыточного программного обеспечения отказоустойчивых систем управления	10
Манкевич А. К.	Методика оценивания риска в распределенных вычислительных системах	3
Никифоров В. В., Шкиртиль В. И.	Оценка времени отклика прикладных задач в системах реального времени с многоядерными процессорами	12
Новосельский В. Б.	Метод проектирования процесса распределения реляционной базы данных	7
Ожиганов А. А., Чжипэн Жуань	Использование псевдослучайных последовательностей при построении кодовых шкал для преобразователей линейных перемещений	7

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Полубелова О. В., Котенко И. В.	Верификация правил фильтрации политики безопасности методом проверки на модели	12
Тимофеев А. В., Дерин О. А.	Анализ сложных мультиизображений в режиме реального времени	10
<b>ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ</b>		
Тарановский Д. О.	Оценивание параметров блока маятниковых поплавковых акселерометров на одноосном стенде	12
<b>ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ</b>		
Киселев С. С.	Распределение дискретности передаточных чисел зубчатых передач внешнего зацепления	3
<b>ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА</b>		
Аверкиев Н. Ф., Васьков С. А., Салов В. В.	Баллистическое построение систем космических аппаратов связи и пассивной радиолокации лунной поверхности	12
Атнашев А. Б.	Транспонирование частотного спектра сигнала и его корреляционная обработка	3
Галайдин П. А.	Расчет аксиального градиентного модуля магниторезонансного томографа	1
Ершов С. О., Майер П.	Системы технического зрения с невизуальным представлением пространственной информации	1
Жиганов И. Ю.	Развитие телевизионных методов измерения геометрических параметров труб	10
Зиатдинов С. И.	Оптимальная схема определения местоположения объектов	7
Зиатдинов С. И., Гиринов Н. В.	Анализ ошибок при тригонометрической интерполяции	5
Колчев А. А., Шумаев В. В., Щирый А. О.	Измерительный комплекс для исследования эффектов многолучевого ионосферного распространения коротких волн	12
Лошицкий П. А., Шароватов В. Т.	Идентификация некоторых параметров математической модели двигателя оболочкового типа	12
Мельников Ю. П., Попов С. В.	Комбинаторное объединение и кодирование номеров каналов в анализаторах импульсных радиосигналов	5
Неронов Ю. И.	Модуль управления ЯМР-томографом	10
Петрова Е. Н.	Моделирование параметров электрического поля при исследовании волос методом газоразрядной визуализации	7

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Полетаев Б. И., Атамасов В. Д., Белянкин А. В., Михайлов Д. Ю., Левандович А. В., Полуян М. М.	Экспериментальный комплекс для изучения высокоскоростного воздействия потоков метеорных частиц на поверхность космического аппарата	12
Усольцев А. А., Лукичев Д. В.	Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным	10
Холкин В. Ю.	Модель барьерного механизма возникновения $1/f$ -шума в полупроводниковых устройствах	1

### ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Алексеев С. А., Кононов С. А., Секарин К. Г., Трофимов В. А.	Исследование возможности обнаружения объектов на основе поляризационного контраста	10
Андреев Л. Н., Комарова Ю. А.	Коррекция сферической аберрации в двухзеркальной концентрической оптической системе	1
Бычков А. Н.	О влиянии частотно-контрастной характеристики объектива и спектрального состава источника излучения на разрешающую способность телевизионного датчика	5
Гавриленко С. В., Феоктистов Н. Н., Хегай Д. К.	Особенности современного этапа развития оптических линий межспутниковой связи	3
Горбунова Е. В., Коротаев В. В., Тимофеев А. Н., Левитин А. И., Чертов А. Н.	Возможности применения матричных приемников с зарядовой связью в фотометрическом канале рентгенолюминесцентного сепаратора алмазосодержащего сырья	5
Демидов В. М., Поляков А. Ю.	Уменьшение влияния параллакса на погрешность стабилизации видеоизображений	10
Зверев В. А., Романова Г. Э.	Компенсаторы для несферических поверхностей зеркальных телескопов	10
Зверев В. А., Романова Г. Э.	Оптическая схема телескопа с диаметром главного зеркала 10 м	5
Иванов В. И., Ливашвили А. И., Окишев К. Н.	Термодиффузионный механизм изменения оптического пропускания двухкомпонентной среды	3
Макаренко А. А., Турецкий Л. С.	Коррекция проективных искажений изображений при мало-высотной оптико-электронной аэросъемке	5
Мачихин А. С.	Автоматическое восстановление изображений, искаженных прямолинейным равномерным смазом	1

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Пикуль О. Ю., Строганов В. И., Карпец Ю. М.	Коноскопические картины в оптически активных кристаллических пластинах	5
Прокопенко В. Т., Храмцовский И. А., Землянский В. С., Лисицын Ю. В., Секарин К. Г.	Эллипсометрия оптических соединений элементов оптоэлектроники	10
Рахимов Н. Р., Серьезнов А. Н., Шамирзаев С. Х.	Технология изготовления координатно-чувствительного приемника оптического излучения на основе АФН-пленок	5
Сальников А. В.	Компьютерная система для автоматизации процесса структурного синтеза объективов	7
Скалецкая И. Е., Прокопенко В. Т.	Новые инвариантные величины в эллипсометрическом методе исследований	7
Сюй А. В., Кравцова Н. А., Строганов В. И., Криштоп В. В.	Параметрический метод построения эллипса поляризации излучения	10
Татмышевский К. В.	Расчет выходных оптических сигналов механолюминесцентных чувствительных элементов	7
Торшина И. П.	Методика разработки обобщенной компьютерной модели оптико-электронной системы	3
Умбиталиев А. А., Цыцулин А. К., Смирнов В. Д., Егельский И. Д.	Компоновка многоканальной аппаратуры инфракрасного и миллиметрового диапазонов	10
Фефилов Г. Д.	Синтез оптимальной весовой функции и методы ее реализации в лазерной дифрактометрии микрообъектов	1
Филиппова И. С., Алексеева Л. В., Повх И. В., Строганов В. И.	Оптическая система из двух призм с анизотропными свойствами	1

### ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Синицын А. А.	Исследование вибрационных характеристик работы котельных агрегатов	7
Сулин А. Б., Богомоллов И. Н.	Компрессионно-термоэлектрические термостаты лабораторного назначения	7



Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
<b>ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ</b>		
Жерновой А. И.	Определение состава нефтегазовой смеси методом ядерного магнитного резонанса	10
Ирзаев Г. Х.	Система экспертного анализа технологичности электронных приборов	3
Скворцов А. М., Дышлошенко С. С., Погумирский М. В., Фам Куанг Тунг, Соколов В. И.	Некоторые свойства кремниевых структур, полученных лазерным микроструктурированием	10
<b>ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК</b>		
<b>ЛАЗЕРНЫЕ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИИ</b>		
Быков Н. Ю., Лукьянов Г. А., Николаева Л. Ю.	Моделирование процессов образования нанокластеров и их напыления на подложку при импульсной лазерной абляции металлов	4
Вейко В. П., Мутин Т. Ю., Смирнов В. Н., Шахно Е. А., Батище С. А.	Лазерная очистка поверхностей металлов: физические процессы и применение	4
Вейко В. П., Шахно Е. А., Яковлев Е. Б., Новиков Б. Ю.	Лазерно-индуцированные волны просветления и потемнения в стеклокерамике	4
Вейко В. П., Яковлев Е. Б., Орлов Д. В., Игнатъев А. И., Никоноров Н. В.	Влияние примесных веществ на кристаллизационную активность стеклообразных материалов под действием лазерного излучения	4
Верхогляд А. Г.	Оптический тракт лазерного комплекса для прецизионного микропрофилирования крупногабаритных изделий произвольной формы	4
Ильин Д. В., Яковлев Е. Б.	Анализ свойств стекла при лазерном воздействии на основе модели „жидкость—деформированный вакансиями кристалл“	4
Муленко С. А., Кудрявцев Ю. В., Горбачук Н. Т., Лучес А., Карикато А. П., Вейко В. П., Петров А. А., Чуйко В. А.	Нанесение тонких пленок силицидов металлов методами PLD и LIFT	4

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Сысоев В. К., Вятлев П. А.	Технологические характеристики процесса лазерного термораскалывания	4
Трофимов В. А., Варенцова С. А.	Метод измерения формы импульса и профиля пучка лазерного излучения	4
Туричин Г. А., Лопота В. А., Валдайцева Е. А., Поздеева Е. Ю., Земляков Е. В., Савельева К. В.	Управление формированием микроструктуры при светолазерной обработке стали	4
Чивель Ю. А., Затягин Д. А., Смунов И. Ю.	Система мониторинга процесса селективного лазерного спекания	4
Яковлев Е. Б., Вейко В. П., Кирилловский В. К., Голубок А. О., Ле Д. Т., Зыонг З.	Определение конфигурации апертуры ближнепольных оптических зондов по распределению светового поля в дальней зоне	4

### ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

#### ВЕНТИЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПРЕЦИЗИОННЫХ СИСТЕМ НАВЕДЕНИЯ

Бизяев А. А., Лихоманов А. М., Розов А. Ю., Дмитриев Б. Ф.	Синтез широтно-импульсного преобразователя напряжения с разветвленной нагрузкой	6
Васильев В. Н., Томасов В. С., Шаргородский В. Д., Садовников М. А.	Состояние и перспективы развития прецизионных электроприводов комплексов высокоточных наблюдений	6
Гурьянов А. В., Жданов И. Н., Ильина А. Г., Усольцев А. А.	Коррекция рассогласования осей датчика положения и синхронного двигателя	6
Денисов К. М., Жданов И. Н.	Оптимизация каналов скорости и положения прецизионных следящих электроприводов	6
Ильина А. Г., Лукичев Д. В., Усольцев А. А.	Оптимальное управление движением при позиционировании и его моделирование в среде MathLab/Simulink	6
Исупов А. Н., Исупов К. С., Храмов С. Н.	Определение амплитудно-частотных характеристик альт-азимутального опорно-поворотного устройства крупногабаритного наземного телескопа	6
Овчинников И. Е.	Оптимальный угол опережения вентильных электрических двигателей с активным ротором	6

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Садовников М. А.	Измерение скорости движения силового электропривода с помощью оптических датчиков угла	6
Синицын В. А., Томасов В. С.	Энергоподсистемы следящих электроприводов измерительных телескопов	6
Толмачев В. А.	Синтез следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства	6
Толмачев В. А., Демидова Г. Л.	Математические модели и динамические характеристики электромеханических преобразователей с ограниченным углом поворота	6

### ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

#### ПРИБОРЫ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ С МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ

Алеев Р. М., Алеев Д. Р.	Открытая и взаимозависимая архитектура тепловизионных приборов	9
Алеев А. М., Араканцев К. Г., Тимофеев А. Н., Ершова К. Б., Петуховский В. В., Петуховский С. В., Холин А. Е.	Оптико-электронная система контроля положения железнодорожного пути относительно реперных меток	9
Анисимов А. Г., Горбачев А. А., Краснящих А. В., Пантюшин А. В.	Оптико-электронная система контроля соосности элементов турбоагрегатов	9
Артеменко Ю. Н., Коняхин И. А., Панков Э. Д., Тимофеев А. Н.	Оптико-электронные системы измерения деформаций элементов конструкции радиотелескопа миллиметрового диапазона РТ-70 (Суффа)	9
Белоусов А. А., Явленский А. К., Севастьянов А. А., Волков А. С., Жаворонков К. А.	Разработка систем диагностики оборудования в цифровом кинематографе	9
Ворона А. М., Коняхин И. А.	Исследование регулярного виньетирования в оптико-электронных системах измерения угловых деформаций	9
Горбунов Г. Г., Лаппо А. П., Таганов О. К.	Калибровка шкалы спектрального пропускания радиометра с использованием фурье-спектрометра	9
Горбунов Г. Г., Сивяков И. Н., Таганов О. К., Шилов В. Б.	Особенности использования многоэлементных приемников в фурье-спектрометрии	9

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Горбунова Е. В., Коротаев В. В., Тимофеев А. Н., Чертов А. Н.	Об особенностях сепарирования алмазов по категориям в цветовом пространстве RGB	9
Коняхин И. А., Мерсон А. Д.	Оптико-электронная система измерения угла скручивания на основе анаморфирования	9
Мельников Г. С., Самков В. М., Солдатов Ю. И., Клишо Н. А., Панков Э. Д., Коротаев В. В.	Реализация режима сверхразрешения при комплексировании терагерцового и ИК-диапазонов на QWIP-матрицах	9
Мусяков В. Л., Панков Э. Д., Тимофеев А. Н., Богатинский Е. М., Яковлев П. В.	Направления развития оптико-электронных систем с оптической равносигнальной зоной	9
Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г.	Оптическое считывание — один из путей совершенствования микроболометрических приемников излучения (по материалам зарубежной печати)	9
Торшина И. П.	Компьютерное моделирование многодиапазонных оптико-электронных систем	9

### ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

#### КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ СИСТЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Воронцов В. В., Котенко И. В.	Анализ механизма обнаружения и сдерживания эпидемий сетевых червей на основе „кредитов доверия“	11
Городецкий В. И., Карсаев О. В., Самойлов В. В., Конюший В. Г.	Язык описания многоагентных систем	11
Десницкий В. А., Котенко И. В.	Модель защиты программного обеспечения на основе механизма „удаленного доверия“	11
Иконникова А. В., Петрова И. А., Потрясаев С. А., Соколов Б. В.	Динамическая модель комплексного планирования модернизации и функционирования информационной системы	11
Кагиров И. А., Леонтьева Ан. Б.	Автоматический синтаксический анализ русских текстов на основе грамматики составляющих	11
Кириллов Н. П.	Выбор модели функционирования технической системы из множества ее альтернативных модельных представлений	11

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Конюший В. Г., Карсаев О. В.	Использование агентского подхода при конфигурировании виртуальных предприятий	11
Леонтьева Ал. Б., Кипяткова И. С.	Учет особенностей спонтанной речи при создании систем автоматического распознавания	11
Михайлов В. В., Селяков И. С.	Использование мультиагентного симулятора при моделировании распределенных систем	11
Подъячев А. Ю., Атисков А. Ю., Перминов С. В.	Тестирование процесса трансформации функциональных моделей на основе гибридных методов	11
Ронжин А. Л., Карпов А. А.	Сравнение методов локализации пользователя многомодальной системы по его речи	11
Сидельникова Е. В., Тишков А. В., Котенко И. В.	Верификация политик фильтрации с помощью исчисления событий и абдуктивного вывода	11
Соколова С. П., Кузьмина Е. А.	Интеллектуальная система мониторинга особо опасных динамических процессов	11
Шилов Н. Г.	Построение кооперативных самоорганизующихся сетей: основные задачи и технологии	11

## СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Аль-Ядуми А. А., Дегтярев С. В., Медведев А. В.	Помехоустойчивое интерференционное устройство для измерения малых угловых перемещений	2
Бехтин Ю. С., Титов Д. В.	Вейвлет-обработка ИК-изображений для компенсации дрейфа вольтовой чувствительности элементов фотоэлектронных модулей	2
Борзов Д. Б., Аль-Мараят Б. И., Типикин А. П.	Акселератор планирования размещения задач в кластерных вычислительных системах высокой готовности	2
Борзов Д. Б., Дюбрюкс С. А., Титов В. С.	Метод выявления параллелизма внутри линейных участков последовательных программ и его аппаратная реализация	2
Бугаенко Е. И., Труфанов М. И.	Способ автоматического определения и коррекции радиальной дисторсии на цифровых изображениях	2
Ватутин Э. И., Зотов И. В.	Аппаратная модель для определения минимального числа блоков при декомпозиции параллельных алгоритмов логического управления	2
Гридин В. Н., Титов В. С., Труфанов М. И.	Принципы функционирования бинокулярного оптико-электронного устройства для диагностики отклонений глазодвигательного аппарата	2
Дегтярев С. В., Медведев А. В., Мирошниченко С. Ю.	Метод автоматического кадрирования цифровых портретных изображений для цифровых фотоаппаратов	2

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Довгаль В. М., Титов В. С., Титенко Е. А.	Стратегии быстрых символьных вычислений для исчислительной производственной системы	2
Панченко В. Я., Евсеев А. В., Майоров В. С., Камаев С. В., Савиных В. П., Михайлов А. П., Хорошев М. В., Курков В. М., Вележев А. Б.	Создание рельефных карт с помощью лазерной стереолитографии по фотограмметрическим данным дистанционного зондирования Земли	2
Стрелкова А. Н., Степченко А. А.	Устройство повышения качества изображения при эндоскопии	2
Труфанов М. И., Козлов П. С., Мелик-Гайказян В. И.	Оптико-электронная система измерения поверхностного натяжения жидкости и оценки флотационной активности веществ	2
Чернецкая И. Е., Потапов Д. С.	Устройство измерения влажности агломерата методом СВЧ	2

### СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

#### ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Гольдин В. Л., Курбатов Е. М., Ямашев Э. М.	Устройства поворота солнечных батарей космических аппаратов	8
Горностаев А. И.	Контроль параметров помех на шинах питания бортовой аппаратуры	8
Горностаев А. И., Рыбаков С. А.	Задачи проектирования модулей контроля и преобразования напряжений постоянного тока	8
Ковель А. А.	Установление допусков на параметры электронных устройств по результатам многофакторного эксперимента	8
Ковель А. А., Покидько С. В.	Математическое планирование эксперимента при отработке электронных элементов	8
Лапко А. В., Шарков М. А., Лапко В. А.	Непараметрические методы обнаружения закономерностей в условиях малых выборок	8
Логанов А. А., Соколов М. И.	Оптимизация конструкции электронасосных агрегатов для повышения эффективности теплоотвода	8
Носенков А. А., Медведев В. И., Сухарев Е. Н.	Техническая совместимость приборов как основа эффективности и качества систем	8

Окончание

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Носенков А. А., Туркенич Р. П.	Задачи совершенствования информационного обеспечения отечественного приборостроения на современном этапе	8
Патраев В. Е., Максимов Ю. В.	Методы обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования	8
Ражиков В. Н., Ямашев Э. М., Ившина М. В.	Расчет распределения усилий в зубчатом планетарном редукторе К-Н-V привода радиолокационной антенны слежения за спутниками связи	8
Рубан А. И.	Модульные характеристики нелинейных статических моделей стохастических объектов	8
Соколов М. И.	Непараметрическая регрессия в условиях пропуска данных	8
<b>ИНФОРМАЦИЯ</b>		
—	С. А. Сухопаров. К 90-летию со дня рождения	3
Никифоров В. О., Гвоздев С.С.	О конкурсе научных студенческих работ 2007 г. по разделу „Оптико-электронные приборы и комплексы, оптические и лазерные технологии“	4
Никифоров В. О., Гвоздев С.С., Хамитова Л. А., Шилова А. А.	Сообщение о конкурсе выпускных квалификационных работ специалистов, бакалавров и магистров 2007 г. по оптотехнике, фотонике, оптоинформатике и приборостроению	10