

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Терехов В. А., Майков К. А., Жиряков С. М. Построение семантически содержательных правил экспертных систем в задачах с повышенной точностью решения 3
- Волхонский В. В. Критерии выбора контролируемых средствами обнаружения параметров в системе безопасности 8
- Рожнев А. Ю., Сергеев Б. С., Тильк И. Г. Повышение надежности систем передачи информации на основе теории запретов булевых функций 13

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Кузнецов А. Б., Осипов Н. А., Дорожко И. В. Методика диагностирования автоматизированных систем управления сложными объектами с использованием априорной информации 18
- Фуртат И. Б. Робастный статический алгоритм управления линейными объектами с запаздыванием 26
- Лучко С. В., Балувев С. Ю., Ватугин М. А., Гурьев И. С. Влияние внешних возмущений на погрешность инерциальных датчиков 32

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Зиятдинов С. И. Синтез оптимальных экстраполяторов 39
- Шимаров А. И. Способ определения углового положения объектов 45

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Собещук Н. О., Денисюк И. Ю., Фокина М. И. Исследование эффективности фокусировки излучения полимерными торцевыми микрооптическими элементами, сформированными путем фотополимеризации 50
- Пикуль О. Ю., Куликова Г. В., Строганов В. И. Трансформация коноскопических картин кристалла при изменении оптической системы наблюдения 55
- Балошин Ю. А., Рыжов М. Г., Силин П. Н., Сорокин А. А., Устинсков М. А. Использование ближнепольного ВЧ-зондирования для оценки степени поверхностной активности полиэтиленового покрытия трубопроводов 58

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

- Громов Д. С., Шарков А. В. Тепловые режимы гироскопических приборов на базе волоконно-оптических гироскопов 62
- Ходунков В. П. Качество псевдооживления: путь к энергоресурсосберегающим технологиям 67

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

- Юльметова О. С., Валетов В. А., Щербак А. Г. Использование теории планирования эксперимента при оптимизации шероховатости функциональных поверхностей 73
- Ларин В. П., Шелест Д. К. Операционный контроль в процессе изготовления электронных модулей с внутренним монтажом 79

- SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича) 85

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Terekhov V. A., Maykov K. A., Zhiryakov S. M.** Development of Semantically Substantial Rules for Expert Systems in Problems with Enhanced Accuracy of Solution 3
- Volkhonsky V. V.** Choice Criteria for Controlled by Means of Detection Parameters in Security System..... 8
- Rozhnev A. Yu., Sergeev B. S., Tilk I. G.** Increasing Information Transfer System Reliability on the Base of the Theory of Boolean Functions Prohibition 13

DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

- Kuznetsov A. B., Osipov N. A., Dorozhko I. V.** Diagnostics of Automated System of Control over Complex Object with the Use of A Priory Information..... 18
- Furtat I. B.** Robust Static Control Algorithm for Linear Objects with Delay 26
- Luchko S. V., Baluev S. Yu., Vatutin M. A., Guriev I. S.** Impact of External Perturbation on Inertial Sensor Errors 32

ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

- Ziatdinov S. I.** Synthesis of Optimal Data-Hold Device 39
- Shimarov A. I.** Method for Determination of Objects Angular Position..... 45

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Sobeschuk N. O., Denisiuk I. Yu., Fokina M. I.** Focusing Ability of Polymer Micro-Optical Elements on the Top of the Fiber Formed by Photopolimerisation..... 50
- Pikoul O. Yu., Kulikova G. V., Stroganov V. I.** Transformation of Crystal Conoscopic Figures under Changes of Optical Observation System 55
- Baloshin Yu. A., Ryzhov M. G., Silin P. N., Sorokin A. A., Ustinskiy M. A.** Near-Field High Frequency Sensing for Estimation of Surface Activity of Polyethylene Pipeline Cover..... 58

HEAT REGIMES AND RELIABILITY OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Gromov D. S., Sharkov A. V.** Heat Regimes of Gyroscopic Instruments on the Base of Fiber Optical Gyroscopes 62
- Hodunkov V. P.** Fluidization Quality — A Way to Energy Saving Technologies 67

INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

- Yulmetova O. S., Valetov V. A., Scherbak A. G.** Application of the Theory of Experiment Planning to Optimization of Roughness of Functional Surfaces 73
- Larin V. P., Shelest D. K.** Operational Control in the Process of Manufacturing of Electronic Modules with Internal Installation..... 79

- SUMMARY 85

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

В. А. ТЕРЕХОВ, К. А. МАЙКОВ, С. М. ЖИРЯКОВ

ПОСТРОЕНИЕ СЕМАНТИЧЕСКИ СОДЕРЖАТЕЛЬНЫХ ПРАВИЛ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ В ЗАДАЧАХ С ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТЬЮ РЕШЕНИЯ

Предлагается метод построения логико-лингвистической модели коррекции нечеткого вывода с учетом прецедентов принятия решения. На основе обобщения базисных функций Фабера — Шаудера разработана модификация алгоритма нечеткого вывода Суджено, позволяющая редуцировать ошибки решения в условиях неизменности семантики начальных определений.

Ключевые слова: логико-лингвистическая модель, алгоритм Суджено, функции Фабера — Шаудера.

Введение. В настоящее время одним из средств подготовки специалистов, ориентированных на решение сложных технических задач, являются интерактивные тренажеры, включающие в себя экспертную подсистему, содержащую понятия и слабо формализуемые правила (эвристики), применяемые экспертом-инструктором для проверки основных вариантов решения задачи, формируемых обучаемым. Сдерживающим фактором развития интерактивных тренажеров, позволяющих заменить присутствие инструктора в процессе тренировки, является необходимость удовлетворения противоречивых требований к применяемым методам поиска решения слабо формализуемых задач. С одной стороны, требуется обеспечить возможность уменьшения погрешности решения, возникающей, в частных случаях в области входных данных, вследствие слабой формализации правил его поиска. С другой стороны, необходимо не допускать модификации определений понятий и эвристик, формируемых экспертом-инструктором. Это требование обеспечивает компетентное интерактивное вмешательство системы в тренировочный процесс в целях информирующего или корректирующего воздействия.

Модификация алгоритма нечеткого вывода Суджено. Рассмотрим возможность модификации алгоритма нечеткого вывода Суджено [1] с учетом прецедентов частных решений.

Для представления функциональной зависимости вида $f: R^N \rightarrow R^M$ в слабо формализуемой задаче без ограничения общности можно полагать, что логико-лингвистическая модель задачи содержит правила получения решений r_j с ядром $\ker r_j = \langle A_j \rightarrow B_j \rangle$, $A_j = \{(X_k^{j<}, T_{J(j,k)}) \mid k = \overline{1, N}, X_k^{j<} \in R^N\}$; $B_j = (Z^{j>}, T_{J(j,k+1)})$, $Z^{j>} \in R^M$, где $X_k^{j<}$ — определяющие лингвистические переменные, $Z^{j>}$ — переменная вывода [2], $T_{J(j,k)}$ — базовое терм-множество.

Этап логического вывода алгоритма Суджено характеризует значение переменной вывода Z как линейную комбинацию определяющих переменных [3]:

$$z(x_1, \dots, x_N) = k_0 + \sum_{i=1}^N k_i x_i. \quad (1)$$

В этом случае целевая поверхность отклика выводимой переменной аппроксимируется гиперплоскостью, что может приводить на этапе композиции к получению неприемлемой по величине погрешности [4]. Осуществим модификацию алгоритма Суджено, основываясь на возможности аппроксимации функции произвольного числа переменных суммой значений вкладов каждой определяющей переменной независимо друг от друга, что показано в работах Колмогорова о представлении непрерывных функций нескольких переменных. Тогда требуемая поверхность отклика выводимой переменной может быть представлена выражением [5]

$$z(x_1, \dots, x_N) = \lim_{L \rightarrow \infty} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \delta_{l,n}(x_n), \quad (2)$$

где l — порядок (уровень) приближения, $\delta_{l,n}(x_n)$ — вклад переменной X_n в значение z на l -м уровне приближения.

Для обеспечения сходимости уравнения (2) необходимо использовать аналогию многомерного обобщения базисных функций системы Фабера — Шаудера [6] и осуществить разбиение пространства $X_1 \times \dots \times X_N$ на зоны решения Ω_d^l , так что

$$\Omega_d^l = \bigcup_i \Omega_i^{l+1}, \quad \Omega_i^{l+1} \cap \Omega_j^{l+1} = \emptyset \text{ при } i \neq j; \quad i, j = \overline{1, D_{l+1}}, \quad (3)$$

$$\forall L \in N \quad ((x_1, \dots, x_N) \in \Omega_d^L \rightarrow (\forall \Omega_i^L, i \neq d) (\delta_i^L = 0)),$$

где $\delta_d^l(x_1, \dots, x_N) = \sum_{n=1}^N \delta_{l,n}(x_n)$ — общая поправка в зоне Ω_d^l .

С учетом разбиения пространства $X_1 \times \dots \times X_N$ на зоны и требований (3) значение выводимой переменной можно представить в виде

$$z(x_1, \dots, x_N) = \lim_{L \rightarrow \infty} \sum_{l=1}^L \sum_{d=1}^{D(l)} p_d^l(x_1, \dots, x_N) \delta_d^l(x_1, \dots, x_N), \quad (4)$$

где $p_d^l(x_1, \dots, x_N) = \begin{cases} 1, & (x_1, \dots, x_N) \in \Omega_d^l, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$ — критерий необходимости учета поправки δ_d^l в ито-

говом решении.

Для расчета величины δ_d^l будем использовать преобразованное соотношение Суджено (1):

$$\delta_d^l = z(x_1, \dots, x_L) = z_{d,0}^l + K_d^l \sum_{i=1}^N (v_{d,i}^l \alpha_i(x_i)), \quad (5)$$

где K_d^l — общий коэффициент зоны Ω_d^l ; $v_{d,i}^l \in [0, 1]$ — коэффициент влияния переменной X_i в общем значении поправки; $\alpha_i(x_i) \in [0, 1]$ — значение функции принадлежности терма, расположенного в левой части продукционного правила, вычисленное на этапе фаззификации алгоритма нечеткого вывода.

Окончательно для этапа логического вывода модифицированного алгоритма Суджено значение выводимой переменной определяется как

$$z(x_1, \dots, x_N) = z_0 + \sum_{i=1}^N k_i x_i + \frac{\sum_{d=1}^D p_d^l(x_1, \dots, x_N) \left(z_{d,0}^l + K_d^l \sum_{i=1}^N (v_{d,i}^l \alpha_i(x_i)) \right)}{\sum_{d=1}^D p_d^l(x_1, \dots, x_N)}. \quad (6)$$

Модель редукции ошибок нечеткого вывода. Для редукции ошибок решения в соответствии с выражением (6) осуществляется построение логико-лингвистической продукционной модели на основе данных о частных решениях задачи — модели редукции ошибок. Модель редукции ошибок состоит из продукционных правил четырех видов:

$$\text{если } (R_{x_1} = T_{l,d,k}^{R_{x_1}}) \text{ и } \dots \text{ и } (R_{x_N} = T_{l,d,k}^{R_{x_N}}), \text{ то } (G^k = T_{l,d}^{G^k}), \quad k = \overline{0, N}; \quad (7)$$

$$\text{если } (G^0 = T_{l,d}^{G^0}) \text{ и } \dots \text{ и } (G^N = T_{l,d}^{G^N}), \text{ то } (\Omega = T_{l,d}^{\Omega}); \quad (8)$$

$$\text{если } (\Omega = T_{l,d}^{\Omega}) \text{ и } (D_{x_1}^l = T_{l,d}^{D_{x_1}^l}) \text{ и } \dots \text{ и } (D_{x_N}^l = T_{l,d}^{D_{x_N}^l}), \text{ то } (D_l = T^{D_l}); \quad (9)$$

$$\text{если } (D_1 = T^{D_1}) \text{ и } \dots \text{ и } (D_L = T^{D_L}), \text{ то } (D = D_1 + \dots + D_L). \quad (10)$$

Правила (7), (8) используются для локализации области поправки, правило (9) — для вычисления величины поправки, правило (10) определяет суммарное значение поправки. Таким образом, повышение практической приемлемости решения обеспечивается не модификацией исходной экспертной модели, с помощью которой объясняется решение, а введением дополнительной модели редукции ошибок, построенной на основе обработки частных решений задачи.

Для определения параметров правил модели редукции используются алгоритмы обработки частных решений задачи, которые обеспечивают:

- разбиение пространства входных переменных $X_1 \times \dots \times X_N$ на иерархию вложенных зон Ω_d^l , удовлетворяющих условию (3);
- построение продукционных правил вывода;
- определение положения функций принадлежности термов;
- расчет значений $z_{d,0}^l$, K_d^l , $v_{d,i}^l$ для продукционных правил вывода.

Для разбиения пространства входных переменных $X_1 \times \dots \times X_N$ на зоны Ω_d^l используется алгоритм обработки точек частных решений $P_Z = \{ \mathbf{p}_t(x_1, \dots, x_N, z) \mid t = \overline{1, T_Z} \}$, задающих значение решения z^0 при входных данных (x_1^0, \dots, x_N^0) . Зоной решения называется упорядоченная пара $\Omega = \langle B, \mathbf{c} \rangle$, где $\mathbf{c} \in P_Z$ — радиус-вектор основания зоны, $B = \{ \mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_N \}$ — система из N линейно независимых векторов (базис зоны), причем $\mathbf{b}_i = \mathbf{p}_i - \mathbf{c}$.

В процессе построения базис зоны может включать в себя как векторы стандартного базиса, так и векторы, образованные с помощью частных решений. Обработка частных решений строится таким образом, чтобы, в первую очередь, в базисах зон осуществить замещение векторов стандартного базиса векторами, образованными с помощью частных решений. При невозможности дополнения базиса формируются дополнительные зоны, смежные с первоначальными.

Основание зоны \mathbf{c} и векторы ее базиса $\{ \mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_N \}$ задают положение гиперплоскости, определяющей признак $p_d^l(x_1, \dots, x_N)$ учета поправки в итоговом решении и величину $\delta_d^l(x_1, \dots, x_N)$ этой поправки.

Значения p_d^l и δ_d^l рассчитываются следующим образом. Представив произвольный вектор $\mathbf{x} \in X_1 \times X_2 \times \dots \times X_N \times Z$ в виде суммы его ортогональных составляющих $\mathbf{x}^0 \in X_1 \times X_2 \times \dots \times X_N$ и $\mathbf{x}^\perp \in Z$, выразим поправку δ_d^l для зоны Ω_d^l путем разложения \mathbf{x} по базису зоны Ω_d^l :

$$\delta_d^l = \mathbf{x}^\perp = \sum_{n=1}^N \alpha_n \mathbf{b}_n^\perp + \mathbf{c}_{l,d}^\perp, \quad (11)$$

где α_n — коэффициенты разложения вектора \mathbf{x} по базису зоны Ω_d^l .

Обозначив $B_{n \times n} = (b_{i,j})$, $B_{n \times n}^{-1} = (b_{i,j}^{-1})$, выражение (11) преобразуем к виду

$$\delta_d^l(x_1, \dots, x_N) = \sum_{n=1}^N k_{d,n}^l x_n^* + \tilde{\delta}_d^l, \quad (12)$$

где $k_{d,n}^l = b_n^\perp \sum_{j=1}^N b_{j,n}^{-1}$, $\tilde{\delta}_d^l = \mathbf{c}_{l,d}^\perp - \sum_{n=1}^N b_n^\perp c_{l,d,n} \sum_{j=1}^N b_{j,n}^{-1}$.

Для расчета p_d^l требуется выполнение условий

$$(\mathbf{x}^0 - \mathbf{c}_{l,d}^0) \cdot \mathbf{h}_k^0 \geq 0 \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, N\}; \quad (\mathbf{x}^0 - \mathbf{c}_{l,d}^0 - \mathbf{b}_1^0) \cdot \mathbf{h}_0^0 \geq 0 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (13)$$

что справедливо при

$$q^k(x_1, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N x_i q_i^k - \tilde{q}^k \geq 0 \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, N\} \quad \text{и} \quad \delta(x_1, \dots, x_N) = \left[\sum_{i=1}^N x_i s_i - \tilde{s} \right] \in [0, 1], \quad (14)$$

где

$$q_i^k = b_{k,i} - \sum_{j=1}^N \left(\sum_{m=1}^{N-1} \left(\sum_{p=1}^{N-1} g_{n,p}^k \tilde{g}_{p,m}^k \right) g_{j,m}^k \right) b_{k,j};$$

$$\tilde{q}^k = \sum_{i=1}^N c_{i,d}^{l,d} \left[b_{k,i} - \sum_{j=1}^N \left(\sum_{m=1}^{N-1} \left(\sum_{p=1}^{N-1} g_{n,p}^k \tilde{g}_{p,m}^k \right) g_{j,m}^k \right) b_{k,j} \right];$$

$\tilde{g}_{p,m}^k$ — элемент матрицы $(G_k^T G_k)^{-1}$; $s_i = \sum_{j=1}^N b_{j,i}^{-1}$, $i = \overline{1, N}$; $\tilde{s} = \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^N b_{i,j}^{-1} \right) c_j^{l,d}$; $\mathbf{h}_k, k = \overline{0, N}$, — ортогональное дополнение к системе базисных векторов граней G_k , причем $\mathbf{h}_k \cdot \mathbf{b}_k \geq 0$ при $k = \overline{1, N}$ и $\mathbf{h}_0 \cdot \mathbf{b}_0 \leq 0$.

Выражения (11), (12) для расчета поправки δ_d^l и (13), (14) — для критерия p_d^l позволяют определить положение функций принадлежности термов в правилах модели редукции ошибок. В общем случае линейная комбинация $z = k_0 + \sum_{i=1}^N k_i x_i$ в зоне Ω с основанием $\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_{N+1})$ может быть выражена в виде

$$z = c_{N+1} + K \sum_{i=1}^N (v_i \alpha_i(x_i)),$$

где $v_i = \frac{k_i |\Omega|_i}{K}$; $K = \sqrt{\sum_{i=1}^N (k_i |\Omega|_i)^2}$; $|\Omega|_i$ — протяженность зоны вдоль оси, заданной ортом стандартного базиса e_i ; $\alpha_i(x_i)$ — функция принадлежности треугольного вида [7].

Таким образом, учет частных решений задачи в модели редукции ошибок обеспечивает локальную коррекцию результатов классического алгоритма нечеткого вывода Суджено и повышает практическую приемлемость решения без изменения начальной экспертной модели задачи.

Заключение. Рассмотренная модификация нечеткого вывода позволяет снизить влияние субъективного фактора, ухудшающего качество решения из-за неточностей, вносимых экспертом при описании системы. На практике в задачах управления и распознавания в области исходных данных при недостаточной информации о закономерностях работы системы известные алгоритмы нечеткого вывода приводят к ошибочным решениям. Предложенный подход позволяет добиться желаемого решения в любой области исходных данных, включая и те, где знания эксперта, выраженные в нечетком описании системы, оказываются неточными или ошибочными. Решение в этом случае достигается с помощью набора корректировочных данных. При этом корректировочные данные приводят не к модификации созданных экспертом правил или определений характеристических функций, а к дополнению существующего описания, что позволяет сохранить смысловое содержание нечеткого вывода решения в терминах, введенных экспертом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang L., Mendel J. M. Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning // IEEE Transact. Neural Networks. 1992. Vol. 3, N 5. P. 807—814.
2. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators // IEEE Transact. on Computers. 1994. Vol. 43, N 11. P. 1329—1333.
3. Castro J. L., Delgado M. Fuzzy systems with defuzzification are universal approximators // IEEE Transact. on System, Man, and Cybernetics. 1995. Vol. 25, N 4. P. 629—635.
4. Tsukamoto T. An approach to fuzzy reasoning method // Advances in Fuzzy Set Theory and Applications. Amsterdam: North-Holland Publishing Co., 1979. P. 137—149.
5. Жиряков С. М., Майков К. А., Рогозин О. В. Адаптация нечеткого вывода к критическим зонам ошибок управления в задачах управления // Приборы. 2009. № 2. С. 22—29.
6. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identificaton of systems and its applications to modeling and control // IEEE Transact. on System, Man, and Cybernetics. 1985. Vol. 15, N 1. P. 116—132.
7. Круглов В. В., Дли М. И. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Физматлит, 2001. 224 с.

Сведения об авторах

- Владимир Анатольевич Терехов** — канд. техн. наук; Московский государственный технический университет „Московский институт радиоэлектроники и автоматики“, кафедра технической электродинамики и электроники; профессор
- Константин Анатольевич Майков** — д-р техн. наук, профессор; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, кафедра программного обеспечения ЭВМ и информационных технологий;
E-mail: maikov@mx.bmstu.ru
- Сергей Михайлович Жиряков** — канд. техн. наук; ОАО «Российская самолетостроительная корпорация „МиГ“», Инженерный центр „ОКБ им. А. И. Микояна“, Москва;
E-mail: zs-mailbox@mail.ru

Рекомендована Московским институтом радиоэлектроники и автоматики

Поступила в редакцию
28.06.12 г.

В. В. ВОЛХОНСКИЙ

КРИТЕРИИ ВЫБОРА КОНТРОЛИРУЕМЫХ СРЕДСТВАМИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ В СИСТЕМЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Представлен анализ модели системы безопасности на основе теории множеств с учетом специфики системы безопасности, особенностей проявления угроз и условий окружающей среды. Сформулированы критерии выбора параметров объекта, контролируемых средствами обнаружения.

Ключевые слова: система безопасности, параметры средств обнаружения, критерии выбора.

Введение. Важнейшим элементом любой системы физической и информационной безопасности являются средства обнаружения угроз. При этом очевидно, что основные характеристики системы существенно зависят как от параметров самих средств обнаружения, так и от выбора физических параметров объекта, которые должны контролироваться этими средствами и которые изменяются под воздействием угроз. С этой точки зрения весьма важным представляется необходимость формулировки общих рекомендаций и критериев по выбору упомянутых параметров. В известных источниках (см., например, [1—3]) рассматриваются лишь частные практические рекомендации, требующие теоретического обобщения, аналитического обоснования и развития применительно к различным ситуациям. Поэтому задача такого обобщения, обоснования и развития представляется актуальной и рассматривается в настоящей статье.

Модель системы безопасности. Рассмотрим интегрированную систему безопасности, состоящую из нескольких подсистем. Из общей структуры технических средств системы безопасности [2] можно выделить средства обнаружения угроз и датчики контроля состояния окружающей среды, средства сбора и обработки информации и средства противодействия угрозам. Причина выбора именно этих средств очевидна — согласно общему определению систем безопасности [2], они являются обязательными элементами любой такой системы как совокупности методов и средств предупреждения, обнаружения и ликвидации угроз жизни, здоровью, окружающей среде, имуществу, информации и ресурсам.

В общем случае имеется совокупность входных воздействий, контролируемых соответствующими датчиками. Можно выделить две основные составляющие этих воздействий: 1) множество $\mathbf{E} = [E_1, E_2, \dots, E_N]$ параметров, характеризующих воздействия окружающей среды и влияющих на функционирование объекта и системы безопасности в целом; 2) множество \mathbf{O} параметров объекта, изменяющихся под воздействием угроз охраняемому объекту.

Множество \mathbf{O} состоит из подмножеств \mathbf{O}_j , определяющих физический характер проявления каждой j -й из J возможных угроз при их реализации: $\mathbf{O} = [\mathbf{O}_1, \mathbf{O}_2, \dots, \mathbf{O}_j, \dots, \mathbf{O}_J]$. Для

этих подмножеств справедливо соотношение $\mathbf{O} = \bigcup_{j=1}^J \mathbf{O}_j$. Также можно утверждать, что в

общем случае подмножества, соответствующие j -й и i -й угрозам, пересекающиеся, т.е. $\mathbf{O}_j \cap \mathbf{O}_i \neq \emptyset$. Иными словами, часть рассматриваемых параметров, характеризующих раз-

ные угрозы, могут совпадать. Например, повышение температуры в помещениях контролируемого объекта может быть вызвано либо такой угрозой, как пожар, либо неисправностью системы кондиционирования воздуха. Кроме того, при отсутствии проявлений j -й угрозы соответствующее подмножество $\mathbf{O}_j \neq \emptyset$.

Множество \mathbf{E} параметров окружающей среды, как правило, представляет собой воздействия, сходные по характеру с проявлением угроз. К примеру, для доплеровских датчиков это может быть движение некоторых объектов (лопастей вентиляторов, жидкостей в трубах и т.п.), приводящее к такому же эффекту, как и обнаружение нарушителей. Следовательно, воздействия окружающей среды могут совпадать с проявлениями угроз, т.е. $\mathbf{E} \cap \mathbf{O} \neq \emptyset$. Таким образом, для обнаружения j -й угрозы необходимо рассматривать совокупность $\mathbf{S}_j = (\mathbf{O}_j \cup \mathbf{E})$ воздействий среды и проявлений угрозы.

В интегрированных системах безопасности имеется обычно N подсистем с различным функциональным назначением, например: охранная и пожарная сигнализация, контроль доступа, ТВ-наблюдение и др. В общем случае n -я подсистема, $n = 1, \dots, N$, контролирует набор параметров \mathbf{S}_j^{nn} , зависящих от физических проявлений соответствующей j -й угрозы. При этом очевидно, что должно выполняться условие $\mathbf{S}_j^{nn} \subseteq \mathbf{S}_j$. Следовательно, на основе множеств \mathbf{E} и \mathbf{O} можно сформировать подмножества \mathbf{S}_j^{nn} , контролируемые соответствующими n -ми подсистемами. Эти подмножества $\mathbf{S}_j^{nn} \subseteq (\mathbf{O}_j \cup \mathbf{E})$ могут включать в себя часть или все элементы множеств \mathbf{E} и \mathbf{O} .

Критерии выбора параметров. Рассмотрим особенности выбора набора параметров, контролируемых устройствами обнаружения. Для начала ограничимся случаем, когда каждая n -я подсистема контролирует только j -ю угрозу, соответствующую основному функциональному назначению этой подсистемы. Тогда $n = j$, а соответствующее подмножество будет \mathbf{S}_j^{jj} . К примеру, подсистема пожарной сигнализации контролирует возникновение такой угрозы, как возгорание.

Сформулируем основные критерии выбора этих параметров.

1. Как отмечалось, в общем случае подмножества \mathbf{S}_j^{jj} включают в себя все элементы множеств \mathbf{E} и \mathbf{O}_j , в том числе:

— подмножество, соответствующее пересечению $\mathbf{O}_j \cap \mathbf{E}$ и определяющее те характеризующие проявление угрозы параметры, на которые может оказывать влияние окружающая среда;

— подмножество $\mathbf{E} \setminus \mathbf{O}_j$, определяющее параметры, характеризующие воздействия окружающей среды, на которые не влияет наличие угроз.

Отсюда следует первый критерий выбора контролируемых параметров: $\mathbf{S}_j^{jj} \cap (\mathbf{E} \setminus \mathbf{O}_j) \rightarrow \emptyset$, т.е. датчики контроля состояния объекта должны быть *инвариантны к воздействиям окружающей среды*, которые не совпадают с проявлением угроз. Например, для пассивных инфракрасных (ПИК) датчиков — это минимизация воздействия на них зачатки, которая не представляет собой проявление угрозы.

2. Второй критерий можно сформулировать как $\mathbf{E} \cap \mathbf{O}_j \rightarrow \emptyset$. Физически это означает необходимость *минимизации воздействия окружающей среды на параметры, характеризующие проявление угрозы*. Очевидно, что на характер проявления угрозы и, как следствие, на

множество \mathbf{O}_j невозможно оказать сколько-нибудь заметное влияние. То же самое можно сказать и о множестве \mathbf{E} параметров окружающей среды. Уровень влияния \mathbf{E} обычно можно только свести к минимуму, например, устранив источники воздушных потоков и перепадов температур в помещении, где используются ПИК-датчики движения. Как частный случай, второй критерий можно записать в виде соотношения $\mathbf{S}_j^{nj} \subseteq (\mathbf{O}_j \setminus \mathbf{E})$, что соответствует исключению из анализа части параметров объекта, совпадающих с параметрами окружающей среды. Однако в этой ситуации могут возникнуть противоречия с критерием информативности, который рассматривается ниже (см. п. 7).

3. Поскольку на практике условия, соответствующие второму критерию, не всегда выполнимы, то можно говорить о необходимости обеспечить *минимум возможного влияния окружающей среды*: $\mathbf{E} \cap \mathbf{S}_j^{nj} \rightarrow \emptyset$. Это достигается выбором помехоустойчивых устройств, инвариантных к тому или другому виду воздействия, и правильностью установки таких устройств. Для предыдущего примера это означает выбор расположения ПИК-датчика, при котором засветка прямым солнечным светом исключена.

4. Расширим ограничения на рассматриваемую задачу и проанализируем возможность *обнаружения одной угрозы разными подсистемами*. С этим неотъемлемо связана возможность обнаружения разных угроз одной подсистемой.

Пусть каждой j -й подсистеме соответствует свое подмножество контролируемых параметров \mathbf{S}_j^{nj} . Тогда если подмножество \mathbf{O}_i проявления i -й угрозы и подмножество \mathbf{S}_j^{nj} параметров, контролируемых j -й подсистемой, непересекающиеся, т.е. $\mathbf{S}_j^{nj} \cap \mathbf{O}_i = \emptyset$, то такая подсистема может обнаруживать только „свои“ угрозы (для обнаружения которых эта подсистема функционально предназначена, т.е. $\mathbf{S}_i \cap \mathbf{O}_j \neq \emptyset$). В противном случае, если $\mathbf{S}_j^{nj} \cap \mathbf{O}_i \neq \emptyset$, у такой подсистемы появляется возможность обнаруживать не только „свою“ j -ю угрозу, но и i -ю угрозу „другой“ подсистемы. Для этого необходимо выполнение условий $\mathbf{S}_j^{nj} \cap \mathbf{O}_i \neq \emptyset$, $\mathbf{S}_i^{ni} \cap \mathbf{O}_j \neq \emptyset$, $i, j \in 1, \dots, J$. По сути эти два условия идентичны: первое соответствует возможности одной подсистемы обнаруживать разные угрозы, а второе — возможности обнаружения одной угрозы разными подсистемами. Иными словами, кроме основного функционального назначения такая подсистема сможет реализовать функции и других подсистем по обнаружению угроз. К примеру, обнаружение несанкционированного проникновения нарушителя осуществляется, прежде всего, предназначенной для этого подсистемой охранной сигнализации. Однако в рассматриваемом случае оно может быть обнаружено также подсистемами контроля доступа и ТВ-наблюдения. Так, например, признаки пожара — это повышение температуры, изменения состава воздуха за счет появления частиц дыма, видимые изменения (задымление, пламя). Типичные датчики системы пожарной сигнализации реагируют на первые два проявления, а система ТВ-наблюдения — на третье. Значит, система ТВ-наблюдения может решать и задачи обнаружения возгорания.

На этом имеет смысл остановиться подробнее. Учет данного критерия позволит достичь выигрыша в вероятности обнаружения угрозы. В частности, в работе [2] приведено выражение для условного предотвращенного ущерба:

$$Y_{\text{п}} = V \prod_{j=1}^J \left[1 - Y_j^{\text{н}} \prod_{n=1}^N (1 - p_{nj}^{\text{п}}) \right],$$

где V — важность, значимость объекта защиты, в относительных единицах; J — количество угроз; U_j^H — максимальный относительный ущерб, наносимый j -й угрозой; p_{nj}^H — вероятность предотвращения n -й подсистемой безопасности j -й угрозы.

Также в этой работе выполнены расчеты, которые показывают, что использование для обнаружения одной угрозы нескольких подсистем позволяет повысить эффективность системы безопасности, т.е. существенно увеличить значение условного предотвращенного ущерба U_{Π} .

5. Чтобы обеспечить *различимость проявлений разных угроз* необходимо выполнение условий $(S_j^{nj} \cap O_i) \cap (S_j^{nj} \cap O_j) = \emptyset$, $(S_j^{nj} \cap O_j) \cap (S_i^{ni} \cap O_j) = \emptyset$, $i, j \in 1, \dots, J$. Применительно к физической реализации это означает использование различных (несовпадающих) контролируемых параметров для разных угроз.

6. Поскольку при несанкционированном проникновении нарушитель может применять методы противодействия средствам обнаружения (активные и пассивные) и различные средства снижения вероятности обнаружения, целесообразно рассмотреть возможность *минимизировать последствия таких действий*. Применительно к частной задаче выбора структуры средств обнаружения данная возможность рассмотрена в работе [3]. В этой работе показана необходимость выполнения условия $\bigcup_{m \in M} B_m^j \cap \bigcup_{l \in L} B_l^k = \emptyset$, $j, k \in J$, означающего, что события

любой пары m -го и l -го пассивных воздействий B_m^j и B_l^k на средства обнаружения j -й и k -й угроз, применяемых квалифицированным нарушителем, должны быть несовместными в целях обеспечения невозможности одновременного выполнения этих воздействий. Этот подход можно развить и для общего случая как пассивных воздействий, так и совместных активных A_m^j и пассивных B_l^j воздействий, т.е. $\bigcup_{m \in M} A_m^j \cap \bigcup_{l \in L} B_l^k = \emptyset$, $\bigcup_{m \in M} A_m^j \cap \bigcup_{l \in L} B_l^k = \emptyset$, $j, k \in J$, что также соответствует требованию несовместности рассматриваемых воздействий.

Применительно к рассматриваемой задаче этот критерий соответствует условию выбора параметров $S_j \cap S_i \rightarrow \emptyset$, которое заключается в следующем. При использовании разными подсистемами одних и тех же параметров, характеризующих проявление угрозы (элементов множества S_j) и требующих одних и тех же физических принципов обнаружения, возникают новые угрозы, которые могут привести к ухудшению параметров системы, а именно:

— изменение какого-либо из элементов множества S_j в худшую сторону при любых воздействиях (например, окружающей среды) будет оказывать одинаковое негативное влияние на обе подсистемы;

— дополнительные искусственные воздействия, снижающие интенсивность проявления угрозы (например, действия квалифицированного нарушителя [1, 3]), будут одинаково снижать характеристики обеих подсистем.

В этой связи для обнаружения различных физических проявлений угроз имеет смысл использовать разные подсистемы. Применительно к синтезу структуры средств обнаружения в целом целесообразно также следовать рекомендациям, приведенным в работе [1].

7. Для определения степени полноты использования информации о проявлениях угрозы необходимо ввести критерий $S_j \rightarrow O_i$ *максимальной информативности средств обнаружения*. Этот критерий показывает целесообразность использования всех характеризующих проявление угрозы параметров, а также соответствующих многопараметрических средств обнаружения.

Порядок и приоритетность выполнения условий, заданных сформулированными критериями, могут быть различными для разных конкретных задач. Выполнение этих условий, тем

не менее, позволяет повысить как вероятность обнаружения угроз, так и защищенность системы от воздействий нарушителя и окружающей среды.

Заключение. Предложенная модель системы безопасности на основе теории множеств учитывает как специфику системы, так и особенности проявления угроз объекту обеспечения безопасности и воздействия окружающей среды.

На основе предложенной модели сформулированы критерии выбора параметров, контролируемых средствами обнаружения системы, которые заключаются в анализе соотношений между множествами параметров объекта и параметров, характеризующих проявления угроз и воздействия окружающей среды. Сформулированные критерии можно использовать при структурном синтезе системы безопасности или разработке устройств обнаружения.

Проанализированы возможности обнаружения угроз разными подсистемами и сформулированы критерии выбора контролируемых параметров, позволяющие повысить вероятность обнаружения, в том числе, в условиях пассивного и активного противодействия нарушителя средствам обнаружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарсия М. Проектирование и оценка систем физической защиты. М.: Мир, 2003. 388 с.
2. Волхонский В. В. Системы охранной сигнализации. СПб: Экополис и культура, 2005. 204 с.
3. Волхонский В. В., Крупнов А. Г. Особенности разработки структуры средств обнаружения угроз охраняемому объекту // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2011. № 4(74). С. 131—136.

Сведения об авторе

Владимир Владимирович Волхонский

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники;
E-mail: volkhonski@mail.ru

Рекомендована кафедрой
твердотельной оптоэлектроники

Поступила в редакцию
21.11.11 г.

А. Ю. РОЖНЕВ, Б. С. СЕРГЕЕВ, И. Г. ТИЛЬК

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ЗАПРЕТОВ БУЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ

Предложена схема повышения надежности систем передачи информации, построенная с использованием алгоритма шифрования повышенной стойкости. Надежность алгоритма основана на работе генератора гаммы шифра, блок нелинейного усложнения которого спроектирован на базе теории запретов булевых функций.

Ключевые слова: защита информации, теория запретов булевых функций, гамма шифра, криптоанализ генераторов псевдослучайной последовательности.

При проектировании систем передачи данных в большинстве случаев достаточно детально исследуется помехозащищенность канала передачи информации. Для этого применяются методы, обеспечивающие увеличение отношения сигнал/шум на входе, помехоустойчивое кодирование и т.п. Однако при этом зачастую не рассматривается задача защиты системы от активного источника сбоев — злоумышленника. Основная цель защиты — предотвращение утечки информации, что возможно обеспечить путем обратимого однозначного преобразования сообщений или хранящихся данных в форму, непонятную для посторонних или неавторизованных лиц.

Для решения этой задачи предлагается построить систему шифрования передаваемой информации, основанную на методе гаммирования. К. Шенноном доказано, что если ключ является фрагментом истинно случайной двоичной последовательности с равномерным законом распределения, причем его длина равна длине исходного сообщения и используется этот ключ только один раз, после чего уничтожается, такой шифр является абсолютно стойким, его невозможно раскрыть, даже если криптоаналитик располагает неограниченным запасом времени и неограниченным набором вычислительных ресурсов [1].

Существенный недостаток абсолютной стойкости шифра — это равенство объема основной информации и суммарного объема передаваемых сообщений. Таким образом, построить эффективный криптоалгоритм можно лишь отказавшись от абсолютной стойкости. Данный результат достигается использованием метода гаммирования, под которым понимают процедуру наложения (с помощью некоторой функции F) гаммы шифра, т.е. псевдослучайной последовательности (ПСП) с выходов генератора, на входную информационную последовательность [2].

Надежность шифрования методом гаммирования определяется качеством генератора ПСП. Один из наиболее эффективных методов криптографического анализа генераторов базируется на использовании теории запретов [3, 4]. Поэтому в целях построения алгоритма повышенной надежности в основу его разработки положен современный математический аппарат теории запретов булевых функций.

Булевы функции без запрета (совершенно уравновешенные функции) широко применяются в теории передачи информации и криптологии. Это обусловлено тем, что при их использовании в генераторах псевдослучайных последовательностей на выходе формируется последовательность, статистические свойства которой максимально приближены к свойствам равновероятной последовательности. Если функция, реализующая работу устройства, имеет запрет, это означает, что не все комбинации битов могут появиться в канале связи: таким образом криптоаналитик получает дополнительную информацию.

Пусть $f(x_1, x_2, \dots, x_n) \in F_n$, т.е. f — булева функция n переменных. Пусть некоторое устройство (конечный автомат) преобразует произвольную входную двоичную последовательность в выходную двоичную последовательность по следующему закону:

$$f(x_s, x_{s+1}, \dots, x_{s+n-1}) = y_s, \quad s = 1, 2, \dots, l, \quad (1)$$

где $f \in F_n$, l — натуральное число.

Таким образом, это устройство преобразует последовательность $x = (x_1, x_2, \dots, x_{l+n-1}) \in V_{l+n-1}$ в последовательность $y = (y_1, y_2, \dots, y_l) \in V_l$ для любого натурального числа l . Такое устройство называется кодирующим устройством с конечной памятью и без обратной связи.

Система уравнений (1) с фиксированной булевой функцией совместна либо для любого натурального числа l при любых значениях правых частей. Если существует такое число l^* и такой набор $\tilde{y} = (\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_{l^*})^T \in V_{l^*}$, при которых система уравнений (1) несовместна, т.е. выходная последовательность $\tilde{y} \in V_{l^*}$ не может быть получена с помощью данного кодирующего устройства ни при каких входных последовательностях $x = (x_1, x_2, \dots, x_{l^*+n-1})^T$, то система уравнений (1) преобразуется к виду

$$f(x_s, x_{s+1}, \dots, x_{s+n-1}) = \tilde{y}_s, \quad s = 1, 2, \dots, l^*. \quad (2)$$

Здесь и далее будем представлять функции в виде полинома Жегалкина.

Определение 1 [3]. Булева функция $f \in F_n$ называется функцией без запрета, если для любого натурального числа l и для любого набора $y = (y_1, y_2, \dots, y_l) \in V_l$ система уравнений (1) совместна. В противном случае функция f называется функцией запрета, а набор $\tilde{y} = (\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_{l^*}) \in V_{l^*}$, для которого система уравнений (1) несовместна, называется запретом булевой функции f длины l^* .

Определение 2 [3]. Булева функция $f \in F_n$ называется сильно равновероятной, если для любого натурального числа l и для любого набора $y = (y_1, y_2, \dots, y_l) \in V_l$ система уравнений (1) имеет ровно 2^{n-1} решений.

Теорема [3]. Булева функция $f \in F_n$ не имеет запрета тогда и только тогда, когда она сильно равновероятна.

Доказательство. Рассмотрим функцию 4 переменных вида

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = x_1 + x_2 + x_3 + x_1x_2 + x_2x_4 + x_1x_2x_4. \quad (3)$$

Доказательство отсутствия запрета функции (3) приведено в работе [5] на основе построения графа сдвигов [6]. Кроме того, эта функция обладает правым барьером длиной 3, что следует из работы [7].

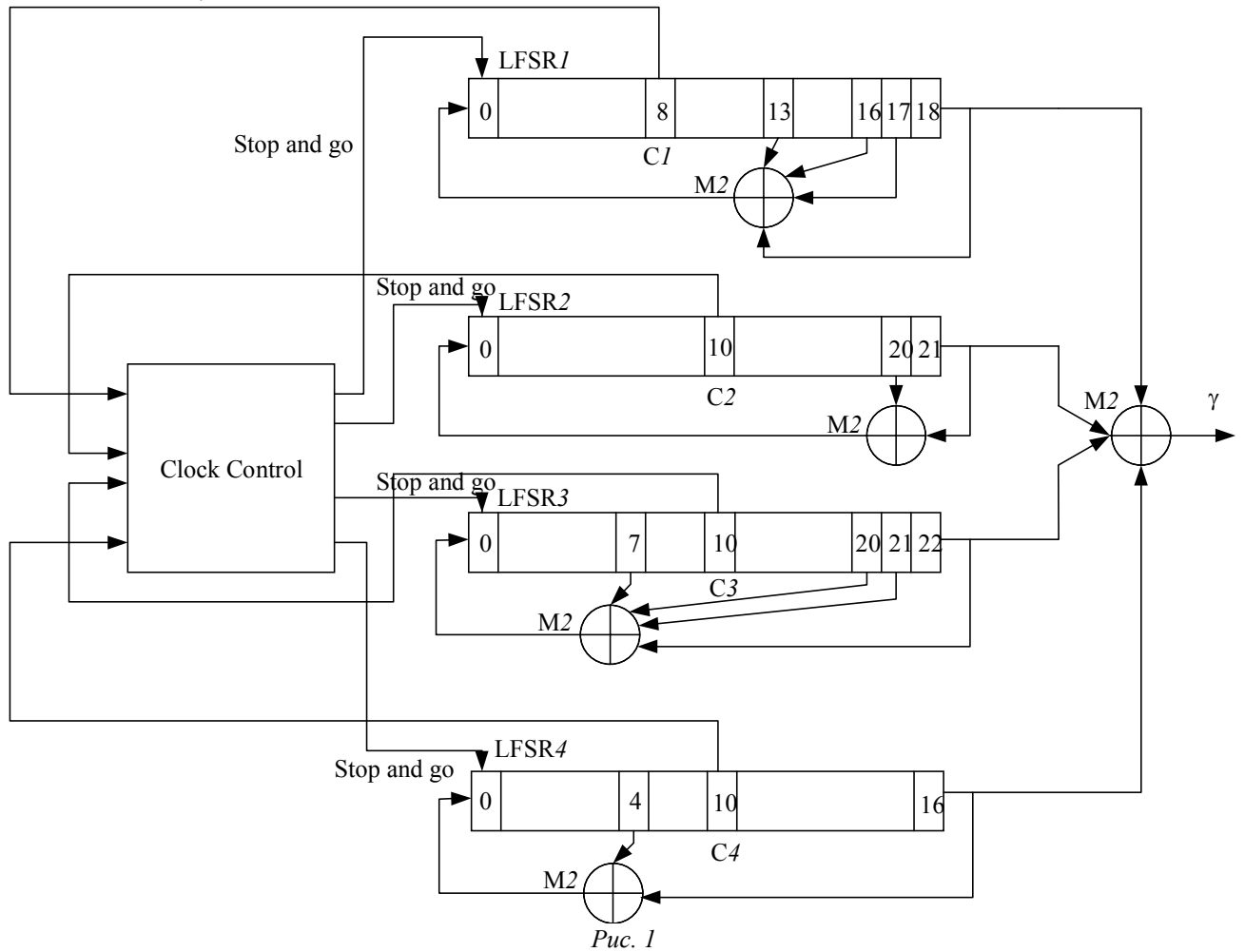
Применим данную функцию для построения блока нелинейного усложнения генератора ПСП с использованием алгоритма шифрования ТКС-Л, входные биты будем получать с регистров сдвига с линейной обратной связью (LFSR), полиномы обратной связи выберем из числа неприводимых многочленов (таблицу неприводимых многочленов можно найти в работе [8]).

Схема алгоритма шифрования ТКС-Л представлена на рис. 1 (здесь γ — гамма шифра).

Приведем формальное описание алгоритма. Пусть $f_i(z) = \sum_{l=0}^{r_i} f_{i,l} z^l$ — известный полином обратной связи LFSR $_i$ длиной r_i , $i = 1, 2, 3, 4$. Известно, что $r_1 = 19$, $r_2 = 22$, $r_3 = 23$, $r_4 = 17$. Известно также, что полиномы обратной связи разрежены. Пусть $S_i(0) = (x_i(t))_{t=0}^{r_i-1}$ — начальное заполнение LFSR $_i$ и $x_i = (x_i(t))_{t=0}^{\infty}$ — соответствующая порождаемая в LFSR $_i$ последова-

тельность максимальной длиной (M-последовательность) с периодом $2^{r_i} - 1$, которая рекур-

$$\text{рентна } x_i(t) = \sum_{l=1}^{r_i} f_{i,l} x_i(t-l), t \geq r_i.$$



Пусть $S_i(t) = (s_{i,l}(t))_{l=1}^{r_i}$ — состояние LFSR_i в момент $t \geq 0$ в схеме движения “Stop and go”, а τ_i — номер ячейки в регистре LFSR_i, содержимое которой используется для управления движением. При этом полагается, что $\tau_1 = 8$, $\tau_2 = 10$, $\tau_3 = 10$, $\tau_4 = 10$. Тогда управляющая движением регистров последовательность $C(t) = (C(t))_{t=1}^{\infty}$ задается как

$$C(t) = g(s_{1,\tau_1}(t), s_{2,\tau_2}(t), s_{3,\tau_3}(t), s_{4,\tau_4}(t)),$$

где g — это функция $f(x_1, x_2, x_3, x_4) = x_1 + x_2 + x_3 + x_1x_2 + x_2x_4 + x_1x_2x_4$ (см. формулу (3)); причем если значение управляющего бита регистра $s_{i,\tau_i}(t)$ совпадает с выходным значением этой функции, то такой регистр сдвигается.

О поведении блока Clock Control (см. рис. 1) можно судить по таблице истинности функции (3) (см. таблицу).

x_1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
x_2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
x_3	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
x_4	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
$f(x_1, \dots, x_4)$	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0

Начальное заполнение LFSR определяется в терминах секретного шифра (ключа) в соответствии с уникальным номером фрейма. Уникальный номер фрейма состоит из 22 бит, генерируемых счетчиком и, следовательно, отличающихся для каждого нового сообщения. Секретный сеансовый ключ длиной 81 бит первым загружается в регистры (начальное заполнение состоит из нулей), а затем 22-битовый номер фрейма добавляется в последовательности обратной связи каждого регистра в то время, когда они сдвигаются по описанному в таблице закону. Строго говоря, если $p = (p(t))_{t=-21}^0$ — открытый ключ, то для каждого t , $-21 \leq t \leq 0$, регистры сначала сдвигаются по заданному закону “Stop and go”, а затем бит $p(t)$ добавляется в последнюю ячейку каждого LFSR. После 22 таких шагов заполнения LFSR образуют секретный ключ сообщения при генерации шифрующей гаммы. Далее шифрование осуществляется по „классической“ схеме гаммирования, приведенной на рис. 2, где G — генератор псевдослучайной последовательности, F — линейная функция гаммирования, F^{-1} — функция, обратная F .

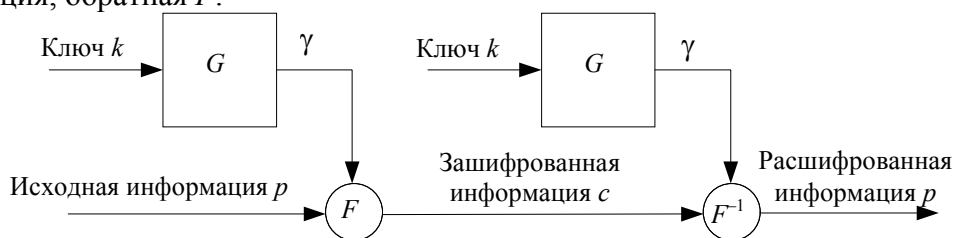


Рис. 2

Предложенный алгоритм защиты систем передачи информации построен на основе современного математического аппарата теории запретов булевых функций. Приведенная схема защиты может быть использована в различных системах передачи при необходимости защиты значимых команд или другой важной информации. В частности, на железнодорожном транспорте [9] применение такого алгоритма целесообразно в канале связи стационарного объекта с локомотивом посредством радиоканала. Информация, передаваемая по этому каналу, непосредственно влияет на безопасность движения поездов, поэтому задача системы защиты передаваемой информации от перехвата и подмены особенно актуальна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шеннон К. Теория связи в секретных системах // К. Шеннон. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. С. 333—369.
2. Поточные шифры / А. В. Асосков, М. А. Иванов, А. А. Мирский, А. В. Рузин, А. В. Сланин, А. Н. Тютвин. М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2003. 336 с.
3. Логачев О. А., Сальников А. А., Яценко В. В. Булевы функции в теории кодирования и криптологии. М.: МЦНМО, 2004. С. 470.
4. Сумароков С. Н. Запреты двоичных функций и обратимость для одного класса кодирующих устройств // Обзорение прикладной и промышленной математики. 1994. Т. 1, вып. 1. С. 33—35.
5. Рожнев А. Ю., Титов С. С. Исследование булевых функций на запрет в системах связи на железнодорожном транспорте // Вестн. УрГУПС. 2011. № 3(11). С. 21—27.
6. Смышляев С. В. Построение классов совершенно уравновешенных булевых функций без барьера // Прикладная дискретная математика. 2010. № 3(9). С. 41—50.
7. Логачев О. А., Смышляев С. В., Яценко В. В. Новые методы изучения совершенно уравновешенных булевых функций // Дискретная математика. 2009. Т. 21, вып. 2. С. 51—74.
8. Schneier B. Applied cryptography. N.Y.: John Wiley & Sons. 1996. P. 312.
9. Волынская А. В., Сергеев Б. С. Предпосылки применения псевдослучайных сигналов-переносчиков в каналах передачи информации железнодорожного транспорта // Транспорт. Наука, техника, управление: Науч.-информ. сб. ВИНТИ РАН. 2011. № 6. С. 39—42.

Сведения об авторах

- Алексей Юрьевич Рожнев** — аспирант; Уральский государственный университет путей сообщения, кафедра электрических машин, Екатеринбург; E-mail: alexon@k66.ru
- Борис Сергеевич Сергеев** — д-р техн. наук, профессор; Уральский государственный университет путей сообщения, кафедра электрических машин, Екатеринбург; E-mail: sergeew@uralmail.com
- Игорь Германович Тильк** — канд. техн. наук; Уральский государственный университет путей сообщения, НПЦ „Промэлектроника“, Екатеринбург; директор; E-mail: I_Tilk@nrcprom.ru

Рекомендована кафедрой
автоматики, телемеханики и связи
на железнодорожном транспорте УрГУПС

Поступила в редакцию
24.05.12 г.

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 629.7.071

А. Б. КУЗНЕЦОВ, Н. А. ОСИПОВ, И. В. ДОРОЖКО

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассматривается задача повышения достоверности диагностирования сложных технических систем в условиях неопределенности. Разработана методика оптимальной стратегии диагностирования сложных систем с использованием аппарата байесовских сетей доверия.

Ключевые слова: диагностирование, байесовская сеть доверия, достоверность, апостериорный вывод.

Введение. При диагностировании сложных технических систем проблема оперативного и достоверного определения вида их состояния весьма актуальна. Проблема достоверности диагностирования особенно важна для современных автоматизированных систем управления подготовкой и пуском ракет космического назначения (АСУ ПП РКН). Низкое качество диагностирования может привести к принятию ошибочных решений по восстановлению таких систем либо к запуску ракет с неисправной бортовой аппаратурой.

Постановка задачи. Задача повышения достоверности диагностирования АСУ ПП РКН_д формулируется в рамках модели M_d , представленной в виде следующих множеств:

$$M_d = \langle S, Pr, L, W, Y, \Pi, \Omega, T^+(t_0), P, \Theta \rangle,$$

где

$S = \{S_i \mid i = \overline{0, m}\}$ — множество видов технических состояний (ТС) системы;

$Pr = \{pr_j \mid j = \overline{1, n}\} = \{pr_{j_k} \mid j = \overline{1, n}; k_j = \overline{1, \gamma_j}\}$ — множество диагностических признаков (ДП) системы, где pr_{j_k} — подпризнак j -го ДП, состоящего из γ_j подпризнаков;

$L = \{l_{ij} \mid i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$ — множество интервалов, определяющих границы изменения $pr_{j_k} \in Pr$ для вида технического состояния $S_i \in S$;

$W: S \times Pr \rightarrow L$ — отображение, устанавливающее связь между $S = \{S_i \mid i = \overline{0, m}\}$ и $Pr = \{pr_j \mid j = \overline{1, n}\}$, с одной стороны, и множеством $L = \{l_{ij} \mid i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$ — с другой, такое что $l_{ij} = W(S_i, pr_{j_k})$, $l_{ij} \in L$, $S_i \in S$, $pr_{j_k} \in Pr$;

$Y = \{y_j \mid j = \overline{1, n}\}$ — множество значений диагностических признаков;

$\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1, n}\}$ — множество проверок диагностических признаков, для которых заданы $A = \{\alpha_j | j = \overline{1, n}\}$ и $B = \{\beta_j | j = \overline{1, n}\}$ — вероятности ошибок (1-го и 2-го рода) проверок π_j , а также $T = \{\tau_j | j = \overline{1, n}\}$ — длительности проверок ДП;

$\Omega = \{R_\omega | \omega = 0, \dots, (2^{m+1} - 1)\}$ — алгебра событий, заданная на множестве $S = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$, в которой элементы R_ω — это состояния процесса диагностирования, формируемые в качестве исходов проведенных проверок на различных этапах диагностирования;

$T^+(t_0) = [t_0, +\infty)$ — множество моментов времени, где t_0 — начальный момент, а $t_d \in T^+(t_0)$ соответствует моменту начала диагностирования;

$P = \{P(R, t_d) | R \in \Omega, t_d \in T^+(t_0)\}$ — вероятностная мера, заданная на алгебре событий;

Θ — априорная информация, представленная в виде статистических данных об изделиях-аналогах (например, интенсивности отказов блоков системы — $\Lambda = \{\lambda_i | i = \overline{1, m}\}$) либо мнений экспертов.

Требуется определить состав и последовательность (упорядоченное множество) проверок диагностических признаков стратегии $STR_z \subseteq STR$, обеспечивающей определение соответствующего технического состояния системы с максимальной достоверностью:

$$STR^* = \arg \max_{z \in Z} \{\overline{D}(STR_z)\},$$

где $\overline{D}(STR_z)$ — средняя достоверность z -й стратегии диагностирования.

В рамках задачи приняты следующие допущения и ограничения:

- виды технического состояния должны быть наблюдаемы;
- отказы носят одиночный характер;
- продолжительность диагностирования не должна увеличиться.

Для решения задачи были выбраны байесовские сети доверия (БСД), обладающие следующими преимуществами:

- высокой эффективностью решения задач для сложных систем с множеством наблюдаемых переменных;
- возможностью учета новой поступающей информации — свидетельств (новых данных о результатах проверок диагностических признаков или информации о техническом состоянии системы);
- возможностью обработки статистических данных и экспертных оценок;
- способностью к обучению.

Основопологающим в байесовской сети доверия является апостериорный вывод. Суть его заключается в следующем: при поступлении свидетельства необходимо приравнять к нулю несовместимые с ним вероятности исходов и пронормировать, учитывая априорные данные, вероятности оставшихся исходов, так чтобы их сумма составляла единицу [1]. На основе апостериорного вывода в БСД и прямого принципа динамического программирования [2] была разработана методика синтеза оптимальной по достоверности стратегии диагностирования АСУ сложными техническими объектами на основе байесовских сетей доверия.

Методика диагностирования. Разработанная методика, в отличие от известных, обладает такими возможностями, как:

- учет различных законов распределения непрерывных диагностических признаков;
- учет поступления новой информации;
- охват значительного количества диагностических признаков и видов технического состояния системы и связей между ними;

— учет динамики априорной информации при синтезе стратегии.

Методика представляет собой выполнение следующих действий.

1. Построить модель диагностирования на основе БСД:

— задать топологию БСД (причинно-следственные связи между множествами $S = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$ и $Pr = \{pr_j | j = \overline{1, n}\}$);

— указать априорную информацию $\Theta (\{P(S_i) | i = \overline{0, m}\}, t_d, \{\tau_j | j = \overline{1, n}\}, \{\alpha_j | j = \overline{1, n}\}, \{\beta_j | j = \overline{1, n}\})$;

— задать модель наблюдения ($\{P(pr_j / S_i) | i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$), используя, в том числе, различные законы распределения непрерывных ДП внутри интервалов;

— на основе априорной информации Θ задать модель перехода: задать вероятности технических состояний в текущий момент времени в зависимости от технических состояний в предыдущие моменты времени [3]; если ТС $S_i(t)$ зависит только от $S_i(t-1)$, то задается модель перехода 1-го порядка; модели перехода более высоких порядков позволяют уточнить модель процесса диагностирования (например, для имитации временных отказов), однако увеличивают ее сложность.

2. Синтезировать с помощью апостериорного вывода байесовских сетей доверия и прямого принципа динамического программирования оптимальную по достоверности стратегию диагностирования.

Шаг 1. При начальной неопределенности $R_0 = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$ распространить возможные результаты проверок диагностических признаков $\{< pr_{j_k_j} >\}$ в БСД, учитывая t_d и τ_j .

Шаг 2. Найти возможные промежуточные состояния $R_\omega (\omega = 1, \dots, (2^{m+1} - 2))$, которые формируются в качестве исходов проведенных проверок $< pr_{j_k_j} > : R_0 \rightarrow R_\omega$, если $y_j \in I_{j_k_j}$, при этом $R_\omega = \{S_i \in R_0 | i: \bigcap_{\{i\}} I_{ij} \neq \emptyset\}$.

Шаг 3. Используя полученный в результате распространения свидетельств $\{< pr_{j_k_j} >\}$ в БСД набор апостериорных вероятностей $\{P(S_i / pr_{j_k_j})_{t=t_d+\tau_j}, i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$, определить для каждой проверки значение функционала. Функционалом являются средневзвешенные по $\{P(S_i)_{t=t_d+\tau_j}, i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$ значения условных вероятностей зависимости видов технических состояний от результатов выбранных проверок:

$$\overline{D}(\pi_j) = \sum_{\substack{i: S_i \in R, \\ i = \overline{0, m}}} \sum_{\substack{j: I_{ij} \neq \emptyset, \\ k_j = \overline{1, \gamma_j}}} P(S_i / pr_{j_k_j})_{t=t_d+\tau_j} P(S_i)_{t=t_d+\tau_j}.$$

Шаг 4. Для одинаковых промежуточных состояний найти проверку, которая обладает максимальным значением функционала.

Шаг 5. Для полученных промежуточных состояний, учитывая проверку, определенную на шаге 4, найти допустимые проверки и осуществить распространение возможных результатов проверок диагностических признаков в БСД в целях нахождения новых возможных промежуточных состояний.

Шаг 6. Выполнить шаги 3—5. Данный шаг повторяется до тех пор, пока все промежуточные состояния не будут состоять из единственного вида технического состояния $R = \{S_i\}$.

Шаг 7. Выполняя обратный ход от $\{S_0\}, \{S_1\}, \dots, \{S_m\}$ к $R_0 = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$, построить оптимальную стратегию диагностирования, обладающую максимальной средней достоверностью.

3. Диагностирование по синтезированной оптимальной стратегии.

4. Обучение. Учет полученного сценария стратегии диагностирования, корректировка априорной информации.

Модель диагностирования с использованием БСД представлена на рис. 1

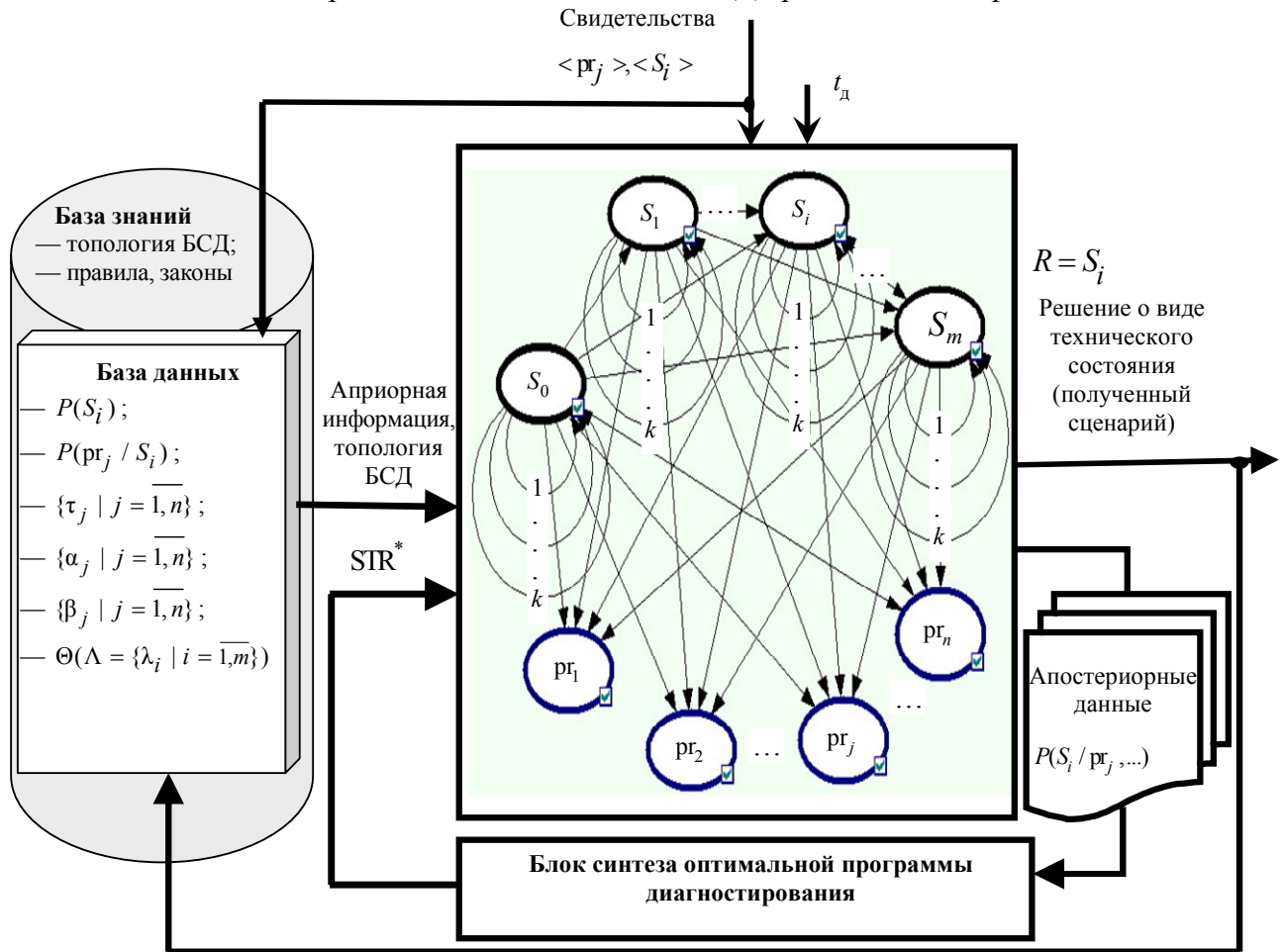


Рис. 1

Приведем решение задачи синтеза оптимальной по достоверности стратегии диагностирования на примере стойки „Устройство электропитания“ (УЭП), входящей в состав технологического оборудования АСУ ПП РКН „Союз-2“. Стойка УЭП предназначена для подачи стабилизированного гарантированного питания на устройства сопряжения с объектом, а также для сбора и обработки диагностической информации с этих стоек и смежных систем.

Состав стойки УЭП и значения интенсивности отказов блоков приведены в табл. 1.

Таблица 1

Название блока	Интенсивность отказа $\lambda_i, ч^{-1}$
Устройство ввода, защиты, резервирования питания — УВЗРП8-01	$\lambda_1=3,2 \cdot 10^{-11}$
Вентилятор	$\lambda_2=5,0 \cdot 10^{-7}$
Устройство питания вентилятора	$\lambda_3=4,6 \cdot 10^{-6}$
Устройство питания (источники питания FPS100024) — УП FPS	$\lambda_4=3,2 \cdot 10^{-9}$
Устройство нормирования сигналов УП FPS — УН	$\lambda_5=7,0 \cdot 10^{-6}$
Контроллер УЭП	$\lambda_6=1,0 \cdot 10^{-9}$
Терминаторы CAN1	$\lambda_7=5,0 \cdot 10^{-11}$
Пульт управления подачи напряжения — ПУ УЭП	$\lambda_8=3,5 \cdot 10^{-6}$
Устройство сопряжения с объектом — УСО47	$\lambda_9=9,0 \cdot 10^{-11}$
Стойка УЭП	$\lambda_{УЭП}=1,6 \cdot 10^{-5}$

В табл. 2 представлены виды технического состояния системы.

Таблица 2

S_i	Вид ТС	S_i	Вид ТС
S_0	Работоспособное	S_5	Отказ устройства УН
S_1	Отказ устройства УВЗРП8-01	S_6	Отказ контроллера УЭП
S_2	Отказ вентилятора	S_7	Отказ терминаторов CAN1
S_3	Отказ устройства питания вентилятора	S_8	Отказ панели ПУ УЭП
S_4	Отказ устройства УП FPS	S_9	Отказ устройства УСО47

При экспоненциальном распределении вероятности безотказной работы блоков УЭП вероятности нахождения системы в S_i -м ТС определяются соотношениями [4]

$$P(S_0) = \left(1 + \sum_{i=1}^m \frac{1 - e^{-\lambda_i t}}{e^{-\lambda_i t}} \right)^{-1}, \quad P(S_i) = \frac{1 - e^{-\lambda_i t}}{e^{-\lambda_i t}} \left/ \left(1 + \sum_{i=1}^m \frac{1 - e^{-\lambda_i t}}{e^{-\lambda_i t}} \right) \right., \quad i = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Выберем два непрерывных ДП — pr_1 (температура) и pr_2 (напряжение) — и дискретный восьмиразрядный ДП — pr_3 (табл. 3).

Таблица 3

S_i	pr_j									
	$pr_1, ^\circ\text{C}$	$pr_2, \text{В}$	pr_3							
			pr_{37}	pr_{36}	pr_{35}	pr_{34}	pr_{33}	pr_{32}	pr_{31}	pr_{30}
S_0	[5; 35]	[20; 25]	0	0	0	0	0	0	0	0
S_1	[5; 35]	[0; 20]	0	0	1	0	0	0	0	0
S_2	[35; 55]	[20; 25]	0	0	0	0	0	0	0	0
S_3	[35; 55]	[0; 20]	0	0	0	0	0	0	0	0
S_4	[5; 35]	[0; 20]	0	0	0	1	0	0	0	0
S_5	[5; 35]	[0; 20]	1	1	0	0	0	0	0	0
S_6	[5; 35]	[0; 20]	0	0	0	0	1	0	0	0
S_7	[5; 35]	[0; 20]	1	0	0	0	0	0	1	0
S_8	[5; 35]	[0; 20]	0	0	0	0	0	0	0	1
S_9	[5; 35]	[0; 20]	1	0	0	0	0	0	1	0

Вероятности ошибок 1-го и 2-го рода представлены в табл. 4.

Таблица 4

Проверка	α_j	β_j
π_1	0,06	0,08
π_2	0,02	0,07
π_3	0,01	0,05

Байесовская сеть доверия для стойки УЭП показана на рис. 2.

1-й шаг синтеза оптимальной по достоверности стратегии диагностирования (п. 2 методики), представленный в программных средах GeNie и Hugin Expert, продемонстрирован на рис. 3: a — при отсутствии свидетельств, $b, в$ — при поступлении их (апостериорный вывод) после проведения проверки π_1 .

На рис. 4, $a, б$ соответственно представлены схемы оптимальных по достоверности стратегий диагностирования для моментов начала диагностирования $t_d = 2$ ч и $t_d = 40\,000$ ч, полученные в результате применения разработанной методики.

Сравним среднюю достоверность синтезированной стратегии диагностирования со средней достоверностью безусловной стратегии [4], которая представляет собой одновременную неупорядоченную проверку при начальной неопределенности всех диагностических признаков. Результатом диагностирования по безусловной стратегии является вид технического

состояния, наблюдаемый во всех исходах проверок. Для стойки УЭП при $t_d = 40\ 000$ ч средняя достоверность безусловной (\bar{D}_6) и оптимальной ($\bar{D}(\text{STR}^*)$) стратегий равны

$$\bar{D}_6 = 0,868, \bar{D}(\text{STR}^*) = 0,964. \quad (2)$$

В результате сравнения получаем повышение достоверности на 11 %.

При рассмотрении непрерывных диагностических признаков обычно используется равномерный закон распределения их значений внутри интервалов [4], использование же других законов распределения, в частности нормального, также может быть обоснованно и целесообразно. Например, на границах интервала может наблюдаться наибольшая неопределенность между состояниями, а в середине интервалов данная неопределенность будет минимальна. На рис. 5 а, б соответственно показаны распределения значений непрерывных ДП pr_1 и pr_2 с учетом нормального закона.

Схемы оптимальных по достоверности стратегий диагностирования при равномерном (а) и нормальном (б) законах распределения значений непрерывных диагностических признаков представлены на рис. 6.

Результаты расчетов (см. рис. 6) свидетельствуют о необходимости обоснованного выбора вида распределения значений непрерывных диагностических признаков, так как это влияет на состав и последовательность проверок синтезированной стратегии.

Заключение. Разработанная методика позволяет синтезировать оптимальные по достоверности стратегии диагностирования АСУ сложными объектами на основе апостериорного вывода в байесовских сетях доверия с учетом динамики априорной информации и различных законов распределения диагностических признаков, что расширяет рамки применимости методического аппарата и повышает качество исследований по проблемам диагностики сложных технических объектов.

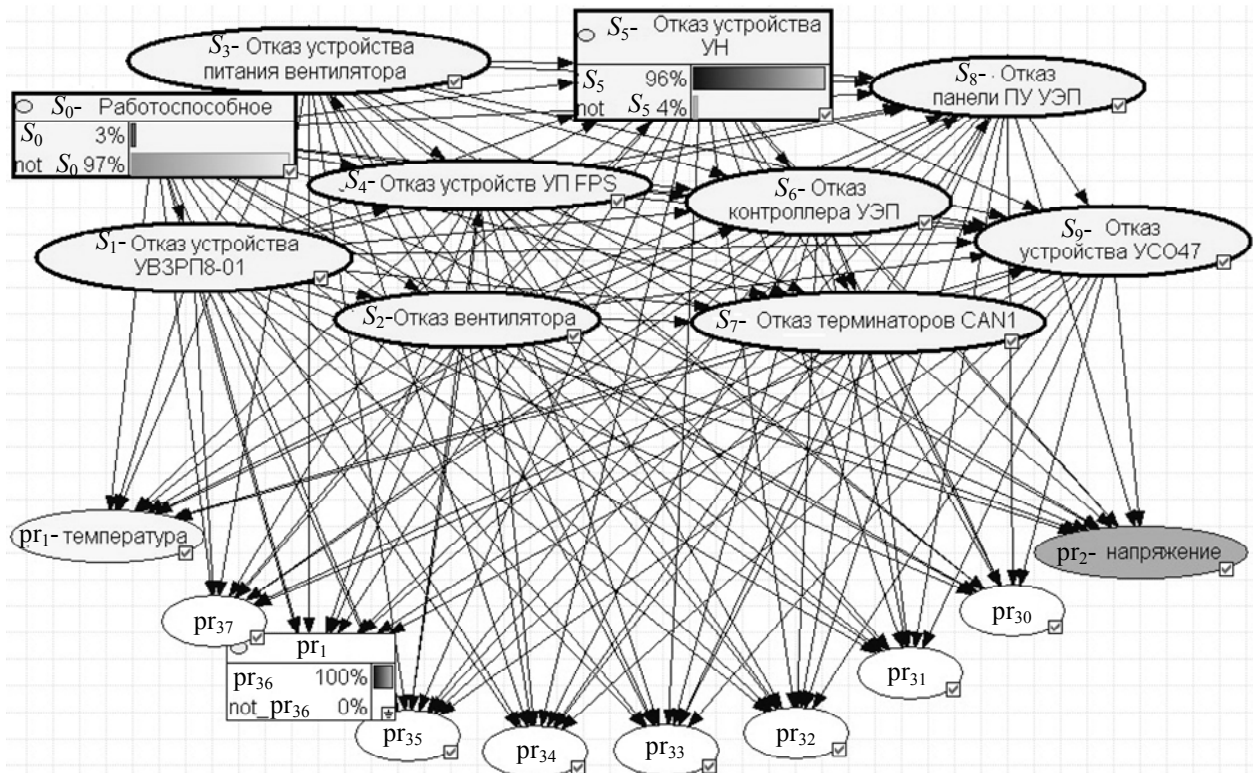


Рис. 2

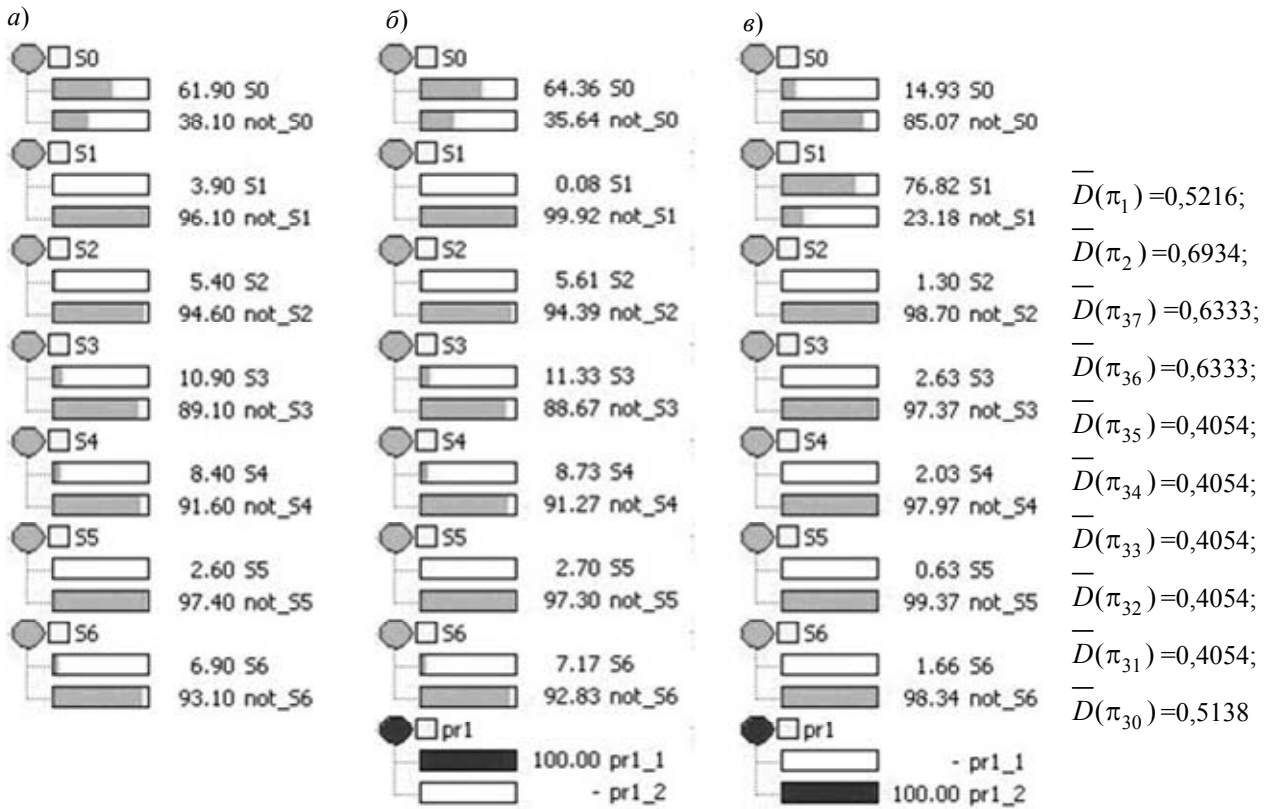


Рис. 3

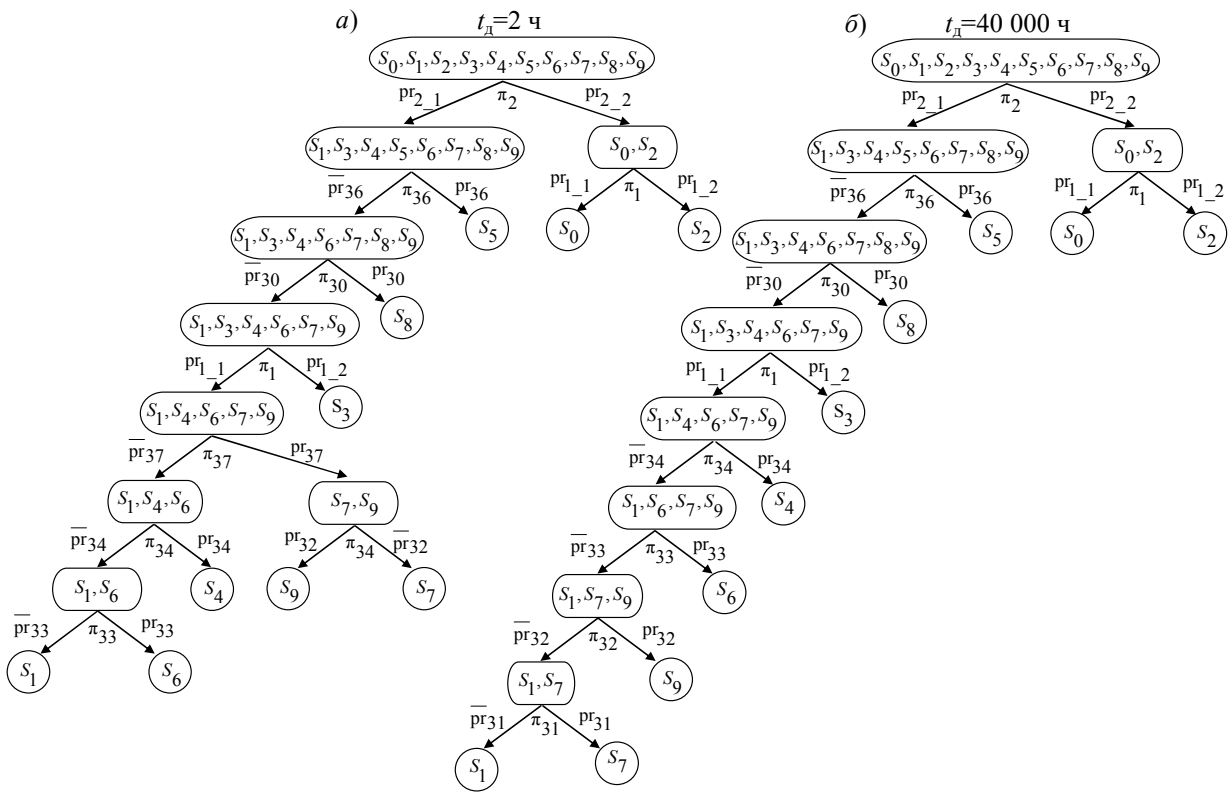


Рис. 4

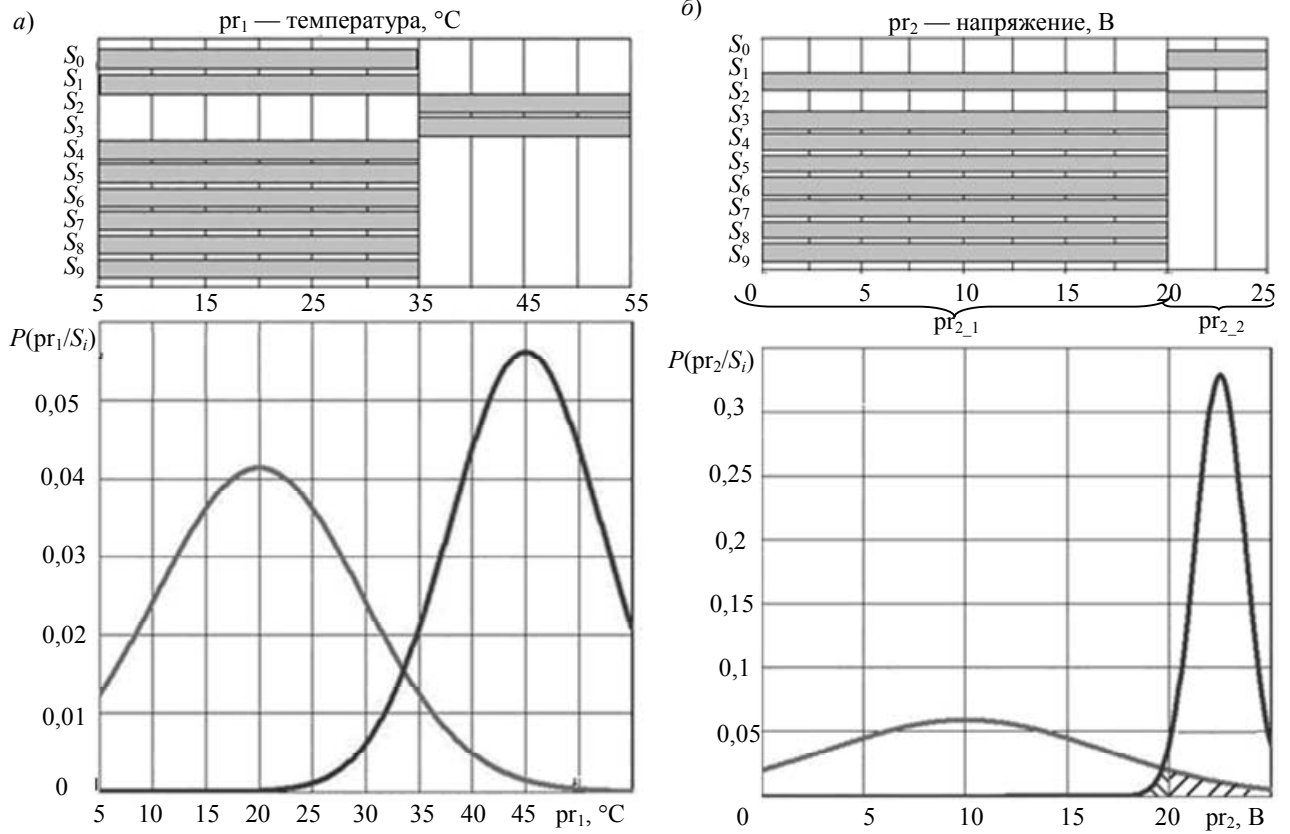


Рис. 5

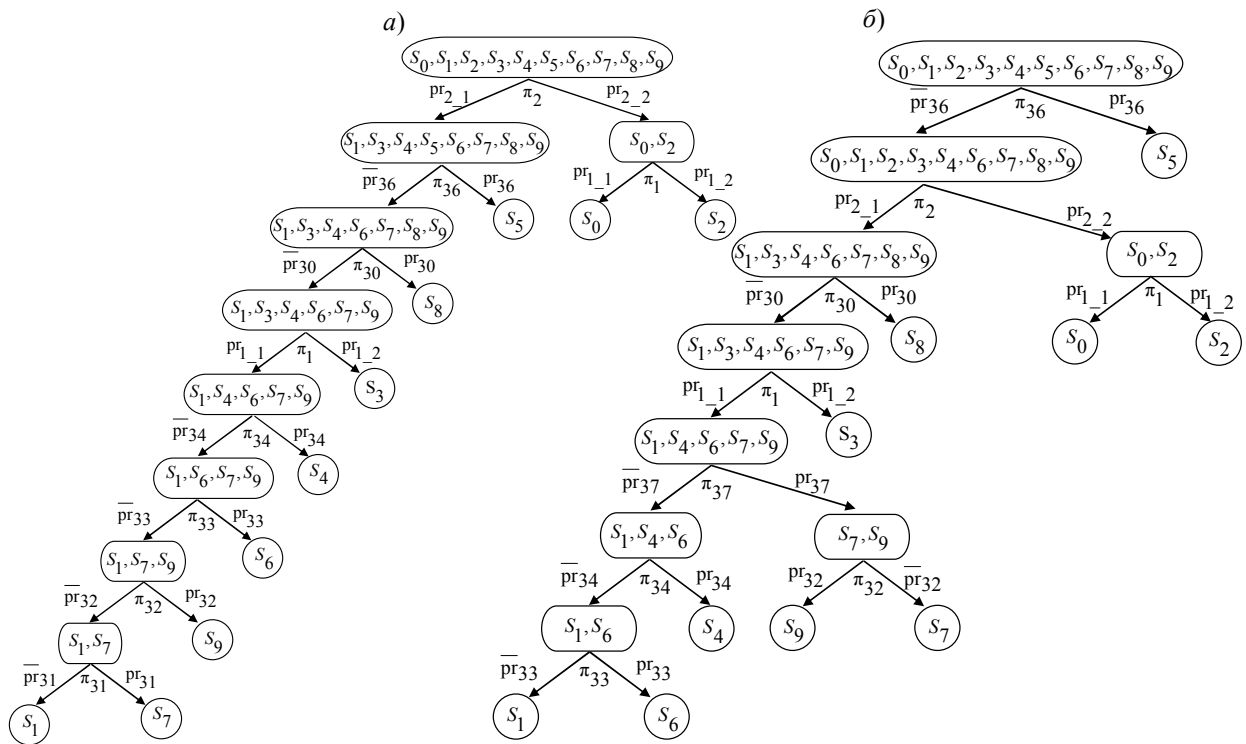


Рис. 6

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тулупьев А. Л., Николенко С. И., Сироткин А. В. Байесовские сети: логико-вероятностный подход. СПб: Наука, 2006. 607 с.
2. Хедли Дж. Нелинейное и динамическое программирование: Пер. с англ. М.: Мир, 1967. 507 с.
3. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход: Пер. с англ. М.: Изд. дом „Вильямс“, 2006. 1408 с.
4. Дмитриев А. К., Юсупов Р. М. Идентификация и техническая диагностика. МО СССР, 1987. 521 с.

Сведения об авторах

- Александр Борисович Кузнецов** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения, Санкт-Петербург;
E-mail: alexandr_k_spb@mail.ru
- Никита Алексеевич Осипов** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения, Санкт-Петербург;
E-mail: bayes@mail.ru
- Игорь Владимирович Дорожко** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения, Санкт-Петербург;
E-mail: Doroghko-Igor@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
автоматизированных систем
подготовки и пуска ракет
космического назначения

Поступила в редакцию
04.04.12 г.

УДК 519.7

И. Б. ФУРТАТ

РОБАСТНЫЙ СТАТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМИ ОБЪЕКТАМИ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Предложен робастный статический алгоритм управления динамическими объектами в условиях неопределенности и запаздывания, обеспечивающий достаточную близость выходного сигнала объекта к эталонному. Приведены результаты моделирования, иллюстрирующие работоспособность алгоритма.

Ключевые слова: робастное управление, наблюдатель производных, сингулярно возмущенный объект.

Введение. Проектирование схем управления объектом в условиях неопределенности и возможности измерения только его выходного сигнала является актуальной задачей современной теории и практики автоматического регулирования. В настоящее время предложено достаточно много решений для построения регуляторов на основе способов робастного управления.

Если относительная степень объекта (γ) больше единицы, то для реализации робастных систем управления необходимо получить оценки производных соответствующих сигналов с использованием динамических наблюдателей. Так, в работе [1] рассматривается закон управления, позволяющий реализовать оценку производных выходного сигнала объекта с помощью динамического наблюдателя с переменной структурой (sliding mode observer), порядок которого равен размерности вектора состояния модели объекта. В работе [2] для синтеза сис-

темы стабилизации нелинейных динамических объектов используется закон управления, зависящий от оценок производных выходного сигнала объекта, которые получены с помощью динамического наблюдателя с большим коэффициентом усиления (high-gain observer), при этом порядок наблюдателя равен размерности вектора состояния модели. Робастный закон управления по ошибке слежения синтезируется в работе [3], где для оценки производных сигнала ошибки слежения используется наблюдатель с динамическим порядком, равным $\gamma - 1$. В работе [4] синтезированы робастные системы управления с компенсацией внутренних и внешних возмущений с применением вспомогательного контура. Здесь для оценки производных сигнала, содержащего информацию о возмущениях объекта, используется предложенный в работе [2] наблюдатель с динамическим порядком $\gamma - 1$. Анализ данных публикаций показал, что разработчики стремятся получить как простые в расчете регуляторы, так и регуляторы с невысоким динамическим порядком. Решению задачи построения регулятора, не содержащего динамического наблюдателя, посвящена настоящая статья.

В статье рассматривается задача построения робастной системы управления по выходу линейными динамическими объектами в условиях параметрической, сигнальной неопределенности и запаздывания. Для оценки производных в системе управления используется наблюдатель, основанный на левых разностях. Такой подход исключает применение интегрирующих звеньев в наблюдателе, что делает его статическим.

Постановка задачи. Рассмотрим объект управления, динамические процессы в котором описываются уравнением

$$Q(p)y(t) + D(p)y(t - \tau(t)) = kR(p)u(t) + f(t), \quad (1)$$

где $y(t) \in R$ — регулируемая переменная, доступная измерению; $u(t) \in R$ — сигнал управления; $f(t)$ — внешнее неконтролируемое ограниченное возмущение; $Q(p)$, $R(p)$, $D(p)$ — линейные дифференциальные операторы, $\deg Q(p) = n$, $\deg D(p) < n$, $\deg R(p) = m$; $k > 0$; $\tau(t) > 0$ — неизвестное время запаздывания; $p = d/dt$ — оператор дифференцирования.

Требуется спроектировать непрерывную систему управления, обеспечивающую выполнение целевого условия

$$|y(t) - y_{\text{эт}}(t)| < \delta \quad \text{при } t > T, \quad (2)$$

где $y_{\text{эт}}(t)$ — гладкий эталонный сигнал; $\delta > 0$ — достаточно малая величина; $T > 0$ — время, по истечении которого с момента начала работы системы должно выполняться неравенство (2).

Решим сформулированную задачу при следующих ограничениях (предположениях).

Предположение 1. Неизвестные коэффициенты операторов $Q(p)$, $D(p)$, $R(p)$ и число $k > 0$ зависят от некоторого вектора неизвестных параметров объекта — $\chi \in \Xi$, Ξ — известное множество.

Предположение 2. Известны порядки операторов $Q(p)$ и $R(p)$, причем относительная степень $\gamma = n - m > 1$.

Предположение 3. Объект управления (1) минимально фазовый.

Предположение 4. В объекте управления доступен измерению только сигнал $y(t)$.

Метод решения. Сформируем уравнение, характеризующее точность слежения выходного сигнала объекта за эталонным сигналом, в виде $e(t) = y(t) - y_{\text{эт}}(t)$, где $e(t)$ — ошибка слежения. В соответствии с выражениями (1) и (2) преобразуем уравнение ошибки слежения к форме

$$Q(p)e(t) = R(p)u(t) + f(t) - Qy_{\text{эт}}(t) - D(p)y(t - \tau(t)). \quad (3)$$

Зададим закон управления

$$u(t) = -\alpha M(p)\bar{e}(t), \quad (4)$$

где $\alpha > 0$; $M(p)$ — линейный дифференциальный оператор порядка γ , причем $M(\lambda)$ — гурвицев, λ — комплексная переменная; $\bar{e}(t)$ — оценка сигнала $e(t)$.

Следует отметить, что закон управления вида (4) использовался, например, в работах [2, 3], где последующий синтез системы управления осуществлялся с помощью динамических наблюдателей производных. В данной статье для дальнейшего синтеза системы управления используется статический наблюдатель производных.

Перепишем уравнение (3), подставив в него выражение (4):

$$F(p)e(t) = \psi(t), \quad (5)$$

где

$$F(p) = Q(p) + \alpha R(p)M(p), \quad \psi(t) = f(t) - Q(p)y_{\text{гр}}(t) - D(p)y(t - \tau(t)) + \alpha R(p)M(p)(e(t) - \bar{e}(t)).$$

Очевидно, что всегда существует α и $M(\lambda)$, такие что $F(\lambda)$ будет гурвицевым. Причем выбор значений коэффициента α и полинома $M(\lambda)$ обеспечивает требуемое распределение корней характеристического многочлена $F(\lambda)$ замкнутой системы.

Для реализации закона управления (4) рассмотрим наблюдатель

$$\dot{\xi}(t) = G\dot{\xi}(t-h) + H(e(t) - e(t-h)), \quad \bar{e}(t) = L\xi(t), \quad (6)$$

где $\xi(t) = [\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_\gamma(t)]^T$, $G = - \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1/h & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1/h^\gamma & 1/h^{\gamma-1} & \dots & 1/h & 0 \end{bmatrix}$, $H = \begin{bmatrix} 1 \\ 1/h \\ \vdots \\ 1/h^\gamma \end{bmatrix}$, $h > 0$ — малая

величина, $L = [1, 0, \dots, 0]$.

Отметим, что наблюдатель (6) представляет собой оценку производных с использованием левых разностей:

$$e(t) = e(t); \quad \dot{\xi}_1(t) = \frac{e(t) - e(t-h)}{h}, \quad \dot{\xi}_2(t) = \frac{\dot{\xi}_1(t) - \dot{\xi}_1(t-h)}{h}, \dots, \dot{\xi}_\gamma(t) = \frac{\dot{\xi}_{\gamma-1}(t) - \dot{\xi}_{\gamma-1}(t-h)}{h}.$$

Структурная схема такого наблюдателя приведена на рис. 1.

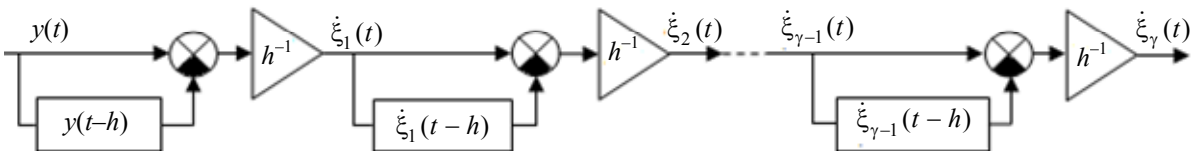


Рис. 1

Сформулируем утверждение, при выполнении условий которого система управления будет работоспособной.

Утверждение. Пусть выполнены предположения 1—4. Тогда существуют числа $\alpha > 0$ и $h_0 > 0$, такие что при $h \leq h_0$ система управления, характеризуемая уравнениями (4) и (6), обеспечивает выполнение целевого условия (2) и ограниченность всех сигналов в замкнутой системе.

Доказательство утверждения приведено в Приложении.

Проиллюстрируем полученные результаты на следующем примере.

Пример. Пусть математическая модель объекта управления описывается уравнением

$$(p^3 + q_2 p^2 + q_1 p + q_0)y(t) + (d_2 p^2 + d_1 p + d_0)y(t - \tau(t)) = r_0 u(t) + f(t). \quad (7)$$

Класс неопределенности Ξ модели (7) задан неравенствами: $|q_i| \leq 5$; $|d_i| \leq 5$; $i = 0, 1, 2$; $1 \leq r_0 \leq 5$; $|f(t)| \leq 3$. Зададим $h = 0,01$, $M(p) = p$ и сформируем систему управления, реализуемую наблюдателем $\dot{\xi}_1(t) = 100(e(t) - e(t - 0,01))$, $\dot{\xi}_2(t) = 100(\dot{\xi}_1(t) - \dot{\xi}_1(t - 0,01))$ и законом управления $u(t) = -\alpha(\dot{\xi}_2(t) + 10\dot{\xi}_1(t) + 25e(t))$.

Положим $y_{\text{эт}}(t) = 1 + \sin t + \cos 2t$. Пусть параметры модели объекта (7) определены следующим образом: $q_2 = -5$, $q_1 = -5$, $q_0 = -5$, $d_2 = 5$, $d_1 = 5$, $d_0 = 5$, $\tau(t) = 2 + \exp(-0,5t)$, $r_0 = 2$, $f(t) = 10(2 + \sin 1,2t)$.

На рис. 2, а—в представлены результаты моделирования переходного процесса по ошибке $e(t)$: а — при $\alpha = 10$ и $y(0) = \dot{y}(0) = \ddot{y}(0) = 1$; б — при $\alpha = 20$ и $y(0) = \dot{y}(0) = \ddot{y}(0) = 0$; в — при $\alpha = 30$ и $y(0) = \dot{y}(0) = \ddot{y}(0) = 0$.

Как показали результаты моделирования, переходные процессы в системе управления не зависят существенно от параметров модели объекта, а зависят в основном от выбора полинома $M(\lambda)$ и коэффициента α . Так, при $\alpha = 10$ ошибка слежения $e(t)$ не превышает значения $\delta = 0,15$ через 2,5 с после начала работы системы; при $\alpha = 20$ значение $|e(t)| < 0,08$ при $t \geq 0,2$ с; при $\alpha = 30$ ошибка $|e(t)| < 0,05$ при $t \geq 0,2$ с (см. рис. 2, а—в соответственно).

Заключение. Решена задача робастного управления линейными динамическими объектами в условиях их параметрической и сигнальной неопределенности и при доступности измерению только скалярного выходного сигнала объекта. В отличие от работ [1—4] для оценки производных использовался статический наблюдатель. Полученный алгоритм компенсирует внутренние и внешние возмущения с заданной точностью. Моделирование показало хорошие качества переходных процессов и подтвердило теоретические результаты.

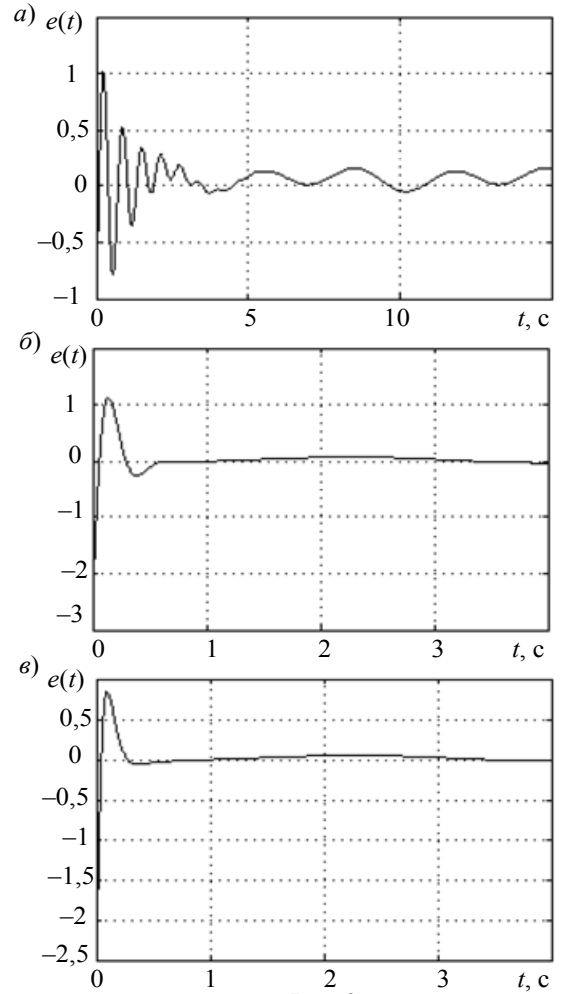


Рис. 2

ПРИЛОЖЕНИЕ

Доказательство утверждения. Перепишем уравнения (5) и (6):

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}(t) &= A\varepsilon(t) + B\psi(t), \quad e(t) = L\varepsilon(t); \\ h^\gamma \dot{\xi}(t) &= \tilde{G}\xi(t-h) + \tilde{H}(e(t) - e(t-h)), \quad \bar{e}(t) = L\xi(t), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

здесь A , B и L — матрицы, полученные при переходе от выражения (5) к первому уравнению системы (8), $\tilde{G} = h^\gamma G$, $\tilde{H} = h^\gamma H$.

Воспользуемся теоремой, приведенной в работе [5, теорема 11.1]. Рассмотрим систему (8) при $h = 0$. Это равносильно тому, что решение второго уравнения системы позволит обеспечить точную оценку γ -производных сигнала $e(t)$. Значит, при $h = 0$ получим, что $\alpha R(p)M(p)(e(t) - \bar{e}(t)) = 0$. Тогда, в силу ограниченности сигналов $f(t)$ и $y_{\text{эт}}(t)$, функция $\psi(t)$ будет ограниченной. В результате при $h = 0$ система уравнений (8) асимптотически устойчива и все сигналы в ней ограничены.

Так как условия используемой теоремы [5] выполняются, то существует число h_0 , такое что при $h \leq h_0$ все переменные в замкнутой системе ограничены. Однако асимптотическая устойчивость редуцированной системы (8) при $h = 0$ не гарантирует асимптотической устойчивости системы (8) при $h > 0$. Найдем значение h_0 , при котором для $h \leq h_0$ система (8) будет устойчивой.

Пусть в системе (8) $h = h_0$. Выберем функционал Ляпунова — Красовского в виде

$$V = \varepsilon^T(t)P_1\varepsilon(t) + \int_{t-h_0}^t \varepsilon^T(s)P_2\varepsilon(s)ds + \int_{t-h_0}^t \dot{\xi}^T(s)P_3\dot{\xi}(s)ds, \quad (9)$$

где P_1, P_2, P_3 — положительно-определенные симметричные матрицы, матрица P_1 является решением уравнения $A^T P_1 + P_1 A = -W_1$, $W_1 = W_1^T > 0$.

Возьмем от функционала (9) производную по времени вдоль траекторий системы (8):

$$\dot{V} = -\varepsilon^T(t)Q_1\varepsilon(t) + 2\varepsilon^T(t)P_1B\psi(t) + \varepsilon^T(t)P_2\varepsilon(t) - \varepsilon^T(t-h_0)P_2\varepsilon(t-h_0) + \\ + \dot{\xi}^T(t)P_3\dot{\xi}(t) - \dot{\xi}^T(t-h_0)P_3\dot{\xi}(t-h_0). \quad (10)$$

Подставим в выражение (10) второе уравнение системы (8):

$$\dot{V} = -\varepsilon^T(t)W_1\varepsilon(t) + 2\varepsilon^T(t)P_1B\psi(t) + \varepsilon^T(t)P_2\varepsilon(t) - \varepsilon^T(t-h_0)P_2\varepsilon(t-h_0) + \\ + h_0^{-2\gamma}\dot{\xi}^T(t-h_0)\tilde{G}^T P_3\tilde{G}\dot{\xi}(t-h_0) + 2h_0^{-\gamma}\tilde{G}^T\dot{\xi}^T(t-h_0)P_3\tilde{H}L\varepsilon(t) + \\ - 2h_0^{-\gamma}\dot{\xi}^T(t-h_0)\tilde{G}^T P_3\tilde{H}L\varepsilon(t-h_0) + h_0^{-2\gamma}\varepsilon^T(t)L^T\tilde{H}^T P_3\tilde{H}L\varepsilon(t) + \\ + h_0^{-2\gamma}\varepsilon^T(t)L^T\tilde{H}^T P_3\tilde{H}L\varepsilon(t-h_0) + h_0^{-2\gamma}\varepsilon^T(t-h_0)L^T\tilde{H}^T P_3\tilde{H}L\varepsilon(t-h_0) - \dot{\xi}^T(t-h_0)P_3\dot{\xi}(t-h_0). \quad (11)$$

Рассмотрим оценки

$$2\varepsilon^T(t)P_1B\psi(t) \leq 2h_0^{-1}\varepsilon^T(t)P_1BB^T P_1\varepsilon(t) + 2h_0|\psi(t)|^2, \quad \bar{\psi} = \sup_t |\psi(t)|^2;$$

$$2h_0^{-\gamma}\dot{\xi}^T(t-h_0)\tilde{G}^T P_3\tilde{H}L\varepsilon(t) \leq 2h_0^{-\gamma}\dot{\xi}^T(t-h_0)\tilde{G}^T P_3\tilde{H}L\left(\tilde{G}^T P_3\tilde{H}L\right)^T \dot{\xi}(t-h_0) + 2h_0^{-\gamma}\varepsilon^T(t)\varepsilon(t);$$

$$2h_0^{-\gamma}\dot{\xi}^T(t-h_0)\tilde{G}^T P_3\tilde{H}L\varepsilon(t-h_0) \leq 2h_0^{-\gamma}\dot{\xi}^T(t-h_0)\tilde{G}^T P_3\tilde{H}L\left(\tilde{G}^T P_3\tilde{H}L\right)^T \dot{\xi}(t-h_0) + \\ + 2h_0^{-\gamma}\varepsilon^T(t-h_0)\varepsilon(t-h_0),$$

$$h_0^{-2\gamma}\varepsilon^T(t)L^T\tilde{H}^T P_3\tilde{H}L\varepsilon(t-h_0) \leq h_0^{-2\gamma}\varepsilon^T(t)L^T\tilde{H}^T P_3\tilde{H}L\left(L^T\tilde{H}^T P_3\tilde{H}L\right)^T \varepsilon(t) + \\ + h_0^{-2\gamma}\varepsilon^T(t-h_0)\varepsilon(t-h_0)$$

и введем следующие обозначения:

$$W_2 = W_1 - 2h_0^{-1}P_1BB^T P_1 - P_2 - h_0^{-2\gamma}L^T\tilde{H}^T P_3\tilde{H}L - 2h_0^{-\gamma}I - h_0^{-2\gamma}L^T\tilde{H}^T P_3\tilde{H}L\left(L^T\tilde{H}^T P_3\tilde{H}L\right)^T;$$

$$W_3 = P_2 - h_0^{-2\gamma}L^T\tilde{H}^T P_3\tilde{H}L - 2h_0^{-\gamma}I - h_0^{-2\gamma}I;$$

$$W_4 = P_3 - h_0^{-2\gamma}\tilde{G}^T P_3\tilde{G} - 2h_0^{-\gamma}\tilde{G}^T P_3\tilde{H}L\left(\tilde{G}^T P_3\tilde{H}L\right)^T - 2h_0^{-\gamma}\tilde{G}^T P_3\tilde{H}L\left(\tilde{G}^T P_3\tilde{H}L\right)^T,$$

где I — единичная матрица.

Очевидно, что существует такое h_0 , для которого $W_i \geq 0$, $i = 2, 3, 4$. Воспользовавшись оценками, перепишем уравнение (11) в виде

$$\dot{V} \leq -\varepsilon^T(t)W_2\varepsilon(t) - \varepsilon^T(t-h_0)W_3\varepsilon(t-h_0) - \dot{\xi}^T(t-h_0)W_4\dot{\xi}(t-h_0) + \\ + 2h_0\bar{\psi} \leq -\omega_{\min}(W_2)e^2(t) + 2h_0\bar{\psi}, \quad (12)$$

где $\omega_{\min}(W_2)$ — наименьшее собственное число матрицы W_2 .

Из выражения (12) следует, что при $h \leq h_0$ выполняется неравенство $|e(t)| \leq \sqrt{2h_0\bar{\psi}/\omega_{\min}(W_2)}$. Следовательно, при $h \leq h_0$, изменяя α и h , можно получить требуемые величины δ и T в целевом условии (2). Следует отметить, что оценка ошибки $e(t)$ доста-

точно груба, так как получена при исключении составляющих $\varepsilon^T(t-h_0)W_3\varepsilon(t-h_0)$ и $\xi^T(t-h_0)W_4\xi(t-h_0)$, участвующих в компенсации величины $2h_0\bar{\psi}$.

Статья подготовлена по результатам работ, выполненных при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 12-08-01183 и № 12-01-31354) и федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг. (соглашение 14.В37.21.0871, соглашение 14.В37.21.1480).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Veluvolu K. C., Kim M. Y., Lee D.* Nonlinear sliding mode high-gain observers for fault estimation // Intern. J. of Systems Science. 2011. Vol. 42, N 7. P. 1065—1074.
2. *Atassi A. N., Khalil H. K.* A separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems // IEEE Trans. on Automatic Control. 1999. Vol. 44, N 9. P. 1672—1687.
3. *Бобцов А. А.* Алгоритм робастного управления в задаче слежения за эталонным сигналом // Автоматика и телемеханика. 2003. № 6. С. 104—113.
4. *Цыкунов А. М.* Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // Там же. 2007. № 7. С. 103—115.
5. *Халил Х. К.* Нелинейные системы. М. — Ижевск: НИЦ „Регулярная и хаотическая динамика“, Ин-т компьютерных исследований, 2009.

Сведения об авторе

Игорь Борисович Фуртат — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: cainenash@mail.ru

Рекомендована
Институтом проблем
машиноведения РАН

Поступила в редакцию
25.07.12 г.

С. В. ЛУЧКО, С. Ю. БАЛУЕВ, М. А. ВАТУТИН, И. С. ГУРЬЕВ

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

Приводится математическая модель движения чувствительного элемента маятникового акселерометра компенсационного типа, обобщаются результаты численного интегрирования и оценивается влияние возмущений на погрешность измерений акселерометром ЦЕ-199, функционирующим в периодическом режиме с широтно-импульсным модулятором второго рода.

Ключевые слова: акселерометр, датчик угловой скорости, периодический режим, погрешность измерений.

В состав систем управления движением современных летательных аппаратов (ЛА) входят датчики первичной информации. Точность ориентации и навигации ЛА непосредственно зависит от погрешностей таких датчиков. Проблема снижения погрешностей, особенно в условиях влияния различных возмущений, наиболее актуальна для задачи минимизации ошибок при ориентации ЛА. К датчикам первичной информации относятся акселерометры, датчики угловой скорости и другие приборы. Среди многочисленных типов акселерометров широкое распространение имеют маятниковые акселерометры компенсационного типа, которые имеют средние точностные характеристики и относительно невысокую стоимость.

В настоящее время существует возможность улучшения точностных характеристик маятниковых акселерометров путем минимизации нелинейностей в системе, которые обуславливают инструментальную погрешность измерения ускорений [1]. Минимизация погрешностей достигается с помощью перевода чувствительного элемента (ЧЭ) акселерометра в режим гармонических колебаний. Такой перевод можно осуществить несколькими способами: к примеру, с использованием внешнего генератора, путем введения ЧЭ в режим автоколебаний, с помощью широтно-импульсного модулятора второго рода (ШИМ-2). Как показал сравнительный анализ точностных характеристик маятникового акселерометра, самые лучшие показатели по минимизации погрешностей имеет способ приведения ЧЭ в режим вынужденных колебаний с помощью ШИМ-2 [2, 3].

Режим вынужденных колебаний с ШИМ-2 имеет существенную особенность, состоящую в том, что ЧЭ совершает колебания в строгом соответствии с последовательностью управляющих импульсов. Такой режим функционирования называется периодическим. Другая важная причина перевода ЧЭ в периодический режим — приобретение маятниковым акселерометром свойств временного модулятора, при этом выходная величина является параметром времени, а зависимость выход—вход легко преобразуется в цифровой вид, что удобно для последующей статистической обработки.

В настоящей статье рассматривается математическая модель акселерометра с ШИМ-2 и приводятся результаты исследований влияния внешних возмущений на погрешность измерений ускорения акселерометром. Проведение такого рода исследований необходимо не только для учета влияния внешних возмущений, но и для определения граничных условий функционирования данных приборов.

В ходе исследований использовался акселерометр ЦЕ-199 с ШИМ-2, функциональная схема которого приведена на рис. 1.

В состав чувствительного элемента акселерометра входят подвижная масса (ПМ) и измерительный элемент (ИЭ); на рисунке ДУ — датчик угла, ДМ — датчик момента. Функционально ЧЭ обеспечивает сравнение входного инерционного $M_{\text{и}}$ и компенсационного $M_{\text{дм}}$

моментов. Внешние воздействия неучтенных сил, природа которых различна, характеризуются моментом M_f . На чувствительный элемент воздействует входное ускорение $a_{вх}$, являющееся причиной возникновения момента $M_{и}$. Разностью ΔM обуславливается отклонение ЧЭ на угол β , который преобразуется датчиком угла в сигнал u . Сигнал u поступает в ШИМ-2, состоящий из генератора пилообразного напряжения (ГПН), компаратора (К), электронного ключа (ЭК) и источника опорного напряжения (тока) — ИОН. Функционально ШИМ-2 — это устройство, которое предназначено для формирования импульсной последовательности с заданным периодом дискретизации T , заданной амплитудой h и модулированной скважностью γ_i . Скважность импульсной последовательности γ_i в ШИМ-2 формируется при сравнении текущего значения сигнала u с некоторым опорным сигналом $u_{оп}$. При воздействии ускорения длительности τ_1 и τ_2 управляющих импульсов ШИМ-2 будут различны. Преобразование интервалов τ_1 и τ_2 в код осуществляется классическим способом — заполнением временных интервалов тактовыми импульсами стабильной частоты; далее определяются их разность, сумма и отношение. На выходе измерительной схемы формируется число, пропорциональное входному ускорению.

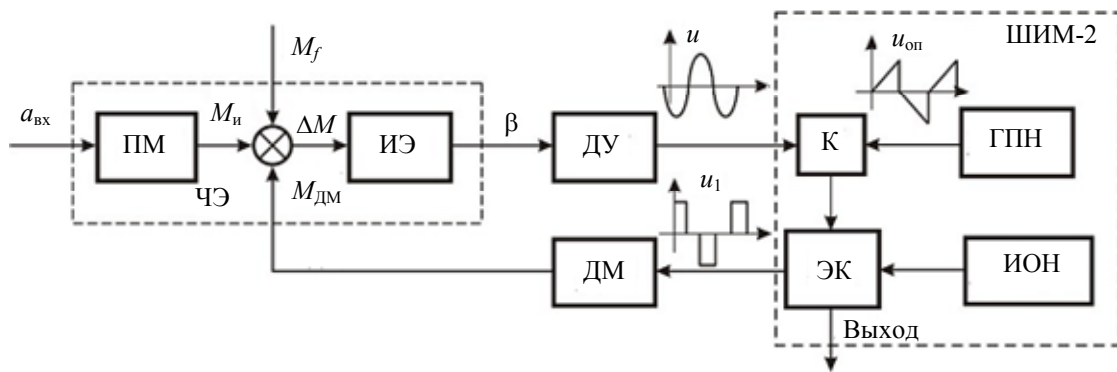


Рис. 1

Принцип действия акселерометра ЦЕ-199 с ШИМ-2 поясняется схемой, представленной на рис. 2, где m — масса маятника акселерометра. Маятник под воздействием управляющих импульсов, поступающих с ШИМ-2, совершает колебательные движения с заданным периодом T_0 и углом отклонения β . При ускорении, действующем в плоскости колебаний, положение динамического равновесия изменяется.

Особенность функционирования маятникового акселерометра с ШИМ-2 состоит в том, что такого типа прибор способен измерять постоянные или медленно изменяющиеся входные воздействия:

$$|\omega(t + T_0) - \omega(t)| \ll |\omega(t)|. \quad (1)$$

Из условия (1) следует, что изменение входного сигнала в течение периода T_0 колебаний ЧЭ акселерометра должно быть минимальным, в идеальном случае — равным нулю. Однако возмущения могут быть достаточно высокой частоты и различной амплитуды, оказывая при этом непосредственное влияние на качество измерений.

Задача исследований заключается в том, чтобы оценить, насколько существенно влияние возмущений различной частоты и амплитуды, и предусмотреть меры минимизации действия этих возмущений в процессе функционирования акселерометра с ШИМ-2 на борту ЛА.

Были проведены исследования двух типов возмущений — вибрации корпуса и искажений опорного линейно изменяющегося сигнала. Математическая модель, в соответствии

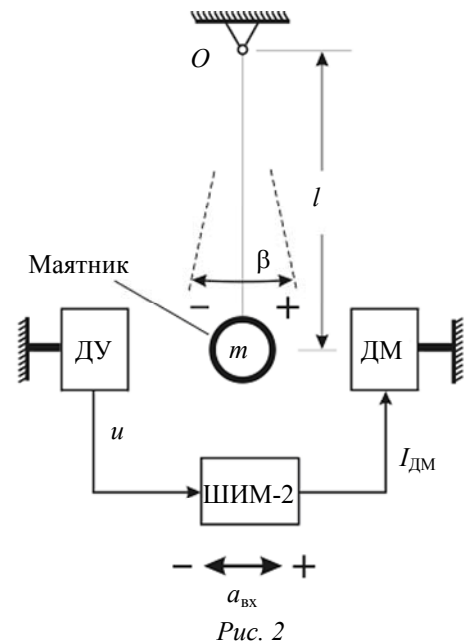


Рис. 2

с которой проводились исследования, характеризует динамику ЧЭ акселерометра в условиях влияния этих возмущений.

Математическая модель непрерывной части системы вместе с ШИМ-2 представлена разностными уравнениями со смещенным аргументом [1, 4]:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}(i + \varepsilon) &= \mathbf{A}^*(\varepsilon) \mathbf{x}(i) + h \mathbf{b}^*(\varepsilon) \operatorname{sgn} \delta(i) + \mathbf{m}^*(\varepsilon) f(i); \\ y(i + \varepsilon) &= \mathbf{c}^T \mathbf{x}(i + \varepsilon), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где

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

$i = \overline{0, \infty}$ — целое число; ε, σ — параметры, которые можно изменять от 0 до 1; $\mathbf{c}^T \mathbf{x}(i + \varepsilon)$ — вектор состояния системы.

В этом случае на интервале $iT \leq t \leq (i + 1)T$ в качестве ошибки $\delta(t)$ можно рассматривать $\delta(i + \varepsilon)$:

$$\delta(i + \varepsilon) = g(i + \varepsilon) - y(i + \varepsilon) = g(i + \varepsilon) - \mathbf{c}^T \mathbf{x}(i + \varepsilon). \quad (3)$$

Составляющая $\mathbf{m}^*(\varepsilon)$ в системе уравнений (2) характеризует влияние возмущений $f(i)$ на движение ЧЭ акселерометра.

Опорный сигнал ГПН $u_{\text{оп}}(t)$ обычно имеет пилообразную форму. На интервале $iT \leq t \leq (i + 1)T$ этот сигнал описывается выражением

$$u_{\text{оп}} = \eta \varepsilon \operatorname{sgn} \delta(i) + \psi(i + \varepsilon), \quad (4)$$

где η — постоянный коэффициент, определяющий крутизну сигнала $u_{\text{оп}}(t)$; $\psi(i + \varepsilon)$ — возмущение ГПН, обусловленное помехами и шумами электронных компонентов.

Скважность импульсов определяется в моменты совпадения входного и опорного сигналов, т.е. в моменты $t = (i + \gamma_i)T$. В уравнениях (3) и (4) им соответствует равенство $\varepsilon = \gamma_i$. Приравняв правые части этих уравнений, получим

$$g(i + \gamma_i) - \mathbf{c}^T \mathbf{x}(i + \gamma_i) = \eta \gamma_i \operatorname{sgn} \delta(i) + \psi(i + \varepsilon). \quad (5)$$

Значение скважности γ_i является решением уравнения (5): если положительное решение отсутствует, то $\gamma_i = 1$. Уравнение (5), как правило, нелинейное, поэтому его решение можно найти лишь методом последовательных приближений.

В условиях влияния возмущений колебания ЧЭ акселерометра имеют сложный вид, близкий к форме несимметричной периодической функции. Известно, что динамика движения ЧЭ инерциальных датчиков угловой скорости и акселерометров в общем случае описывается колебательным звеном. Для математической модели маятникового акселерометра с ШИМ-2 вполне допустимо использовать передаточную функцию (ПФ) линейной части акселерометра, состоящую из двух апериодических звеньев. При этом допускается, что входное воздействие является медленно изменяющимся и выполняется неравенство (1). В этом случае ограничение (1) позволяет исследовать вместо колебательного звена с постоянной времени T_1 апериодическое звено второго порядка с заданными постоянными времени T'_1 и T''_2 , которые определены параметрическим синтезом маятникового акселерометра с ШИМ-2 при моделировании системы:

$$\frac{k}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1} \approx \frac{k}{(T'_1 p + 1)(T''_2 p + 1)}. \quad (6)$$

Передаточную функцию маятникового акселерометра с ШИМ-2 можно представить в виде

$$W(p) = \sum_{v=1}^n \frac{R_v}{T_v p_v + 1}. \quad (7)$$

Корни p_v знаменателя передаточной функции $W(p)$ — простые вещественные отрицательные, т.е. $p_v = -1/T_v$, где T_v — постоянные времени характеристического уравнения; R_v — параметр разложения $W(p)$ на элементарные дроби [4].

Матричную систему уравнений (2) можно заменить системой из n независимых уравнений первого порядка, в которых $\mathbf{A}^* = d_v$, $\mathbf{b}^* = R_v(1 - d_v)$, где $d_v = e^{-T/T_v}$.

Для акселерометра элементы ПФ (6), (7) равны

$$R_1 = kT_1(T_1 - T_2)^{-1}, \quad R_2 = -kT_2(T_1 - T_2)^{-1}, \quad d_1 = e^{-T/T_1}, \quad d_2 = e^{-T/T_2}.$$

При измерении ускорения чувствительный элемент акселерометра будет совершать несимметричные колебания, поэтому такой режим функционирования акселерометра получил название несимметричного. Скважности управляющих импульсов для несимметричного режима различны и имеют значения γ_0 и γ_1 , следовательно, и переменные состояния системы будут различны: они определяются системой из двух разностных уравнений, которые в общем виде имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}(0, \gamma_0) &= \mathbf{x}_{\gamma_0} = \mathbf{A}_{\gamma_0}^* \mathbf{x}_0 + h\mathbf{b}_{\gamma_0}^* + \mathbf{m}^* f(i), \\ \mathbf{x}(1, \gamma_1) &= \mathbf{x}_{\gamma_1} = \mathbf{A}_{\gamma_1}^* \mathbf{x}_1 - h\mathbf{b}_{\gamma_1}^* + \mathbf{m}^* f(i). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Применительно к ПФ акселерометра (6), (7) правые части уравнений (8) преобразуются к виду

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{c}^T \mathbf{x}_{\gamma_0} &= h(B_1 + B_2) + f(i)(C_1 + C_2); \\ \mathbf{c}^T \mathbf{x}_{\gamma_1} &= h(B_3 + B_4) + f(i)(C_3 + C_4), \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где B_1, B_2, C_1, C_2 определяют движение ЧЭ акселерометра в первом полупериоде, а B_3, B_4, C_3, C_4 — движение в последующем полупериоде:

$$\begin{aligned} B_1 &= R_1 \frac{d_1(d_1^{1-\gamma_0} - d_1) - (d_1^{1-\gamma_1} - d_1)}{1 - d_1^2}, & B_2 &= R_2 \frac{d_2(d_2^{1-\gamma_0} - d_2) - (d_2^{1-\gamma_1} - d_2)}{1 - d_2^2}, \\ B_3 &= R_1 \frac{(d_1^{1-\gamma_0} - d_1) - d_1(d_1^{1-\gamma_1} - d_1)}{1 - d_1^2}, & B_4 &= R_2 \frac{(d_2^{1-\gamma_0} - d_2) - d_2(d_2^{1-\gamma_1} - d_2)}{1 - d_2^2}; \\ C_1 &= R_1 \frac{d_1(d_1^{1-\gamma_0} - d_1) - (d_1^{1-\gamma_1} - d_1)}{1 - d_1^2}, & C_2 &= R_2 \frac{d_2(d_2^{1-\gamma_0} - d_2) - (d_2^{1-\gamma_1} - d_2)}{1 - d_2^2}, \\ C_3 &= R_1 \frac{(d_1^{1-\gamma_0} - d_1) - d_1(d_1^{1-\gamma_1} - d_1)}{1 - d_1^2}, & C_4 &= R_2 \frac{(d_2^{1-\gamma_0} - d_2) - d_2(d_2^{1-\gamma_1} - d_2)}{1 - d_2^2}. \end{aligned}$$

Элементы вектора состояния системы определяются как

$$\begin{aligned} d_1^{1-\gamma_0} &= e^{-T(1-\gamma_0)/T_1}, & d_1^{1-\gamma_1} &= e^{-T(1-\gamma_1)/T_1}, & d_2^{1-\gamma_1} &= e^{-T(1-\gamma_1)/T_2}, & d_2^{1-\gamma_0} &= e^{-T(1-\gamma_0)/T_2}, \\ d_1 &= e^{-T\gamma_1/T_1}, & d_2 &= e^{-T\gamma_1/T_2}, & d_2 &= e^{-T\gamma_0/T_2}. \end{aligned}$$

Значения скважности импульсов γ_0 и γ_1 определяются из системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} \omega - h \left[\frac{R_1(1-d_1^{\gamma_0})}{1+d_1} + \frac{R_2(1-d_2^{\gamma_0})}{1+d_2} \right] &= \eta\gamma_0 + \psi(i + \varepsilon), \\ \omega - h \left[\frac{R_1(1-d_1^{\gamma_1})}{1+d_1} + \frac{R_2(1-d_2^{\gamma_1})}{1+d_2} \right] &= \eta\gamma_1 + \psi(i + \varepsilon). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Системы уравнений (2), (9) и (10) составляют математическую модель динамики ЧЭ маятникового акселерометра с ШИМ-2, на основе которой проведено численное моделирование процесса функционирования акселерометра ЦЕ-199 с ШИМ-2 в условиях влияния внешних возмущений [5]. Прямое использование маятниковых акселерометров, функционирующих в периодическом режиме на борту ЛА, без учета влияния возмущений, может привести к существенному ухудшению точностных характеристик этих приборов, а при определенных условиях — и к выходу их из строя. Поэтому решаемая в данной статье задача актуальна и важна в плане обеспечения надежной и длительной работы таких акселерометров.

В качестве исходных данных были приняты следующие параметры ЧЭ акселерометра ЦЕ-199:

- коэффициент линейной части ПФ акселерометра $k = 6$;
- постоянная времени $T_1 = 2,7 \cdot 10^{-3}$ с;
- коэффициент затухания $\xi = 0,13$;
- диапазон измерения ускорения ± 1 м/с²;
- период колебания ЧЭ $T_0 = 0,01$ с.

В исходном состоянии в отсутствие внешних возмущений чувствительный элемент под влиянием управляющих импульсов с ШИМ-2 будет совершать колебания, форма которых показана на рис. 3. В условиях влияния внешних возмущений форма колебаний ЧЭ отличается, и тем существенней, чем больше амплитуда возмущений: на рис. 4, а, б показана форма колебаний ЧЭ при возмущениях амплитудой 0,5 м/с² с частотами f_b , равными 10 и 60 Гц соответственно.

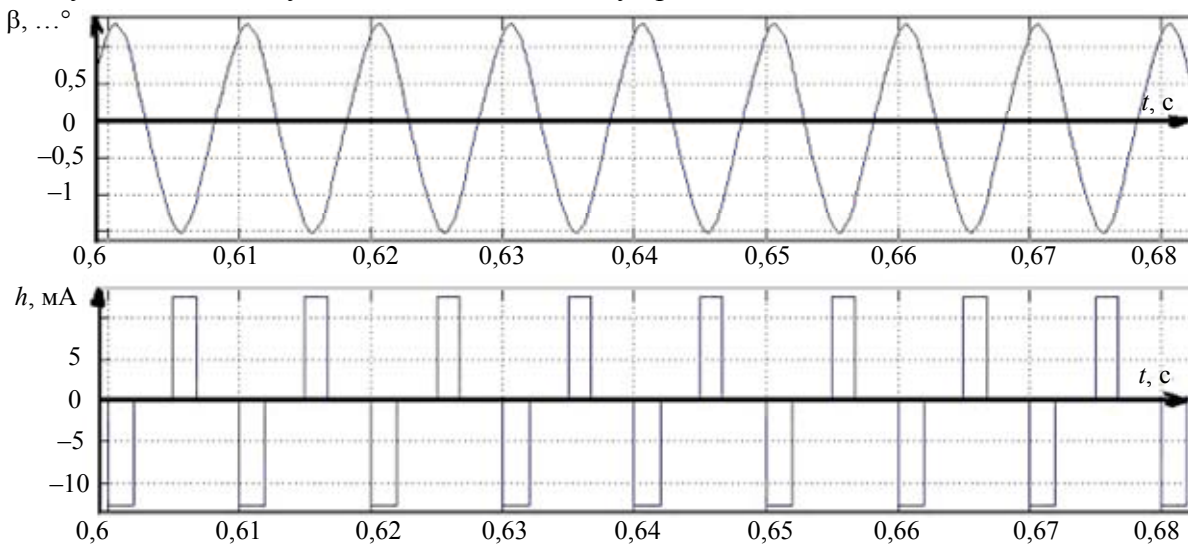


Рис. 3

Амплитуда возмущений влияет и на погрешность акселерометра ЦЕ-199: чем амплитуда выше, тем больше увеличивается погрешность. С другой стороны, на погрешность измерений существенное влияние оказывает качество работы ШИМ-2, одним из основных элементов которого является генератор пилообразных напряжений. Как показали результаты моделирования, погрешность измерений в значительной степени зависит от линейности пилообразного напряжения, шумов ГПН и стабильности источника питания.

Одним из наиболее значимых внешних возмущений является вибрация корпуса ЛА.

Результат моделирования представлен на рис. 5 графиком зависимости погрешности измерений (Δ) от амплитуды возмущений (A_k), источником которых является вибрация корпуса ЛА при различных значениях частоты колебаний корпуса ($f_{к.к}$).

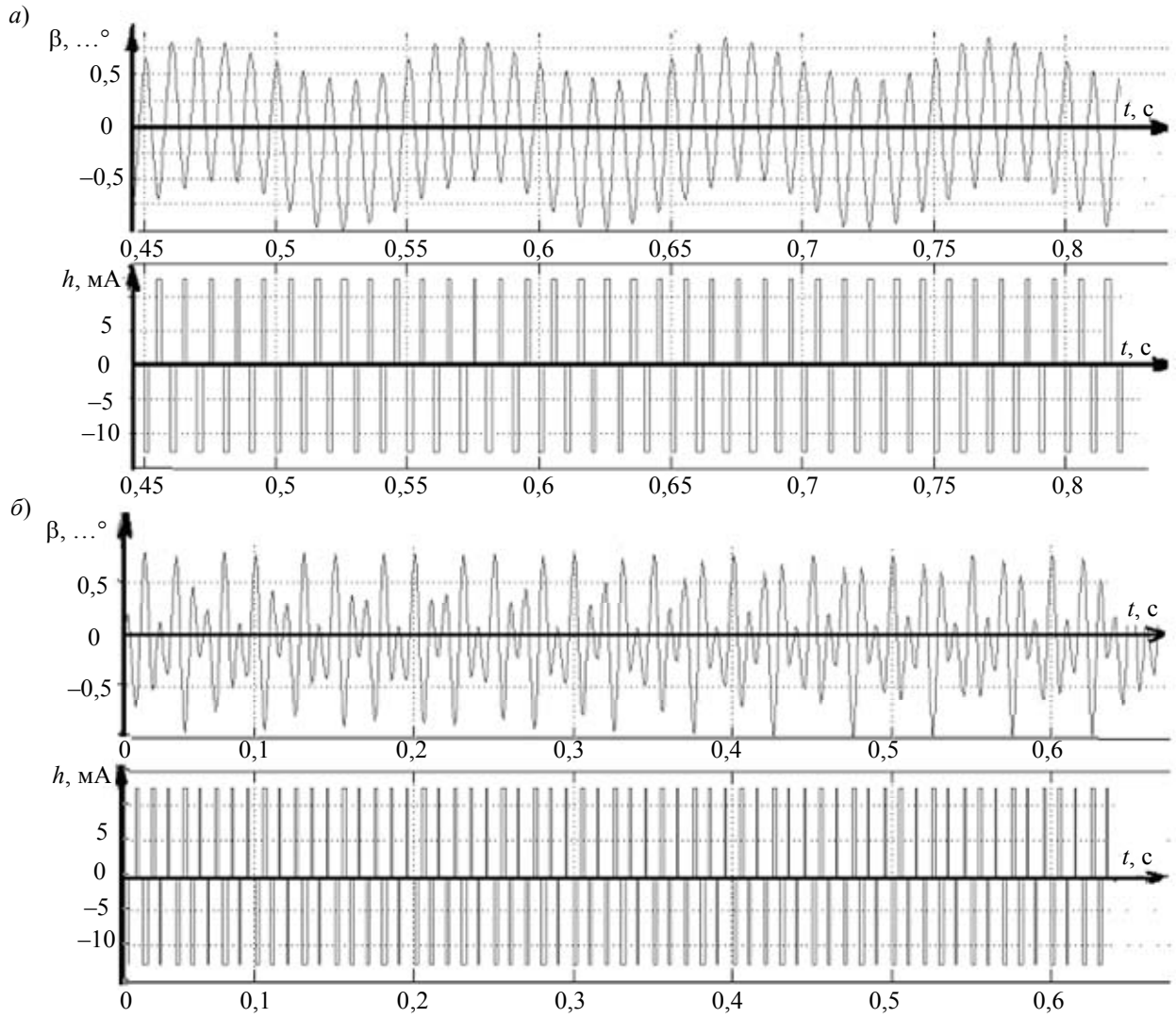


Рис. 4

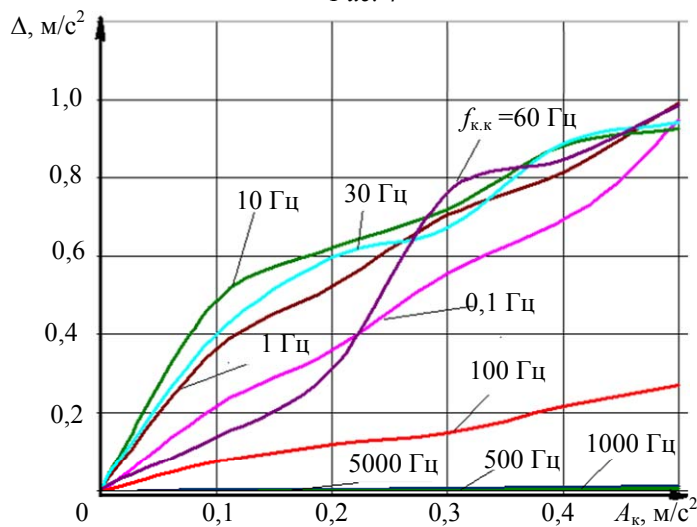


Рис. 5

Таким образом, на основании проведенных исследований функционирования акселерометра ЦЕ-199 в периодическом режиме с ШИМ-2 при влиянии внешних возмущений, а также

с учетом полученных результатов предлагается в качестве мер по минимизации влияния возмущений устанавливать акселерометр ЦЕ-199 к корпусу ЛА не жестко, а с помощью специальных демпферов. Демпферы позволяют существенно погасить колебания корпуса ЛА в области низких, средних и высоких частот. Полезная составляющая измеряемого сигнала определяется постоянной величиной или сверхнизкими частотами до 0,01 Гц, которые демпфер свободно пропускает. Качество измерений при этом стабильное и находится в рамках диапазона изменений метрологических параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 2003. Т. 1. С. 702—712.
2. Лучко С. В., Балувев С. Ю., Ватутин М. А., Рогачев В. А. Периодические режимы в системах автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией второго рода // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 12. С. 27—33.
3. Лучко С. В., Ватутин М. А., Трофимов И. А. Периодические режимы в автоматических системах с широтно-импульсной модуляцией // Там же. 2005. Т. 48, № 6. С. 67—73.
4. Лучко С. В. Расчет дискретных систем автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией. МО СССР, 1984. 112 с.
5. Кетков Ю., Кетков А. MATLAB 7. Программирование, численные методы. СПб: „БХВ — Петербург“, 2005. 737 с.

Сведения об авторах

- Сергей Викторович Лучко** — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматики и электроники, Санкт-Петербург
- Сергей Юрьевич Балувев** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматики и электроники, Санкт-Петербург;
E-mail: S.baluev@mail.ru
- Михаил Алексеевич Ватутин** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматики и электроники, Санкт-Петербург
- Игорь Сергеевич Гурьев** — д-р техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, научно-исследовательский отдел, Санкт-Петербург

Рекомендована кафедрой
бортовых информационных
измерительных комплексов
ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию
10.07.12 г.

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.396:681.323

С. И. ЗИАТДИНОВ

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ ЭКСТРАПОЛЯТОРОВ

Рассматривается вопрос оптимизации параметров экстраполятора с учетом как ширины спектра, так и центральной частоты случайного входного сигнала. Показано, что оптимизация весовых коэффициентов экстраполятора позволяет существенно снизить ошибки экстраполяции.

Ключевые слова: дискретизация сигнала, экстраполирование, оптимизация, ошибки.

При цифровой обработке непрерывные сигналы подвергаются дискретизации по времени и уровню. В результате в интервалах между отсчетами теряется информация, частичное восстановление которой возможно с использованием экстраполяторов различных порядков [1].

В общем случае алгоритм работы экстраполятора вытекает из разложения сигнала в окрестности момента времени t_0 в степенной ряд Тейлора [2]:

$$s(t) = s(t_0) + \frac{t-t_0}{1} s'(t_0) + \frac{(t-t_0)^2}{1 \cdot 2} s''(t_0) + \dots + \frac{(t-t_0)^n}{n!} s^{(n)}(t_0) = \sum_{n=0}^{\infty} s^{(n)}(t_0) \frac{(t-t_0)^n}{n!}, \quad (1)$$

где $s^{(n)}(t_0)$ — n -я производная сигнала в момент времени t_0 .

Рассмотрим непрерывные и дискретные экстраполяторы нулевого и первого порядков.

Непрерывный экстраполятор нулевого порядка. При использовании в выражении (1) только первого слагаемого получаем экстраполятор нулевого порядка, для которого сигнал

$$s_0(t + \tau) = s(t), \quad (2)$$

где τ — время экстраполяции.

Очевидно, что ограничение числа членов ряда (1) неизбежно приводит к ошибке экстраполяции, дисперсия которой в данном случае определяется следующим образом:

$$\sigma_0^2 = [s(t + \tau) - s_0(t + \tau)]^2. \quad (3)$$

Черта сверху в выражении (3) означает статистическое усреднение.

Используя соотношение (2), нетрудно показать, что для стационарного сигнала

$$\sigma_0^2 = 2\sigma^2[1 - r(\tau)], \quad (4)$$

где σ^2 , $r(\tau)$ — дисперсия и коэффициент корреляции сигнала $s(t)$.

Оптимальный непрерывный экстраполятор нулевого порядка. В целях минимизации ошибки экстраполяции представим алгоритм работы оптимального непрерывного экстраполятора нулевого порядка в виде

$$s_3(t + \tau) = as(t),$$

где a — весовой коэффициент.

Найдем значение весового коэффициента a , обеспечивающего наименьшую ошибку экстраполяции. Аналогично соотношению (3) можно записать, что в данном случае

$$\sigma_3^2 = [s(t + \tau) - as(t)]^2 = \sigma^2[1 + a^2 - 2ar(\tau)]. \quad (5)$$

Для определения оптимального значения коэффициента a возьмем от дисперсии ошибки экстраполяции производную по a и приравняем ее к нулю:

$$\frac{d\sigma_3^2}{da} = 2\sigma^2[a - r(\tau)] = 0.$$

Из данного соотношения находим, что минимальная дисперсия ошибки экстраполяции при $a = r(\tau)$ составит

$$\sigma_{3\min}^2 = \sigma^2[1 - r^2(\tau)]. \quad (6)$$

В результате выигрыш в величине ошибки экстраполяции при использовании оптимального коэффициента a определим в виде отношения дисперсий ошибок, соответствующих выражениям (4) и (6):

$$\frac{\sigma_3^2}{\sigma_{3\min}^2} = \frac{2[1 - r(\tau)]}{1 - r^2(\tau)} = \frac{2}{1 + r(\tau)}.$$

Для получения конкретных численных результатов примем следующий коэффициент корреляции сигнала:

$$r(\tau) = \exp(-\Delta\omega^2\tau^2) \cos(\omega_0\tau),$$

где $\Delta\omega$, ω_0 — ширина и средняя частота спектральной плотности сигнала.

Тогда получим, что

$$\frac{\sigma_3^2}{\sigma_{3\min}^2} = \frac{2}{1 + \exp(-\Delta\omega^2\tau^2) \cos(\omega_0\tau)}.$$

Результаты расчетов относительных среднеквадратических ошибок экстраполяции σ_3/σ , $\sigma_{3\min}/\sigma$ и квадрата их отношения для различных значений произведения $\Delta\omega\tau$ при $\omega_0 = 0$ представлены в табл. 1.

Таблица 1

$\Delta\omega\tau$	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
σ_3/σ , %	2,83	7,07	14,11	28,00	41,49	54,38	66,51	77,76
$\sigma_{3\min}/\sigma$, %	2,83	7,06	14,07	27,73	40,59	52,33	62,73	71,64
$\sigma_3^2/\sigma_{3\min}^2$	1,00	1,00	1,01	1,02	1,04	1,08	1,12	1,18

Из полученных результатов следует, что при $\omega_0 = 0$ оптимизация параметров экстраполятора нулевого порядка дает незначительный выигрыш относительно ошибки экстраполяции. В табл. 2 представлены результаты расчетов относительных среднеквадратических ошибок экстраполяции и их отношения для различных значений произведения $\omega_0\tau$ при ширине спектральной плотности сигнала $\Delta\omega = 0$.

Таблица 2

$\omega_0\tau$	0,01	0,04	0,08	0,16	2,98	3,06	3,10	3,12	3,13
σ_3/σ , %	1,0	4,0	8,0	16,0	200	200	200	200	200
$\sigma_{3\min}/\sigma$, %	1,0	4,0	8,0	16,0	16,0	8,0	4,0	2,0	1,0
$\sigma_3/\sigma_{3\min}$	1,0	1,0	1,0	1,0	12,5	25,0	50,0	100	200

Анализируя данные табл. 2, можно отметить, что в диапазоне $0 \leq \omega_0 \tau \leq 0,3$ оптимальный экстраполятор не обеспечивает уменьшение ошибки экстраполяции. В то же время при $\omega_0 \tau \geq 3$ ошибка экстраполяции не превышает 10 % и меньше ошибки неоптимального экстраполятора в 25—200 раз.

Дискретный экстраполятор нулевого порядка. Алгоритм работы данного экстраполятора записывается следующим образом [1]:

$$s_3(t_i + \tau) = s(t_i),$$

где $s(t_i)$ — i -й отсчет сигнала; $t_i = iT$; T — период дискретизации; $i = 0, 1, 2, 3, \dots$ — номер отсчета.

При этом дисперсия ошибки экстраполяции определяется из соотношения

$$\sigma_3^2 = [s(t_i + \tau) - s_3(t_i + \tau)]^2,$$

которое после несложных преобразований приводится к виду

$$\sigma_3^2 = 2\sigma^2[1 - r(\tau)]. \quad (7)$$

Полученное выражение (7) для дисперсии ошибки экстраполяции совпадает с аналогичным выражением (4) для непрерывного экстраполятора.

Оптимальный дискретный экстраполятор нулевого порядка. Для данного экстраполятора можно записать следующий алгоритм работы:

$$s_3(t_i + \tau) = as(t_i).$$

Опуская несложные выкладки, аналогичные алгоритму работы непрерывного экстраполятора, оптимальное значение весового коэффициента a , минимизирующего ошибку экстраполяции, можно определить как $a = r(\tau)$. При этом дисперсия ошибки экстраполяции определяется соотношением

$$\sigma_{\text{эmin}}^2 = \sigma^2[1 - r^2(\tau)].$$

Данное выражение полностью совпадает с выражением (6) для дисперсии минимальной ошибки непрерывного экстраполятора нулевого порядка.

Непрерывный экстраполятор первого порядка. При использовании в выражении (1) первых двух слагаемых получаем алгоритм работы рассматриваемого экстраполятора:

$$s_3(t + \tau) = s(t) + s'(t)\tau.$$

Дисперсия ошибки экстраполяции в данном случае определяется соотношением

$$\sigma_3^2 = [s(t + \tau) - s_3(t + \tau)]^2 = 2\sigma^2[1 - r(\tau) - 0,5r''(0)\tau^2 + r'(\tau)\tau - r'(0)\tau],$$

где $r'(\tau)$, $r''(\tau)$ — первая и вторая производные коэффициента корреляции $r(\tau)$ сигнала $s(t)$.

Оптимальный непрерывный экстраполятор первого порядка. Алгоритм работы данного экстраполятора представим в виде

$$s_3(t + \tau) = a_0s(t) + a_1s'(t)\tau,$$

при этом дисперсия ошибки экстраполяции будет определяться выражением

$$\sigma_3^2 = \sigma^2[1 + a_0^2 - 2a_0r(\tau) - a_1^2r''(0)\tau^2 + 2a_1r'(\tau)\tau - 2a_0a_1r'(0)\tau].$$

Подбором весовых коэффициентов a_0 и a_1 минимизируем ошибку экстраполяции. Для этого возьмем частные производные от σ_3^2 по a_0 и a_1 и приравняем их к нулю:

$$\frac{d\sigma_3^2}{da_0} = 2\sigma^2[a_0 - r(\tau) - a_1r'(0)\tau] = 0, \quad \frac{d\sigma_3^2}{da_1} = -2\sigma^2[a_1r''(0)\tau^2 - r'(\tau)\tau + a_0r'(0)\tau] = 0.$$

Решая данную систему уравнений относительно коэффициентов a_0 и a_1 , находим, что

$$a_0 = \frac{r(\tau)r''(0) + r'(\tau)r'(0)}{r''(0) - [r'(0)]^2}, \quad a_1 = \frac{r'(\tau) + r(\tau)r'(0)}{\{r''(0) - [r'(0)]^2\}\tau}.$$

После подстановки в полученные выражения для a_0 и a_1 коэффициента корреляции сигнала $r(\tau) = \exp(-\Delta\omega^2\tau^2)\cos(\omega_0\tau)$ можно в окончательном виде записать:

$$a_0 = \exp(-\Delta\omega^2\tau^2)\cos(\omega_0\tau), \quad a_1 = \frac{\exp(-\Delta\omega^2\tau^2)[2\tau\Delta\omega^2\tau\cos(\omega_0\tau) + \omega_0\sin(\omega_0\tau)]}{(2\Delta\omega^2 + \omega_0^2)\tau}.$$

Тогда дисперсии ошибок экстраполяции σ_3^2 , $\sigma_{3\min}^2$ будут определяться выражениями

$$\sigma_3^2 = 2\sigma^2 \{1 - \exp(-\Delta\omega^2\tau^2)\cos(\omega_0\tau) + \Delta\omega^2\tau^2 + 0,5\omega_0^2\tau^2 - 2\Delta\omega^2\tau^2\exp(-\Delta\omega^2\tau^2)\cos(\omega_0\tau) - \omega_0\tau\exp(-\Delta\omega^2\tau^2)\sin(\omega_0\tau)\}, \quad (8)$$

$$\sigma_{3\min}^2 = \sigma^2 \left\{ 1 - \exp(-2\Delta\omega^2\tau^2)\cos^2(\omega_0\tau) - \frac{\exp(-2\Delta\omega^2\tau^2)[2\Delta\omega^2\tau\cos(\omega_0\tau) + \omega_0\sin(\omega_0\tau)]^2}{2\Delta\omega^2 + \omega_0^2} \right\}. \quad (9)$$

Для получения конкретных результатов рассмотрим частные случаи. Положим среднюю частоту сигнала $\omega_0 = 0$. Тогда соотношения (8) и (9) примут следующий вид:

$$\sigma_3^2 = 2\sigma^2 \{1 - \exp(-\Delta\omega^2\tau^2) + \Delta\omega^2\tau^2[1 - 2\exp(-\Delta\omega^2\tau^2)]\},$$

$$\sigma_{3\min}^2 = \sigma^2 [1 - \exp(-2\Delta\omega^2\tau^2)(1 + 2\Delta\omega^2\tau^2)].$$

Результаты расчетов относительных среднеквадратических ошибок σ_3/σ , $\sigma_{3\min}/\sigma$, а также квадрата их отношения приведены в табл. 3.

Таблица 3

$\Delta\omega\tau$	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
σ_3/σ , %	$6,93 \cdot 10^{-2}$	$4,33 \cdot 10^{-1}$	1,73	6,85	15,2	26,5	40,43	56,6
$\sigma_{3\min}/\sigma$, %	$5,66 \cdot 10^{-2}$	$3,53 \cdot 10^{-1}$	1,40	5,51	12,0	20,4	30,0	40,3
$\sigma_3^2/\sigma_{3\min}^2$	1,50	1,50	1,51	1,53	1,61	1,69	1,81	1,97

Сравнивая данные табл. 1 и 3, можно отметить, что применение экстраполятора первого порядка позволяет при $\Delta\omega\tau < 0,1$ практически на порядок уменьшить ошибку экстраполяции. При этом оптимизация параметров экстраполятора также уменьшает ошибку экстраполяции более чем в 1,5 раза по сравнению с неоптимальным экстраполятором.

Рассмотрим случай, когда ширина спектральной плотности сигнала $\Delta\omega = 0$. Тогда

$$a_0 = \cos(\omega_0\tau), \quad a_1 = \sin(\omega_0\tau)/\omega_0\tau,$$

$$\sigma_3^2 = \sigma^2 \{2[1 - \cos(\omega_0\tau)] + \omega_0^2\tau^2 - 2\omega_0\tau\sin(\omega_0\tau)\}, \quad \sigma_{3\min}^2 = 0.$$

В табл. 4 показаны результаты расчетов нормированной среднеквадратической ошибки σ_3/σ при $\Delta\omega = 0$ для различных значений произведения $\omega_0\tau$.

Таблица 4

$\omega_0\tau$	0,01	0,04	0,08	0,16	0,32	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
σ_3/σ , %	0,005	0,08	0,32	1,28	5,11	7,96	12,4	17,8	24,2	31,4

Сравнивая данные табл. 2 и 4, можно отметить, что экстраполятор первого порядка по сравнению с экстраполятором нулевого порядка обеспечивает уменьшение ошибки экстрапо-

ляции более чем на порядок. При этом оптимизация параметров экстраполятора первого порядка позволяет свести к нулю ошибку экстраполяции.

Дискретный экстраполятор первого порядка. Для вычисления первой производной сигнала в выражении (1) воспользуемся первой обратной разностью. При этом

$$s'(t_i) = \frac{s(t_i) - s(t_i - T)}{T}.$$

Тогда алгоритм работы дискретного экстраполятора первого порядка можно записать следующим образом:

$$s_3(t_i + \tau) = \left(1 + \frac{\tau}{T}\right)s(t_i) - \frac{\tau}{T}s(t_i - T).$$

Опуская промежуточные выкладки, запишем выражение для дисперсии ошибки экстраполяции:

$$\sigma_3^2 = \sigma^2 \left[1 + \left(1 + \frac{\tau}{T}\right)^2 + \frac{\tau^2}{T^2} - 2\left(1 + \frac{\tau}{T}\right)r(\tau) + 2\frac{\tau}{T}r(\tau + T) - 2\left(1 + \frac{\tau}{T}\right)\frac{\tau}{T}r(T) \right].$$

Результаты расчета относительной среднеквадратической ошибки экстраполяции для дискретного неоптимального экстраполятора первого порядка при $\Delta\omega = 0$ и $\tau = T$ для различных значений произведения $\omega_0\tau$ приведены в табл. 5.

Таблица 5

$\omega_0\tau$	0,01	0,04	0,08	0,16	0,32	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$\sigma_3/\sigma, \%$	0,01	0,16	0,64	2,55	10,1	15,8	24,5	34,9	47,0	60,7

Оптимальный дискретный экстраполятор первого порядка. Алгоритм работы данного экстраполятора имеет вид

$$s_3(t_i + \tau) = a_0 \left(1 + \frac{\tau}{T}\right)s(t_i) - a_1 \frac{\tau}{T}s(t_i - T),$$

при этом ошибка экстраполяции определяется следующим выражением:

$$\sigma_3^2 = \sigma^2 \left[1 + a_0^2 \left(1 + \frac{\tau}{T}\right)^2 + a_1^2 \frac{\tau^2}{T^2} - 2a_0 \left(1 + \frac{\tau}{T}\right)r(\tau) + 2a_1 \frac{\tau}{T}r(\tau + T) - 2a_0 a_1 \left(1 + \frac{\tau}{T}\right)\frac{\tau}{T}r(T) \right].$$

Аналогично предыдущим случаям выбором весовых коэффициентов a_0 и a_1 минимизируем ошибку экстраполяции.

Система уравнений, позволяющая найти оптимальные значения коэффициентов a_0, a_1 , имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_3^2}{da_0} &= 2\sigma^2 \left(1 + \frac{\tau}{T}\right) \left[a_0 \left(1 + \frac{\tau}{T}\right) - r(\tau) + 2a_1 \frac{\tau}{T}r(T) \right] = 0, \\ \frac{d\sigma_3^2}{da_1} &= 2\sigma^2 \frac{\tau}{T} \left[a_1 \frac{\tau}{T} - r(\tau + T) + a_0 \left(1 + \frac{\tau}{T}\right)r(T) \right] = 0. \end{aligned}$$

Решая данную систему уравнений относительно искомых коэффициентов, находим

$$a_0 = \frac{r(\tau)}{1 + \frac{\tau}{T}} - \frac{r(\tau + T) - r(T)r(\tau)}{[1 - r^2(T)] \left(1 + \frac{\tau}{T}\right)} r(T), \quad a_1 = \frac{r(\tau + T) - r(T)r(\tau)}{[1 - r^2(T)] \frac{\tau}{T}}.$$

Результаты расчетов нормированных ошибок σ_3/σ , $\sigma_{3\min}/\sigma$, а также их отношения $\sigma_3/\sigma_{3\min}$ для неоптимального и оптимального дискретных экстраполяторов первого порядка

при различных значениях произведения $\Delta\omega\tau$ и $\omega_0 = 0, \tau = T, r(\tau) = \exp(-\Delta\omega^2\tau^2)\cos(\omega_0\tau)$ приведены в табл. 6.

Таблица 6

$\Delta\omega\tau$	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$\sigma_3/\sigma, \%$	0,138	0,864	3,435	13,41	28,97	48,73	71,11	94,47
$\sigma_{\text{эmin}}/\sigma, \%$	0,113	0,70	2,79	10,66	22,31	35,98	49,87	62,58
$\sigma_3/\sigma_{\text{эmin}}$	1,50	1,51	1,52	1,58	1,68	1,83	2,03	2,28

Анализ полученных данных показывает, что оптимизация параметров экстраполятора позволяет в 1,5 раза снизить ошибку экстраполяции, а при ширине спектральной плотности сигнала $\Delta\omega = 0$ оптимальный экстраполятор обеспечивает нулевую ошибку экстраполяции:

$$\sigma_{\text{эmin}} = 0.$$

Выводы. Оптимизация параметров экстраполяторов нулевого и первого порядков с учетом ширины спектральной плотности сигнала не дает заметного уменьшения ошибки экстраполяции. Вместе с тем оптимизация параметров экстраполяторов с учетом средней частоты спектральной плотности сигнала позволяет более чем на порядок снизить ошибку экстраполяции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зиатдинов С. И. Линейные искажения сигнала экстраполяторами // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 5. С. 57—60.
2. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления. М.: Наука, 1966. Т. 1. 551 с.

Сведения об авторе

Сергей Ильич Зиатдинов — д-р. техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра информационно-сетевых технологий; E-mail: Kaf53@GUAP.ru

Рекомендована кафедрой
информационно-сетевых технологий

Поступила в редакцию
18.05.11 г.

А. И. ШИМАРОВ

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Рассматривается способ определения углового положения одного объекта относительно другого. Представлено теоретическое обоснование способа, приведены выражения для расчета углов поворота объекта и результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: измерение, оптико-электронный способ, угловое положение объекта.

Задачи, связанные с разработкой способов и устройств для дистанционного контроля углового положения объектов, относятся к числу актуальных и требующих постоянного совершенствования и развития. Известный способ определения углового положения объекта, предложенный в работах [1—3], заключается в том, что с базового объекта (БО) на контролируемый объект (КО) проецируют измерительную диаграмму [1, 2]. Эту диаграмму формируют тремя расходящимися под заданными углами ε_1 и ε_2 веерообразными пучками световых лучей 7; далее определяют взаимное положение следов 8 этих лучей на экране 4, что позволяет вычислить угловое положение контролируемого объекта (рис. 1). Устройство, реализующее этот способ, содержит проектор 1, состоящий из источника света 2 и светоделительной оптической системы 3, а также экран 4 с двумя шкалами 5 и 6, нанесенными на его поверхность. Связь взаимного положения следов лучей 7 с величиной углов β и μ поворота КО вокруг двух взаимно перпендикулярных осей $O_K Z_K$ и $O_K Y_K$, соответственно описывается выражениями

$$\operatorname{tg} \beta = \pm \left\{ -\frac{m}{2} + \left[\left(\frac{m}{2} \right)^2 + n \right]^{1/2} \right\}^{1/2}; \quad (1)$$

$$\sin \mu = C(1 - A^2) \cos \beta (4d \operatorname{tg} \varepsilon)^{-1}, \quad (2)$$

где

$$m = 1 - C^2 (1 - A^2)^2 (16d \operatorname{tg}^2 \varepsilon)^{-1} - n; \quad n = A^2 (\operatorname{tg}^2 \varepsilon)^{-1}; \quad A = (\Delta Z_1 - \Delta Z_2)(\Delta Z_1 + \Delta Z_2)^{-1};$$

$$C = (\Delta Z_3 + \Delta Z_4) - (\Delta Z_1 + \Delta Z_2);$$

$2d$ — расстояние между измерительными шкалами 5 и 6 экрана; $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$ — угол между соседними пучками световых лучей; $\Delta Z_1, \Delta Z_2, \Delta Z_3, \Delta Z_4$ — интервалы между точками пересечения следов световых лучей 7 со шкалами 5 и 6.

При измерениях данным способом, как это видно из выражений (1) и (2), вычисленное значение угла β является функцией ряда параметров: $\beta = f(\Delta Z_i; \varepsilon; d)$, т.е. точность определения угла β зависит не только от точности измерения интервалов ΔZ_i , $i = 1, 2, 3, 4$, но и угла ε и расстояния d . Вычисленное значение угла μ также является функцией нескольких параметров.

Анализ выражений (1) и (2) показывает, что наибольшее влияние на точность определения углов μ и β поворота оказывает параметр ε . Выбор величины ε осуществляется в зависимости от диапазона измеряемых углов, расстояния S между базовым и контролируемым объектами, а также исходя из конструктивных требований к устройству, реализующему способ измерений. Например, увеличение ε ведет к повышению чувствительности измерительного устройства и, вместе с тем, к уменьшению диапазона измеряемых углов. Обычно меньшим значениям S соответствуют большие значения ε . Задание параметра ε в процессе измерений

необходимо осуществлять с высокой точностью (до десятых или сотых долей градуса), что является сложной технической задачей. В связи с этим в процессе вычисления углов β и μ параметр ε имеет действительное значение ε_d , которое отличается от номинального значения ε_n . Таким образом, измерение интервалов ΔZ_i осуществляется при одном значении параметра $\varepsilon = \varepsilon_d$, а вычисление углов поворота β и μ — при другом: $\varepsilon = \varepsilon_n$. Вторая составляющая погрешностей измерений по этому способу обусловлена отличием действительного значения d_d расстояния $2d$ между шкалами 5 и 6 в момент проведения измерений от его номинального значения d_n , которое используется при вычислении углов поворота КО.

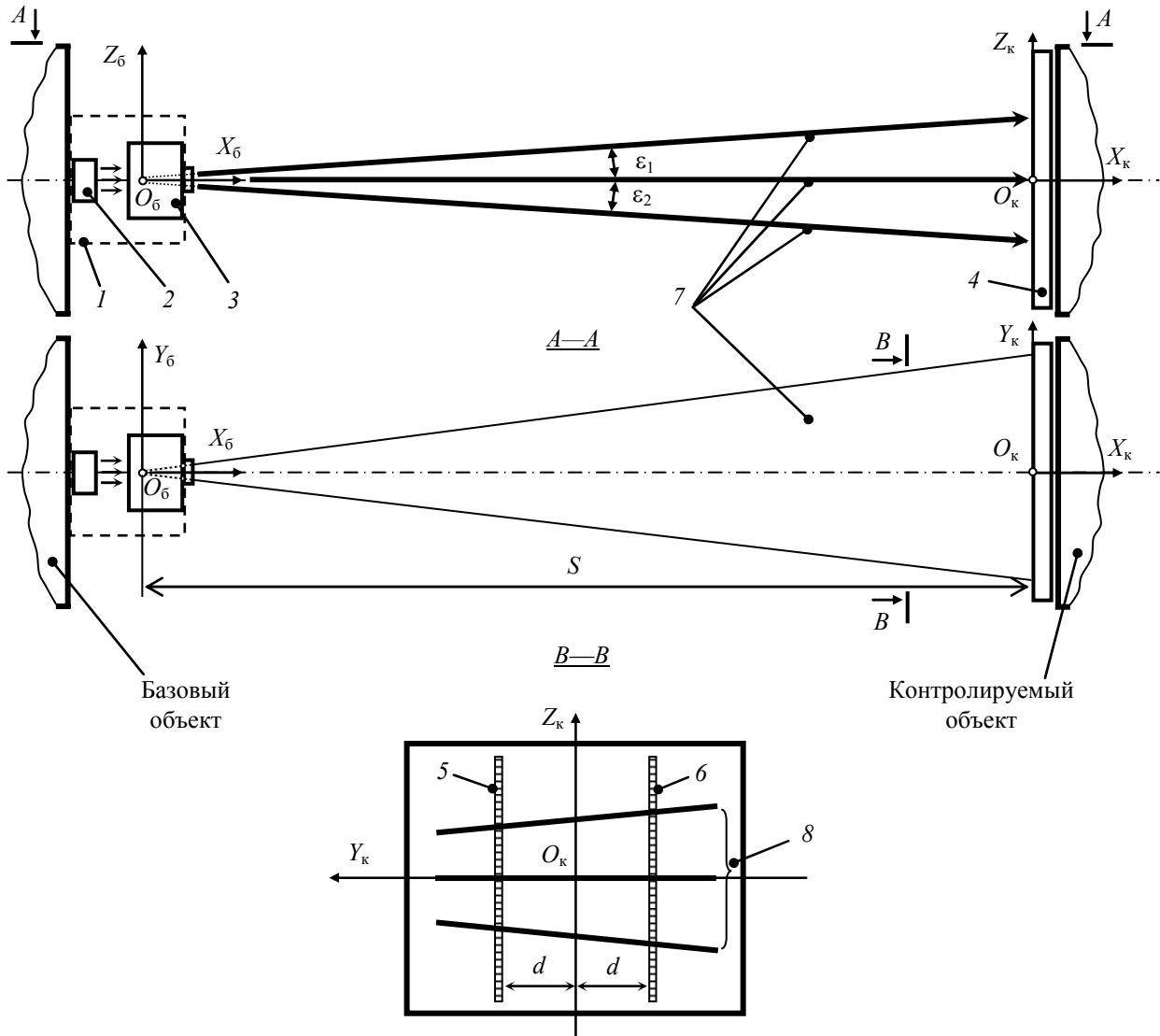


Рис. 1

Из вышеизложенного следует, что для обеспечения высокой точности определения углового положения КО необходимо повысить точность задания параметров ε и d или обеспечить независимость результатов от этих параметров. Предлагаемый в настоящей статье способ позволяет решить вторую задачу.

Этот способ заключается в следующем. После определения взаимного положения следов световых лучей на экране пучки лучей поворачивают на малый образцовый угол сначала вокруг оси, параллельной линии пересечения плоскостей этих пучков, и вторично определяют положение следов на экране. Затем их поворачивают вокруг оси, перпендикулярной указанной линии пересечения, и в третий раз определяют положение следов на экране.

Взаиморасположение следов 8 световых лучей 7 на каждом этапе определяют, измеряя интервалы ΔZ_i , $i = 1, 2, 3, 4$, между точками пересечения следов со шкалами 5 и 6: $\Delta Z_1^{(j)}, \Delta Z_2^{(j)}, \Delta Z_3^{(j)}, \Delta Z_4^{(j)}$, где j — номер этапа измерения. По результатам этих измерений вычисляют угловое положение объекта.

На рис. 2 приведены примеры взаимного положения следов световых лучей для трех промежуточных этапов определения углов поворота КО. Эти примеры для наглядности соответствуют такому положению КО, при котором $\beta = 0, \mu = 0$.

Первый этап (см. рис. 2, а): интервалы ΔZ_i связаны с углами β и μ следующими выражениями:

$$\Delta Z_1^{(j)} = \frac{D^{(j)}}{E^{(j)}} \operatorname{tg} \varepsilon; \quad \Delta Z_2^{(j)} = \frac{D^{(j)}}{F^{(j)}} \operatorname{tg} \varepsilon; \quad \Delta Z_3^{(j)} = \frac{G^{(j)}}{E^{(j)}} \operatorname{tg} \varepsilon; \quad \Delta Z_4^{(j)} = \frac{G^{(j)}}{F^{(j)}} \operatorname{tg} \varepsilon, \quad j = 1, \quad (3)$$

где

$$D^{(1)} = S \cos \mu - d \cos \beta \sin \mu; \quad G^{(1)} = S \cos \mu + d \cos \beta \sin \mu; \\ E^{(1)} = \cos \beta (\cos \beta + \operatorname{tg} \varepsilon \sin \beta \cos \mu); \quad F^{(1)} = \cos \beta (\cos \beta - \operatorname{tg} \varepsilon \sin \beta \cos \mu);$$

здесь S — расстояние между началами O_6 и O_K систем координат $X_6 Z_6 Y_6$ и $X_K Z_K Y_K$ базового и контролируемого объектов.

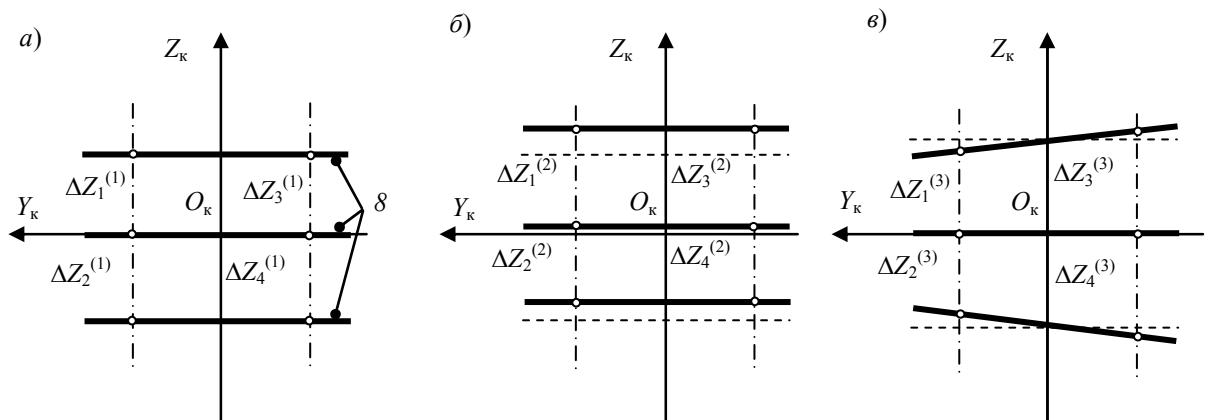


Рис. 2

Второй этап (см. рис. 2, б): пучки лучей поворачивают на малый образцовый угол $\Delta\beta$ вокруг оси, параллельной линии пересечения плоскостей этих пучков (т.е. вокруг оси $O_6 Y_6$ системы координат $X_6 Z_6 Y_6$), и вторично определяют взаимное расположение следов лучей, измеряя интервалы $\Delta Z_1^{(2)}, \Delta Z_2^{(2)}, \Delta Z_3^{(2)}, \Delta Z_4^{(2)}$. Эти интервалы связаны с углами β и μ соотношениями (3), в которых величины $D^{(j)}, G^{(j)}, E^{(j)}$ и $F^{(j)}, j=2$, определяются из выражений

$$\left. \begin{aligned} D^{(2)} &= S \cos \mu - d \cos (\beta + \Delta \beta) \sin \mu; \\ G^{(2)} &= S \cos \mu + d \cos (\beta + \Delta \beta) \sin \mu; \\ E^{(2)} &= \cos (\beta + \Delta \beta) (\cos (\beta + \Delta \beta) + \operatorname{tg} \varepsilon \sin (\beta + \Delta \beta) \cos \mu), \\ F^{(2)} &= \cos (\beta + \Delta \beta) (\cos (\beta + \Delta \beta) - \operatorname{tg} \varepsilon \sin (\beta + \Delta \beta) \cos \mu). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Третий этап (см. рис. 2, в): световые пучки поворачивают на малый образцовый угол $\Delta\mu$ вокруг оси, перпендикулярной линии пересечения плоскостей этих пучков (т.е. вокруг оси $O_6 Z_6$), и в третий раз определяют положение следов лучей, измеряя интервалы $\Delta Z_1^{(3)}, \Delta Z_2^{(3)}$,

$\Delta Z_3^{(3)}, \Delta Z_4^{(3)}$. Эти интервалы связаны с углами β и μ соотношениями (3), в которых величины $D^{(j)}, G^{(j)}, E^{(j)}$ и $F^{(j)}, j=3$, определяются из выражений

$$\left. \begin{aligned} D^{(3)} &= S \cos(\mu + \Delta\mu) - d \cos\beta \sin(\mu + \Delta\mu); \\ G^{(3)} &= S \cos(\mu + \Delta\mu) + d \cos\beta \sin(\mu + \Delta\mu); \\ E^{(3)} &= \cos\beta [\cos\beta + \operatorname{tg}\varepsilon \sin\beta \cos(\mu + \Delta\mu)], \\ F^{(3)} &= \cos\beta [\cos\beta - \operatorname{tg}\varepsilon \sin\beta \cos(\mu + \Delta\mu)]. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

На четвертом этапе определяют угловое положение контролируемого объекта: из уравнений (3) и (4) следует формула для вычисления угла β , а из уравнений (3) и (5) — формула для вычисления угла μ :

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{(M^{(2)} - 1) \pm \left[(M^{(2)} - 1)^2 + 4M^{(2)} \operatorname{tg}^2(\Delta\beta) \right]^{1/2}}{2M^{(2)} \operatorname{tg}(\Delta\beta)}, \quad \operatorname{ctg}\mu = \frac{M^{(3)} - \cos(\Delta\mu)}{\sin(\Delta\mu)}, \quad (6)$$

где

$$M^{(2)} = \frac{(\Delta Z_4^{(2)} - \Delta Z_3^{(2)}) (\Delta Z_4^{(1)} + \Delta Z_3^{(1)})}{(\Delta Z_4^{(2)} + \Delta Z_3^{(2)}) (\Delta Z_4^{(1)} - \Delta Z_3^{(1)})}, \quad M^{(3)} = \frac{(\Delta Z_1^{(3)} + \Delta Z_2^{(3)}) - (\Delta Z_3^{(3)} + \Delta Z_4^{(3)})}{(\Delta Z_1 + \Delta Z_2) - (\Delta Z_3 - \Delta Z_4)}.$$

Поворот световых пучков на малый известный угол позволяет определить реальную передаточную функцию измерительного устройства в процессе вычисления углов поворота КО. Величина образцовых углов $\Delta\beta$ и $\Delta\mu$ выбирается в зависимости от диапазонов измеряемых углов, расстояния между объектами, а также ряда других факторов и составляет 1...10 % от указанных диапазонов. Следует отметить, что поворот пучков световых лучей вокруг оси O_6Y_6 , параллельной линии пересечения плоскостей этих пучков, повышает точность определения угла β , а поворот вокруг оси O_kZ_k , перпендикулярной указанной линии, — точность определения угла μ .

Рассмотренный способ имеет более высокие метрологические характеристики по сравнению с известным. При измерениях, осуществляемых в соответствии с данным способом, как это видно из выражений (6), вычисленные значения углов представляют собой функции $\beta = f_1(\Delta Z_i^{(1)}; \Delta Z_i^{(2)}; \Delta\beta)$ и $\mu = f_2(\Delta Z_i^{(1)}; \Delta Z_i^{(3)}; \Delta\mu)$, которые не зависят от параметров ε и d измерительной системы, а также от текущего углового положения КО. Это свойство позволяет при определении углового положения КО устанавливать параметр ε , ориентируясь только на получение необходимых размеров измерительной диаграммы, не измеряя при этом величину ε . Чем больше размеры диаграммы (при заданных размерах экрана), тем выше точность измерения интервалов $\Delta Z_i^{(j)}$, а следовательно, выше точность определения углов β и μ .

Таким образом, путем дополнительных поворотов пучков световых лучей можно определить действительное значение передаточной функции измерительной системы без вычисления значений ее конструктивных параметров, т.е. установить связь между выходными ($\Delta Z_i^{(j)}$) и входными (β и μ) величинами в момент текущего измерения. Использование полученной информации и обработка результатов всех измерений позволяют определить угловое положение КО с точностью, не зависящей от точности задания ε и d .

Были проведены сравнительные испытания по определению углового положения объектов с использованием известного и предлагаемого способов. Контролируемый объект имитировался горизонтально расположенной плоскостью (1450×1450 мм) с двумя шкалами (с ценой деления 1 мм), нанесенными на ее поверхность на расстоянии 400 мм друг от друга. Угловое

положение плоскости задавалось посредством оптического квадранта типа КО-1М. Проектор был построен на базе полупроводникового лазерного диода, светоделительной призмы, цилиндрических линз и других элементов. Номинальное значение угла ε составляло 35° . Образцовые приращения углов, заданные с помощью специальной поворотной платформы, имели следующие значения: $\Delta\beta = \Delta\mu = 2^\circ 30'$. Для определения углов поворота КО использовалось вычислительное устройство на базе персонального компьютера. Результаты экспериментальных сравнительных исследований приведены в таблице.

Параметр	Заданное значение, ...°	Способ-прототип		Предлагаемый способ	
		Измеренное значение, ...°	Погрешность, %	Измеренное значение, ...°	Погрешность, %
β	15,0	15,6	3,7	14,9	0,6
	25,0	23,6	5,6	25,1	0,4
μ	15,0	15,2	1,3	15,1	0,3
	25,0	25,6	2,4	24,9	0,4

Следует отметить, что разработанный способ прост в реализации, так как не требует высокой точности изготовления элементов оптической системы проектора и экрана, а также наличия специальных устройств для задания и периодического контроля величин ε и d . Этот способ может быть использован при создании систем для контроля углового положения труднодоступных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликовский К. Л., Шимаров А. И. Способ определения углового положения объектов // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1978. Т. 21, № 11. С. 116—120.
2. А. с. 659901 СССР. Устройство для измерения углов наклона / К. Л. Куликовский, В. Я. Купер, А. И. Шимаров // Б.И. 1979. № 16.
3. Шимаров А. И. Метод определения взаимного положения объектов // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1984. Т. 27, № 1. С. 89—93.

Сведения об авторе

Александр Иванович Шимаров — канд. техн. наук, доцент; Самарский государственный технический университет, кафедра теоретической и общей электротехники;
E-mail: alexandr-shimarov@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
теоретической и общей электротехники

Поступила в редакцию
02.04.11 г.

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 547.97: 535.8; 541.147

Н. О. СОБЕЩУК, И. Ю. ДЕНИСЮК, М. И. ФОКИНА

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОКУСИРОВКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫМИ ТОРЦЕВЫМИ МИКРООПТИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ, СФОРМИРОВАННЫМИ ПУТЕМ ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИИ

Исследуется эффективность фокусировки излучения полимерными микрооптическими элементами, сформированными на торце оптоволокна путем фотополимеризации в ограниченном объеме мономера.

Ключевые слова: волновод, оптоволокно, микрооптический элемент, сопряжение, самофокусировка, фотополлимер.

В настоящее время одна из основных проблем волоконной оптики — сопряжение оптических волокон различных диаметров и апертур, а также введение излучения полупроводниковых лазеров в волокно с наименьшими потерями. Одним из путей решения проблемы является создание микрооптических элементов непосредственно на торце оптоволокна с использованием методов самосогласования, что позволяет избежать последующей юстировки фокусирующей конструкции.

Среди различных методов изготовления торцевых микрооптических элементов, например, таких как оплавление лазером/газовой горелкой [1, 2], химическое травление волокна [3], нарезка ионным пучком [4], новой является технология получения на конце оптоволокна полимерных микроэлементов [5—7]. Эта технология обладает рядом преимуществ по сравнению с вышеперечисленными: несложностью реализации, отсутствием химического загрязнения, заведомой соосностью элемента со световедущей жилой волокна.

В основе данной технологии лежит формирование элементов методом фотополимеризации смеси мономеров, нанесенной на торец сколотого волокна, под действием исходящего непосредственно из волокна лазерного излучения. Это позволяет получать микрооптические элементы высокого качества, контролировать их размер и профиль, а также обеспечивает их самосогласование со световедущей жилой [7].

В настоящей статье исследуется эффективность полимерных микрооптических элементов, полученных путем фотополимеризации исходящим из волокна излучением в ограниченном объеме мономера. Метод получения элементов рассмотрен в работе [8]. В свободный конец многомодового волокна 50/125 (длина волокна 3 м, концы волокна — в коннекторах типа FC, потери в которых составляют около 0,15 дБ) вводилось излучение азотного лазера ($\lambda = 337$ нм, частота 100 Гц, мощность отдельного импульса 1,6 кВт при длительности 10^{-8} с), на другой — вертикально закрепленный — торец наносилась капля жидкой мономерной композиции; экспозиция варьировалась в широких пределах.

Выполнение ряда экспериментов с изменением условий фотополимеризации позволило выделить несколько определенных стадий роста полимерных микрооптических элементов [8]. На рис. 1 показан наиболее характерный профиль элемента, сформированного на торце оптоволокна при экспозиции 15 с.

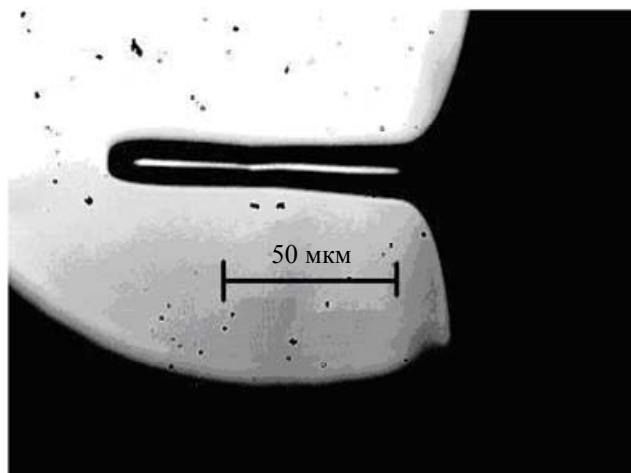


Рис. 1

Среди особенностей процесса роста могут быть выделены отсутствие уширения элементов, обусловленное ингибирующим действием кислорода, которое делает возможным образование самоорганизованной волноводной структуры, и увеличение радиуса кривизны микролинзы на конце элемента при большом времени облучения. Влияние процессов диффузии кислорода при формировании микрооптических элементов на основе акриловых мономеров подробно исследовано в работах [9—11], особенности технологического процесса роста элементов рассмотрены в работе [8].

Для исследования эффективности фокусировки излучения полученными микроструктурами был проведен анализ распределения светового поля излучения, выходящего из оптоволокна с торцевым микрооптическим элементом и без него.

На предметном столике микроскопа (МБИ 11У 4,2, увеличение 0,35—20[×]) вертикально фиксировался торец оптического волокна. Другой его конец закреплялся на определенном расстоянии от лазерного диода, излучение которого вводилось в волокно. Вместо одного из окуляров микроскопа использовалась веб-камера, соединенная с ноутбуком, что позволяло наблюдать излучение, выходящее из волокна, в режиме реального времени и на различных расстояниях от торца. Измерения как для „чистого“ торца оптоволокна, так и для торца с элементом производились с шагом 10 мкм от поверхности волокна либо от вершины микрооптического элемента.

Анализ данных осуществлялся с помощью программы обработки изображений ImageJ [12], позволяющей оценивать пространственное распределение яркости (в данном случае — интенсивности света) и обеспечивающей измерение и распределение интенсивности света, падающего на ПЗС-матрицу. На рис. 2 представлены данные, позволяющие визуально оценить эффективность преобразования структуры светового поля микрооптическим элементом: *a* — распределение излучения на выходе микрооптического элемента; *b* — распределение излучения на выходе из торца волокна; *в*, *г* — распределение интенсивности света ($I(r)$) при выходе из оптоволокна и при выходе из микрооптического элемента соответственно.

Серия измерений наглядно показывает, что в элементе происходит перераспределение светового поля с фокусировкой всей энергии в фокальном пятне: на выходе микрооптического элемента сфокусированное излучение имеет большую яркость, чем при использовании волокна

без элемента. По мере удаления от элемента наблюдается расфокусировка пучка. Таким образом, полученный полимерный микрооптический элемент является микролинзой/фоконом, что позволяет существенно снизить потери при стыковке волокон.

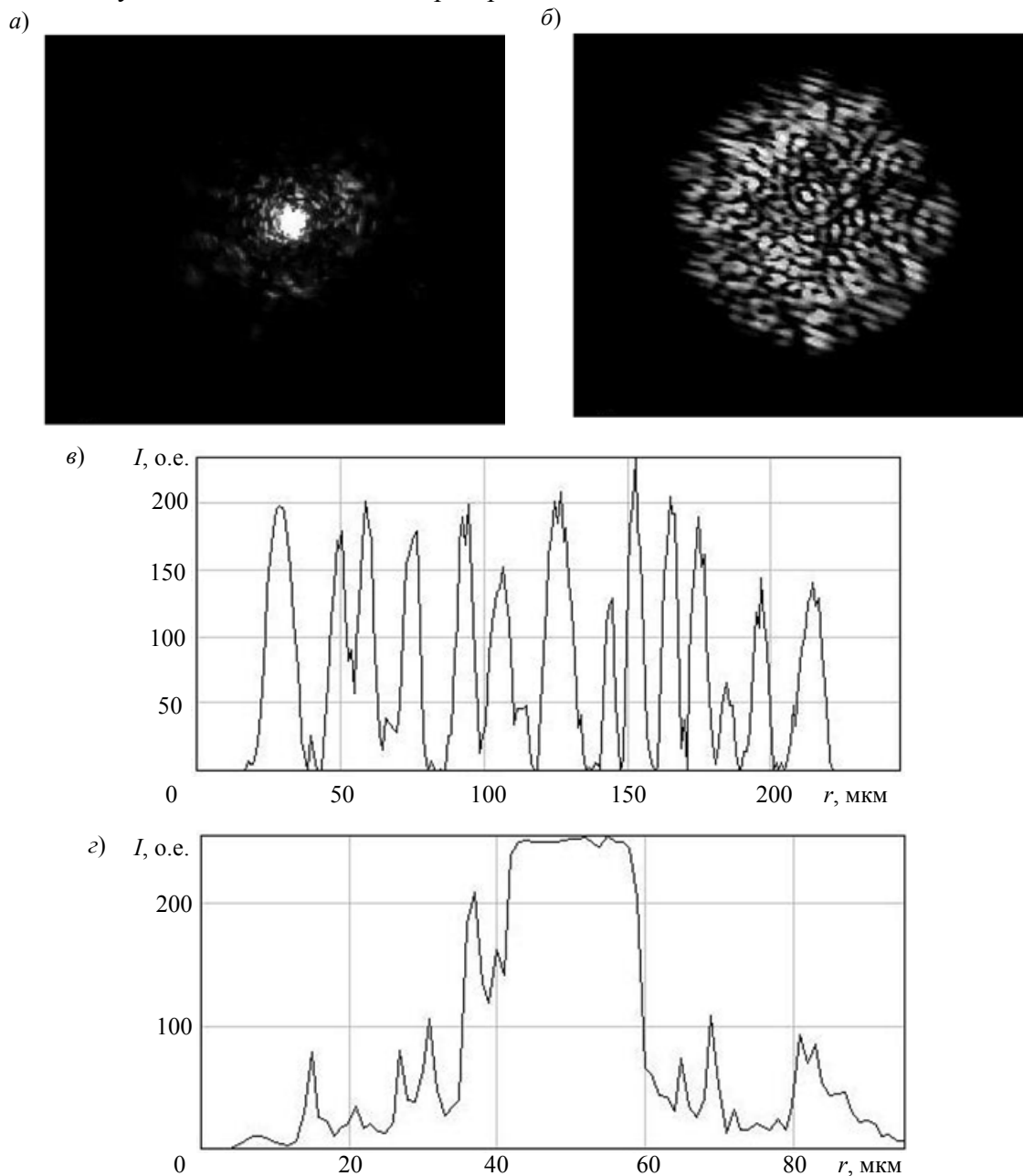


Рис. 2

В ходе ряда экспериментов были получены микрооптические элементы различной длины (экспозиция 30 с — длина 190 мкм, экспозиция 5 с — длина 170 мкм, экспозиция 4 с — длина 130 мкм, экспозиция 3 с — длина 70 мкм). Стоит заметить, что не все элементы получаются одинакового качества и обладают такой высокой эффективностью, как представленный выше. Эти данные не позволяют сделать однозначный вывод о связи эффективности микрооптического элемента и его длины, так как длина элемента, обладающего одними из лучших характеристик (см. рис. 2), составляет 220 мкм, тогда как длина лучшего образца во второй серии экспериментов составляет 130 мкм, а худшего — 190 мкм. С другой стороны, можно утверждать, что элементы достаточно большой длины (порядка 450 мкм) являются все же малоэффективными, хотя и обладают фокусирующим действием.

Не всегда в ходе эксперимента удается получить элемент симметричного профиля, возможно образование деформированных элементов. Однако, как показывают исследования, несмотря на асимметрию, такие образцы также достаточно эффективны и могут быть использованы. Причина подобной „деформации“ профиля элементов пока остается неясной.

Большинство микрооптических элементов, полученных в ходе эксперимента, имеют достаточно короткое фокусное расстояние, а фокальная плоскость расположена около вершины самого полимерного образования или на расстоянии 10—20 мкм от его поверхности, однако возможно получение образцов с бóльшим фокусным расстоянием.

Для подтверждения волноводной структуры микрооптических элементов и выяснения источника потерь был проведен эксперимент, в ходе которого в волокно с элементом на конце вводилось лазерное излучение, после чего элемент был сфотографирован в темноте (рис. 3).

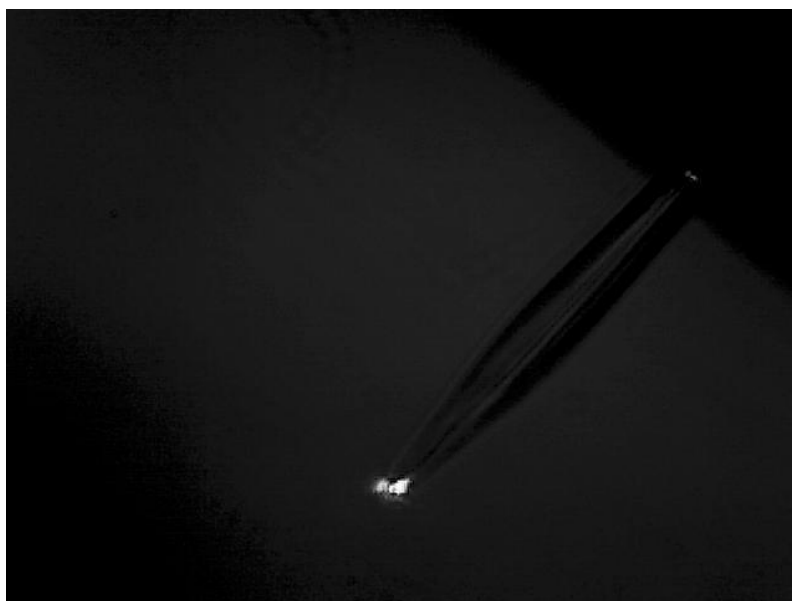


Рис. 3

Результаты эксперимента показывают, что в цилиндрической части элемента потери практически отсутствуют, рассеяние и поглощение в полимере невелико и может быть сведено к минимуму путем подбора соответствующей мономерной композиции. Это также свидетельствует о том, что сформированный оптический элемент действительно является волноводом с концевой микролинзой. „Избыточное“ свечение наблюдается в месте соединения волокна и микрооптического элемента, что может быть объяснено потерями на отражение на границе раздела сред кварц—полимер, так как их показатели преломления различны (кварц — 1,46, полимер — 1,52), а также тем, что диаметр элемента меньше диаметра световедущей жилы.

Исследования фокусирующих способностей полученных микроструктур показали, что данная технология позволяет формировать полимерные короткофокусные микрооптические элементы, которые могут быть успешно использованы для сопряжения многомодовых волокон с одномодовыми.

Статья подготовлена по результатам работ, выполненных при поддержке Рособразования, проект РПН 2.1.1.3937.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейко В. П., Березин Ю. Д., Чуйко В. А., Кромин А. К. Лазерные технологии формирования волоконно-оптических инструментов // Изв. РАН. Сер. физическая. 1997. Т. 61, № 8. С. 1627—1631.

2. Вейко В. П., Петров А. А. Применение волоконных микролинз для повышения оптических межсоединений // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2004. № 20. С. 68—84.
3. Yang Y., Lee J., Reichard K., Ruffin P., Liang F. Fabrication and implementation of a multi-to-single mode converter based on a tapered multimode fiber // Optic Communications. 2005. N 249. P. 129—137.
4. Schiapelli A., Kumar R., Prasciolu M., Cojoc D., Cabrini S. Efficient fiber-to-waveguide coupling by a lens on the end of the optical fiber fabricated by focused ion beam milling // Microelectronic Engineering. 2004. N 73—74. P. 397—404.
5. Hocinea M., Barchelot R., Ecoffet C., Fressengeasa N., Royer P., Kugel G. End-of-fiber polymer tip: manufacturing and modeling // Synthetic Metals. 2002. N 127. P. 313—318.
6. Barchelot R., Ecoffet C., Deloie D., Royer P. Integration of micrometer-sized polymer elements at the end of optical fibers by free-radical photopolymerization // Appl. Opt. 2001. Vol. 40, N 32. P. 5860—5871.
7. Плеханов А. И., Шелковников В. В. Оптические волокна с концевыми фотополимерными микролинзами // Рос. нанотехнологии. 2006. Т. 1, № 1—2. С. 240—244.
8. Фокина М. И., Собеуцук Н. О., Денисюк И. Ю. Исследование процессов формирования полимерного микроэлемента на торце оптического волокна в условиях значительного ингибирующего влияния кислорода на процесс фотополимеризации // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 3. С. 69—75.
9. Fokina M. I. Optical surface making by UV-curing of monomeric compositions in near field of coherent light source // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2007. Vol. 468. P. 385—394.
10. Fokina M. I., Burunkova J. E., Denisuk I. Yu. Influence of photoactive additive on growth of polymer microelements on the top of optical fiber // Proc. SPIE. 2007. P. 6732—6740.
11. Fokina M. I., Kaporskiy L. N., Denisuk I. Yu. Nature of microelements self writing in fiber tips in UV-curable composites // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2008. Vol. 497. P. 236—240.
12. Электронный ресурс: <<http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html>>.

Сведения об авторах

Нина Олеговна Собеуцук

— Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантово-размерных систем; инженер; E-mail: daedraazura@gmail.com

Игорь Юрьевич Денисюк

— д-р физ.-мат. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантово-размерных систем; E-mail: denisiuk@mail.ifmo.ru

Мария Ивановна Фокина

— Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантово-размерных систем; науч. сотрудник; E-mail: mari2506@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
оптики квантово-размерных систем

Поступила в редакцию
07.07.11 г.

О. Ю. ПИКУЛЬ, Г. В. КУЛИКОВА, В. И. СТРОГАНОВ

ТРАНСФОРМАЦИЯ КОНОСКОПИЧЕСКИХ КАРТИН КРИСТАЛЛА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ

Исследуется процесс трансформации коноскопической картины оптического кристалла при изменении месторасположения кристаллической фазовой пластинки $\lambda/4$ в оптической системе наблюдения. Приведены результаты экспериментов, проведенных для оптически активного кристалла TeO_2 .

Ключевые слова: интерференция, коноскопическая картина, циркулярная поляризация, пластинка $\lambda/4$.

Исследование оптических свойств кристаллов с помощью интерференционного (коноскопического) метода представляет особый интерес в связи с возможностью получения дополнительной информации об их оптических параметрах и характеристиках [1, 2].

Коноскопическая картина, традиционно наблюдаемая в поляризационном микроскопе, формируется излучением, проходящим через кристалл, который помещен между линейными поляризатором и анализатором. Вместе с тем получить сильно сходящийся пучок лучей достаточно трудно, тогда как при анализе тонких кристаллических пластинок необходимы пучки с угловой апертурой порядка $100\text{--}120^\circ$. Если же угловая апертура составляет $20\text{--}30^\circ$, то в поле зрения наблюдается только часть картины, например одна интерференционная полоса. Кроме того, небольшой масштаб коноскопической картины, наблюдаемой в поляризационном микроскопе, малый размер кристаллов, а также узкое поле зрения, обусловленное небольшой угловой апертурой светового пучка, ограничивают возможности применения коноскопического метода.

Использование схемы наблюдения коноскопических картин в сильно расходящихся пучках [3] позволяет расширить функциональные возможности коноскопического метода (рис. 1). Излучение He—Ne-лазера 1, пропущенное через поляризатор 2 и рассеиватель 3, проходит через исследуемую кристаллическую пластинку 4 и на выходе анализатора 5 образует на экране 6 крупномасштабную коноскопическую картину. Такая схема наблюдения позволяет применять коноскопический метод при исследовании оптических свойств кристаллов, при этом можно изменять форму поляризации излучения и использовать циркулярно и эллиптически поляризованное излучение; кроме того, такая схема позволяет исследовать влияние углового распределения интенсивности световых пучков на коноскопическую картину; обеспечить возможность наблюдения двойных коноскопических картин; исследовать интерференционные явления в системе из нескольких оптических элементов, в том числе с оптическими кварцевыми линзами.

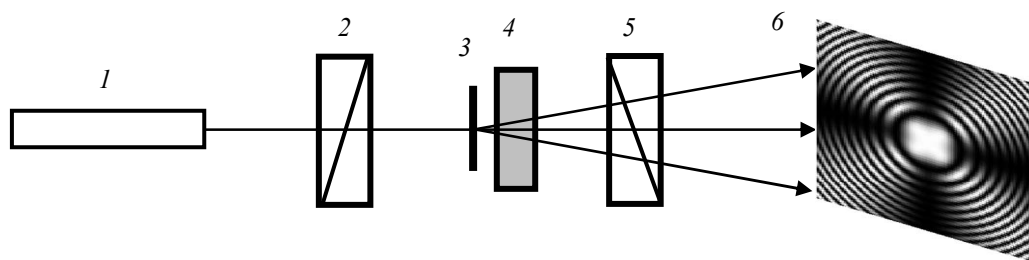


Рис. 1

Кристаллическая фазовая пластинка $\lambda/4$ достаточно часто применяется в поляризационных измерениях для получения циркулярного излучения. Использование такой пластинки при реализации коноскопического метода приводит к весьма необычным коноскопическим

картинам, что открывает новые возможности их практического применения в различных оптических устройствах: см. рис. 2—4, *а* — результаты эксперимента, *б* — соответствующие теоретически рассчитанные коноскопические картины.

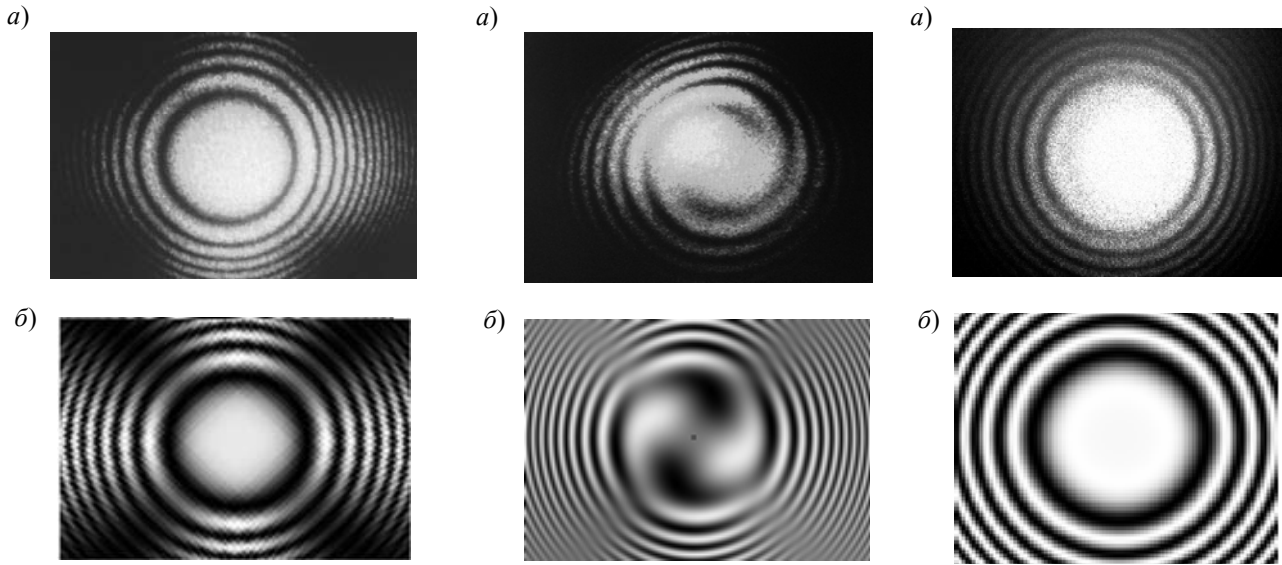


Рис. 2

Рис. 3

Рис. 4

При размещении в оптической схеме (см. рис. 1) пластинки $\lambda/4$ после поляризатора (наблюдение с циркулярным поляризатором) излучение становится циркулярно поляризованным, и коноскопическая картина оптически активного кристалла видоизменяется. При этом система колец-изохром (см. рис. 2) трансформируется в две спирали, вложенные одна в другую (см. рис. 3), а светлый „мальтийский крест“ наблюдается на периферии поля зрения. Направление закручивания спиралей от периферии к центру (правое или левое при взгляде навстречу лучу) соответствует направлению вращения светового вектора поляризации оптически активным кристаллом [4]. Кроме того, поворот пластинки $\lambda/4$ вокруг вертикальной оси в плоскости входной грани, приводящий к смещению изохром на коноскопической картине (от периферии к центру или наоборот), позволяет определить оптический знак кристалла без использования кварцевого клина [5].

Любопытным фактом является то, что перемещение фазовой пластинки $\lambda/4$ из положения, при котором она размещена после поляризатора, в положение между кристаллом и анализатором (наблюдение с циркулярным анализатором) не изменяет вида коноскопической картины (рис. 3), хотя через рассеиватель \mathcal{Z} на кристалл в этом случае падает линейно поляризованное излучение. Сохранение вида коноскопической картины объясняется тем, что она формируется в результате наложения двух коноскопических картин — кристалла (см. рис. 2) и пластинки $\lambda/4$ (в виде двух систем гипербол). Вследствие достаточно малой толщины пластинки $\lambda/4$ гиперболы находятся далеко за пределами центра картины вне поля зрения, а центральная часть коноскопической картины совпадает с рис. 3.

Рассмотренная схема наблюдения в основном применяется в сингулярной оптике, когда анализатор циркулярной поляризации, помещенный после кристалла, используется для создания оптических вихрей и управления их геометрическим положением, а также величиной и знаком топологического заряда [6].

При размещении двух фазовых пластинок $\lambda/4$ — до и после кристалла — „мальтийский крест“ перестает затенять коноскопическую картину и полностью исчезает, оставляя хорошо различимую систему колец-изохром, что позволяет контролировать наличие оптических дефектов (рис. 4). Еще раз отметим, что все три коноскопические картины (см. рис. 2—4) наблюдаются при использовании одной и той же кристаллической пластинки.

Расчеты, выполненные с применением программы компьютерной математики Maple, достаточно хорошо согласуются с экспериментом.

Вид коноскопических картин кристаллов с оптической осью в плоскости входной грани практически нечувствителен к любым перемещениям пластинки $\lambda/4$ в оптической системе. Картины сохраняют вид двух систем гипербол, осью симметрии одной из которых является оптическая ось кристалла. При этом происходит некоторое смещение гипербол относительно центра картины и изменение их интенсивности.

Система наблюдения коноскопических картин в случае использования слаборасходящего широкоапертурного пучка (рис. 5) позволяет получить нетрадиционные коноскопические картины — параллельные полосы, кольца, эллипсы [7]. Излучение He—Ne-лазера 1, пропущенное через рассеиватель 2 и диафрагму 3, проходя через поляризатор 4 и положительную линзу 6, попадает на кристалл 8. Линза 6 расположена таким образом, что диафрагма 3 находится в ее фокусе и при необходимости линзу можно перемещать. Коноскопическая картина, локализованная в плоскости кристалла 8, при помощи линзы 7 через анализатор 5 проецируется на экран 9. При увеличении угла 2θ коноскопическая картина плавно трансформируется в две системы гипербол.

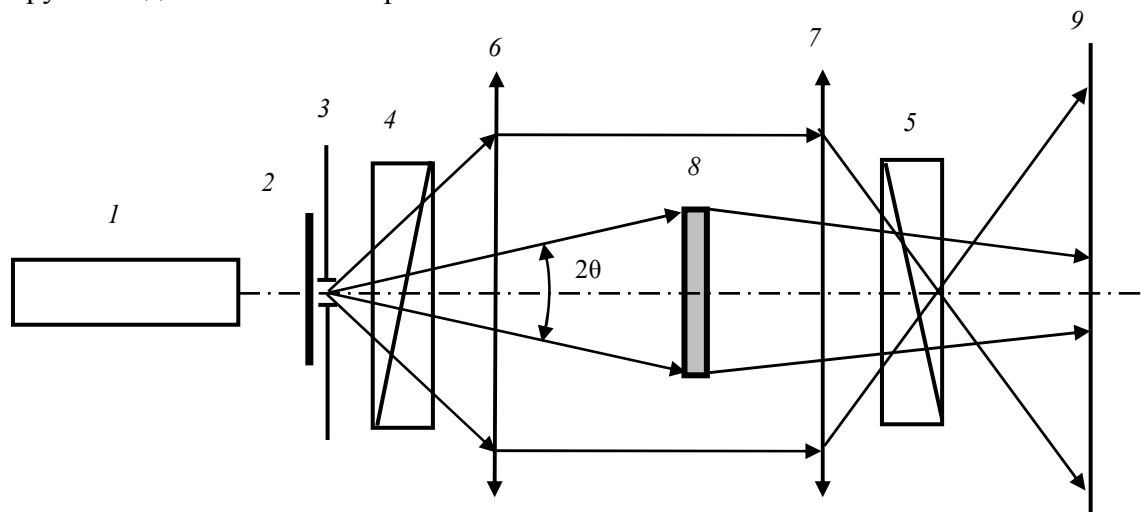


Рис. 5

Пучок лучей в этой оптической системе должен иметь такие поперечные размеры, чтобы каждая точка поверхности кристалла была освещена лучами, идущими в заданных направлениях. Тогда каждая точка изображения на экране будет соответствовать определенной точке на поверхности входной грани кристалла. Использование широкоапертурных слаборасходящихся пучков позволяет обнаружить оптические неоднородности кристалла, как приобретенные в процессе его роста, так и предварительно наведенные. При использовании двух и более близко расположенных оптических кристаллов возможна интерференция коноскопических картин.

Таким образом, варьирование схем наблюдения коноскопических картин оптических кристаллов позволяет увеличить объем информации, получаемой в ходе одного эксперимента, а также расширить ряд проводимых коноскопическим методом исследований оптически активных кристаллов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меланхолин Н. М. Методы исследования оптических свойств кристаллов. М.: Наука, 1970.
2. Константинова А. Ф., Гречушников Б. И., Бокуть Б. В., Валяшко Е. Г. Оптические свойства кристаллов. Минск: Наука и техника, 1995.

3. Особенности оптической системы для создания коноскопических фигур больших размеров / О. Ю. Пикуль, Л. В. Алексеева, И. В. Повх, В. И. Строганов, К. А. Рудой, Е. В. Толстов, В. В. Криштоп // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47, № 12. С. 53—55.
4. Пат. 2288460 РФ, МПК7 G01N 21/21. Способ определения знака вращения плоскости поляризации излучения в оптически активном кристалле / О. Ю. Пикуль, В. И. Строганов // Оpubл. 27.11.06. Бюл. № 33. 13 с.
5. Пат. 2319942 РФ, МПК⁷ G01M 11/02, G02B 26/06. Устройство для определения оптического знака кристалла / О. Ю. Пикуль // Оpubл. 20.03.08. Бюл. № 8. 16 с.
6. Воляр А. В., Фадеева Т. А., Егоров Ю. А. Векторные сингулярности гауссовых пучков в одноосных кристаллах: генерация оптических вихрей // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28, вып. 22. С. 70—77.
7. Карпец Ю. М., Строганов В. И., Сюй А. В. Коноскопические фигуры нового вида // Нелинейная оптика: Сб. науч. тр. / Под ред. В. И. Строганова. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2000. С. 57—60.

Сведения об авторах

- Ольга Юрьевна Пикуль** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Дальневосточный государственный университет путей сообщения, кафедра физики, Хабаровск;
E-mail: pikoul2008@gmail.com
- Генриетта Владимировна Куликова** — аспирант; Дальневосточный государственный университет путей сообщения, кафедра физики, Хабаровск;
E-mail: kulikova_genriet@mail.ru
- Владимир Иванович Строганов** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Дальневосточный государственный университет путей сообщения, кафедра физики, Хабаровск;
E-mail: garmonica@festu.khv.ru

Рекомендована кафедрой
физики

Поступила в редакцию
01.03.11 г.

УДК 53.083.92

Ю. А. БАЛОШИН, М. Г. РЫЖОВ, П. Н. СИЛИН, А. А. СОРОКИН, М. А. УСТИНСКОВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЛИЖНЕПОЛЬНОГО ВЧ-ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ПОВЕРХНОСТНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЛИЭТИЛЕНОВОГО ПОКРЫТИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Рассматривается метод оценивания изменений относительной поверхностной активности полиэтилена после его термической обработки. Метод базируется на использовании разработанного датчика и автономного индикатора для определения относительного изменения диэлектрической проницаемости поверхностного слоя.

Ключевые слова: активность, диэлектрическая проницаемость, электромагнитное поле, антенна, датчик, индикатор.

При прокладке трубопроводов используются трубы с заводским покрытием из полиэтилена. Для защиты сварных швов, образующихся при укладке магистральной трубы, требуется соответствующее покрытие. При этом необходима стыковка заводского полиэтиленового покрытия с защитным покрытием сварного шва. Полиэтилен обладает чрезвычайно низкой поверхностной активностью, что создает трудности при стыковке его с любыми другими материалами. Поэтому для обеспечения герметичной изоляции сварного шва используются различные методы увеличения поверхностной активности полиэтилена (термические, химические, радиационные и т.д.). При этом происходит частичная деструкция поверхности полиэтилена, что позволяет добиться повышения адгезии (сцепления) с наносимым на него материалом.

Наиболее технологичным и безопасным методом увеличения поверхностной активности полиэтилена является термическая обработка (например, пламенем газовой горелки). Однако при этом требуется контролировать изменение поверхностной активности полиэтилена, так как при термическом воздействии активность нелинейно изменяется в зависимости от температуры и времени обработки. При недостаточном или, наоборот, слишком большом воздействии степень активности, обеспечивающая хорошую адгезию, не достигается. Показателем оптимальности термической обработки может служить изменение диэлектрической проницаемости поверхности полиэтилена. Для оценки степени изменения диэлектрической проницаемости предлагается метод ближнепольного высокочастотного (ВЧ) зондирования, который был апробирован авторами при исследовании функциональной активности биологических тканей [1]. В основе метода лежит регистрация отклика резонансной системы, с включенной в нее малой антенной, на возмущение квазистационарного (ближнего) поля этой антенны. Возмущение обуславливается локальными изменениями (неоднородностями) диэлектрической проницаемости исследуемой поверхности биообъекта [1] или, как в настоящей статье, исследуемой поверхности полиэтилена. Отношение размера вибратора антенны к длине волны составляет менее 0,0001. Антенна является частью резонансной системы генератора датчика. При расположении датчика на поверхности полиэтилена квазистационарное поле антенны взаимодействует с его поверхностным импедансом. Следствием этого взаимодействия является изменение частоты генерируемых колебаний [2]. При этом обеспечивается высокая чувствительность к изменению диэлектрической проницаемости термически обработанной поверхности полиэтилена [3, 4].

В целях проверки возможности оценивания степени поверхностной активности покрытия были проведены эксперименты с четырьмя видами полиэтилена. Исследовались образцы покрытия, применяемого для защиты металлических труб от воздействий окружающей среды. Для оценки степени активности был использован датчик, в котором размер вибратора антенны составлял 25 мм, а частота генератора 4 МГц. Участки каждого из образцов полиэтилена подвергались обработке пламенем газовой горелки с разной интенсивностью в смежных точках.

Исследование образцов осуществлялось с помощью стенда, содержащего первичный датчик, блок преобразования и сопряжения с компьютером, компьютер с программным обеспечением для обработки результатов экспериментов. Измерения производились при позиционировании датчика в трех точках поверхности, подлежащей термической обработке. В ходе эксперимента были произведены три серии замеров. Для снижения влияния неточностей позиционирования датчика из-за неровности поверхности результаты измерений, полученные в трех сериях замеров, были усреднены. Относительная чувствительность датчика была в пределах 0,0001. В качестве опорного значения степени поверхностной активности (α) при измерениях было принято значение, соответствующее этому показателю для участка, не обработанного пламенем горелки. Для наглядности в качестве примера на рис. 1 показаны относительные средние значения отклонений от опорного значения для образца полиэтилена на металле. Длительность обработки поверхности в точке 2 превышала время обработки в точках 1 и 3.

При проведении экспериментов по оценке степени активности поверхностного слоя покрытия на металлической трубе было выяснено следующее:

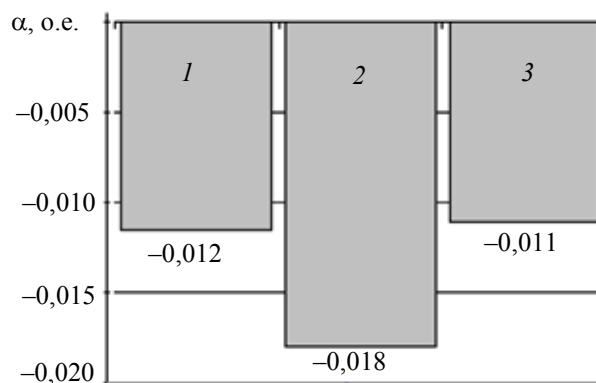


Рис. 1

1) уровень информационного сигнала значительно уменьшается из-за влияния металла на поле сенсора датчика;

2) вследствие малого уровня сигнала существенное значение приобретают флуктуации сигнала датчика, вызванные нестабильностью его позиционирования в определенной точке; это связано с начальной неровностью поверхности и с динамикой пальцев руки оператора и ее перемещением в пространстве.

Для устранения или нивелирования последствий, отмеченных в п. 2, сенсорная часть датчика была помещена с натягом в отверстие постоянного магнита. Использование магнита позволяет жестко позиционировать датчик (помещенный оператором в требуемой точке) на стальной трубе и одновременно обеспечивает защиту сенсора датчика от внешних возмущающих полей. Положение датчика с магнитной насадкой на фрагменте трубы с полиэтиленовым покрытием иллюстрируется рис. 2.

Для приближения эксперимента к реальным условиям работы оператора был создан автономный индикатор степени поверхностной активности с микропроцессором (рис. 3).



Рис. 2



Рис. 3

При апробации автономного индикатора оценивалась степень активности участков поверхности на фрагменте стальной трубы. Для этой цели покрытие было обработано пламенем газовой горелки, так что на некотором участке обеспечивалось изменение степени активности

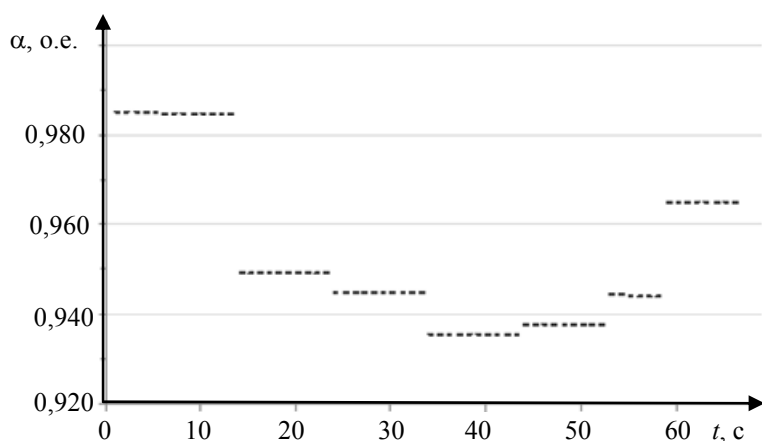


Рис. 4

поверхностного слоя. Далее, чувствительный датчик последовательно, начиная с точки размещения его на участке, не обработанном пламенем горелки, устанавливался на 5—9 с в оцениваемых точках обработанной поверхности полимера. Результаты оценки, в относительных единицах, в реальном времени фиксировались автономным индикатором и отображались на его жидкокристаллическом экране в виде горизонтальных черточек-ступенек (рис. 4).

Значение 1,0 по оси ординат соответствует сигналу датчика в точке привязки. Положение каждой ступеньки показывает различие степени активности поверхностного слоя покрытия в оцениваемых точках. Как следует из графиков, оценка после округления осуществляет-

ся на уровне третьего знака после запятой, что подтверждает высокую чувствительность автономного индикатора. По оси абсцисс отмечена длительность фиксации сигнала.

Результаты экспериментов показывают, что измерения уровня активности индикатором, отнесенные к измерениям для необработанных участков исследуемых образцов полиэтилена, имеют выраженную устойчивость, свою для каждого образца.

Важным следствием проведенных экспериментов является вывод о существенном снижении влияния внешних возмущений на результат оценивания благодаря применению магнитной насадки-экрана на датчике.

Перед применением индикатора по назначению для каждого вида полиэтилена специалистами заранее определяется доверительный интервал реакции индикатора, соответствующий достижению необходимой степени адгезии соединяемых защитных покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балашин Ю. А., Сорокин А. А., Арсеньев А. В., Дудин М. Г., Волченко А. Н. Метод диагностики функциональной активности тканей и органов биообъектов и устройство для его реализации // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 3. С. 37—43.
2. Stuchly S. S., Sibbald C. L., Anderson J. M. A new aperture admittance model for open-ended waveguides // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1994. Vol. 42. P. 192—198.
3. Sensing volume of open-ended coaxial probes for dielectric characterization of breast tissue at microwave frequencies / D. M. Hagl, D. Popovic, S. C. Hagness et al. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2003. Vol. 51. P. 1194—1206.
4. Миниатюрная высокотемпературная сверхпроводящая антенна СВЧ-диапазона / А. Ю. Климов, З. Ф. Красильник, А. Н. Резник и др. // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. 1993. Т. 6, № 11—12. С. 2150—2159.

Сведения об авторах

- Юрий Александрович Балашин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики; E-mail: baloshin1940@mail.ru
- Михаил Георгиевич Рыжов** — канд. техн. наук; ФГУП Российский научный центр „Прикладная химия“, Санкт-Петербург; ст. науч. сотрудник
- Павел Николаевич Силин** — канд. техн. наук; ЗАО „БИУРС“, Санкт-Петербург; директор по науке
- Анатолий Александрович Сорокин** — канд. техн. наук, доцент; Балтийский государственный технический университет „Военмех“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра радиоэлектронных систем управления, Санкт-Петербург; E-mail: an_sog@mail.ru
- Михаил Аркадьевич Устинков** — аспирант; Балтийский государственный технический университет „Военмех“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра радиоэлектронных систем управления, Санкт-Петербург; E-mail: ustinkov@mail.ru

Рекомендована кафедрой
физики СПб НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
25.04.11 г.

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 536.2

Д. С. ГРОМОВ, А. В. ШАРКОВ

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ НА БАЗЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

Представлены результаты исследований тепловых режимов гироскопических приборов на базе волоконно-оптических гироскопов с использованием современного программного обеспечения. Приведены рекомендации по оптимизации конструкций приборов и дальнейшим исследованиям в данном направлении.

Ключевые слова: гироскоп, тепловые режимы, метод конечных элементов.

Введение. Гироскопические приборы активно применяются во многих областях современной техники. Навигация, особенно высокоточная, — одна из тех сфер, в которых обойтись без гироскопов в настоящее время невозможно. Гироскопические приборы различаются по типу используемых чувствительных элементов, физическим принципам работы и соответственно по точности показаний и областям применения. Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ), принцип действия которого основан на эффекте Саньяка, — один из наиболее активно развивающихся и перспективных типов гироскопов. Ожидается, что бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) на базе ВОГ в самое ближайшее время будут способны заменить более сложные и дорогие приборы в области среднеточной навигации в диапазоне 10^{-2} — 10^{-3} °/ч [1]. Для достижения данной точности требуется обеспечить стабильность температуры по волоконному контуру на уровне 0,01 К, что является сложной задачей [2, 3]. Расчет температурных состояний приборов с таким уровнем точности поддержания температуры также не является тривиальным.

В настоящей статье описаны результаты первого этапа исследований в данном направлении, задачей которых являлся расчет температурного состояния приборов в целом и определение перепадов температур в различных точках наиболее значимых элементов конструкций с точностью, не превышающей 0,1 К. В настоящее время подобные задачи принято решать на этапе проектирования в основном с использованием метода тепловых балансов или с помощью математического (компьютерного) моделирования [4, 5]. В связи с необходимостью учета всех особенностей и сложности конструкции приборов, теплообмена как теплопроводностью и конвекцией, так и излучением вышеперечисленные методы не кажутся оптимальными и не дают полного представления о тепловом режиме приборов. Рассматриваемый в настоящей статье метод конечных элементов, реализуемый с помощью современного программного обеспечения для тепловых и гидро- и газодинамических расчетов — CFDesign, обладает рядом преимуществ, в числе которых:

— возможность рассчитывать процессы теплообмена теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением;

- наглядная визуализация результатов вычислений для различных поверхностей и любых точек прибора;
- возможность расчета различных теплофизических процессов, в том числе с учетом вращения элементов в приборе;
- возможность быстрого сравнения результатов и оценивания степени влияния внесенных в модель изменений на процессы теплообмена.

Исследования, результаты которых представлены в данной статье, направлены на

- создание тепловых моделей БИНС на основе ВОГ;
- оценку динамики изменения во времени температуры на поверхностях ВОГ при переменных внешних воздействиях;
- разработку рекомендаций по оптимизации тепловых режимов БИНС.

Постановка задачи. Геометрические модели. Для расчета температурного состояния приборов были построены геометрические модели двух модификаций БИНС: бесплатформенного инерциального модуля (БИМ) и вращающегося инерциального модуля (ВИМ). Геометрические модели приборов были выполнены с помощью программы CAD Pro/Engineer. В соответствии с известными методиками из моделей исключены элементы крепежа, отверстия, фаски и прочие элементы, усложняющие генерацию сетки для конечно-элементного анализа и не оказывающие существенного влияния на тепловой режим приборов.

Наиболее значимыми со всех точек зрения элементами приборов являются волоконно-оптические генераторы интерферометрического типа (далее — ВОГ или интерферометры). На рис. 1 и 2 соответственно представлены упрощенные геометрические модели бесплатформенного и вращающегося инерциальных модулей. В первом случае интерферометры 1 закреплены на неподвижном основании (см. рис. 1), а во втором (рис. 2) — расположены на платформе, вращающейся с постоянной угловой скоростью. Именно определение распределения температур по поверхностям интерферометров являлось главной задачей исследований. Помимо ВОГ, в обоих БИНС основными тепловыделяющими элементами, влияющими на тепловой режим приборов в целом и распределение температур по интерферометрам в частности, являются акселерометры (поз. 2 на рис. 1; на рис. 2 расположены под платформой с интерферометрами) и платы электроники (на рис. 1 расположены в центре конструкции; на рис. 2 — поз. 3, 4). От окружающей среды внутренние элементы приборов отделены металлическими кожухами (на рис. 1 показан его фрагмент; на рис. 2 не показан).

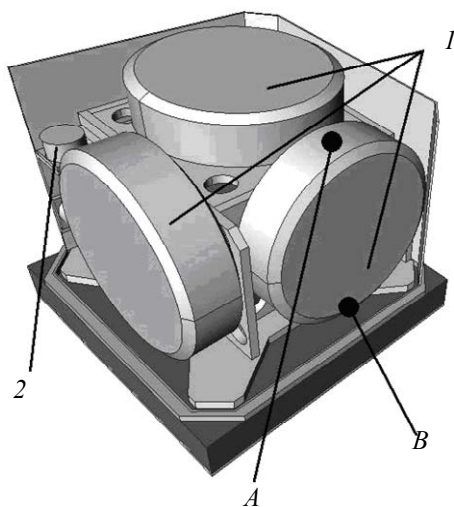


Рис. 1

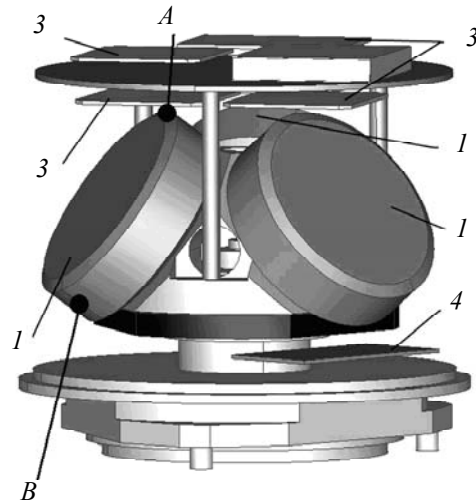


Рис. 2

Среди выбранных для расчета режимов работы наиболее значимым и сложным для анализа представляется режим, при котором БИНС прогревается от начальной температуры 15 °С до стационарного состояния, а далее функционирует при циклически изменяющейся

температуре окружающей среды. Кроме того, необходимо учесть, что основная часть ВИМ, включающая в себя массивное основание с закрепленными на нем акселерометрами, интерферометрами, платами и другими элементами, вращается вокруг вертикальной оси прибора с угловой скоростью $3^\circ/\text{с}$.

Для определения градиентов температур по волоконному контуру интерферометра предлагается использовать метод поэтапного моделирования. На первом этапе в первом приближении определяются распределения температур по внешним поверхностям интерферометров. Эти значения в дальнейшем используются как исходные данные для более детального расчета теплового режима интерферометра с последующим определением градиентов по оптическому волокну, навитому на катушку, которая расположена в интерферометре и занимает (вместе с волоконно-оптическим контуром) большую его часть. В ходе исследований было необходимо в результате расчета получить распределения температур по поверхностям интерферометров, а также построить графики изменения температуры в их верхних A и нижних B точках (см. рис. 1, 2) в зависимости от времени.

Тепловая модель. БИМ и ВИМ представляют собой системы тел (в тепловой модели каждого из приборов учтены 3 интерферометра, 3 акселерометра, несколько плат питания и управления, источник излучения, массивные основания, несущие элементы конструкции, защитный тонкостенный кожух), взаимодействующих между собой за счет процессов теплопроводности, конвекции и теплового излучения. В бесплатформенном инерционном модуле содержится 12 тепловыделяющих элементов, а во вращающемся — 13. Мощности тепловыделений этих элементов являются единственными внутренними возмущающими воздействиями в моделях: суммарные тепловыделения постоянны во времени и составляют 29,5 Вт в БИМ и 34,5 Вт — в ВИМ. Основания, несущие элементы конструкции и защитные кожухи учтены как пассивные элементы. Единственное внешнее возмущающее воздействие — температура окружающей среды, циклически изменяющаяся в пределах от 15 до 35 $^\circ\text{C}$, другие возмущающие воздействия в моделях отсутствуют [6].

На первом этапе расчетов интерферометры рассматриваются однородными элементами, тепловыделяющими равномерно по всему объему. При этом для большего соответствия модели реальному прибору отдельно были определены эффективные (усредненные) теплоемкость, теплопроводность и плотность материала интерферометров. Акселерометры считаются объемными, а печатные платы поверхностными источниками мощности, которые включаются мгновенно. Контакты между твердыми телами считаются идеальными, поэтому учет контактных тепловых сопротивлений можно пренебречь.

Теплообмен теплопроводностью, конвекцией и излучением во внутреннем объеме прибора рассчитывался непосредственно в программе. Конвективно-лучистый теплообмен во внешнюю среду задан граничным условием на соответствующих поверхностях. Коэффициент теплоотдачи в окружающую среду рассчитывался с помощью критериальных уравнений и известных законов теплообмена. Необходимые значения теплопроводности, удельной теплоемкости и коэффициентов черноты поверхностей элементов конструкции приборов найдены в соответствующих литературных источниках. Были рассмотрены несколько вариантов задания граничного условия на нижней (установочной) поверхности приборов. Оптимальным для реализации оказалось задание граничного условия 1-го рода (температура на поверхности).

Результаты расчетов. Расчет производился методом конечных элементов с использованием программного обеспечения CFDesign, позволяющего строить графики зависимостей температуры от времени в любой точке прибора и анализировать температурные поля для любых поверхностей и сечений [7]. Объем графической информации, отражающей основные результаты расчетов, слишком велик для размещения в рамках данной статьи. Поэтому здесь представлены некоторые наиболее значимые из результатов. Так, на рис. 3 приведен график

изменения во времени разности температур ΔT в верхней A и нижней B точках интерферометра БИМ (см. рис. 1) при изменяющейся температуре окружающей среды T_{cp} .

Графики изменения во времени температуры в точках A и B (T_A , T_B) интерферометра ВИМ (см. рис. 2) при изменяющемся значении температуры окружающей среды T_{cp} и при вращении прибора со скоростью 3 °/с представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

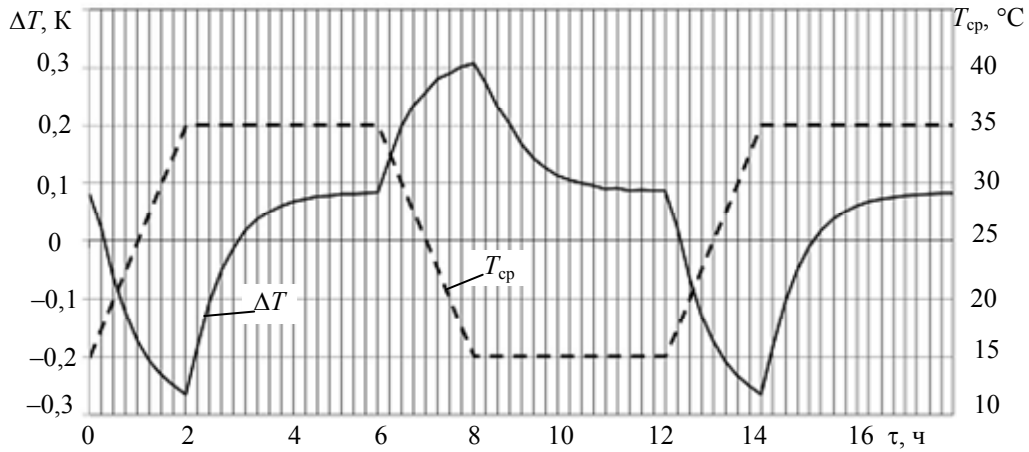


Рис. 3

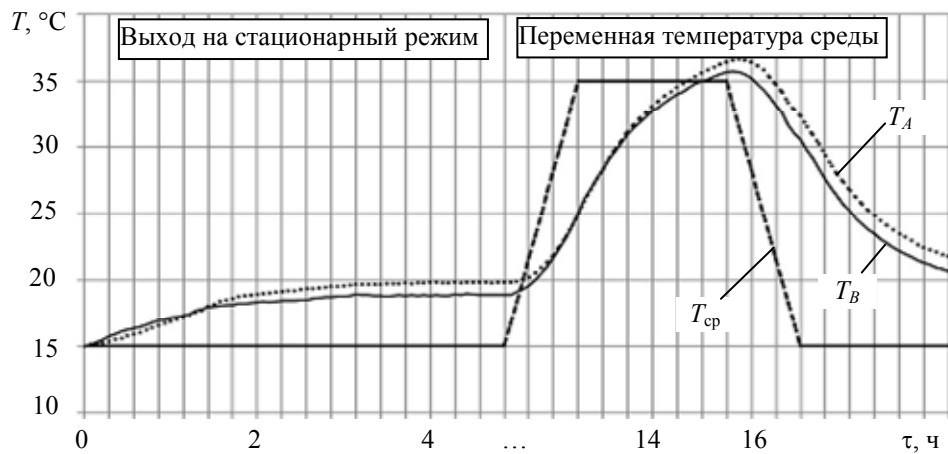


Рис. 4

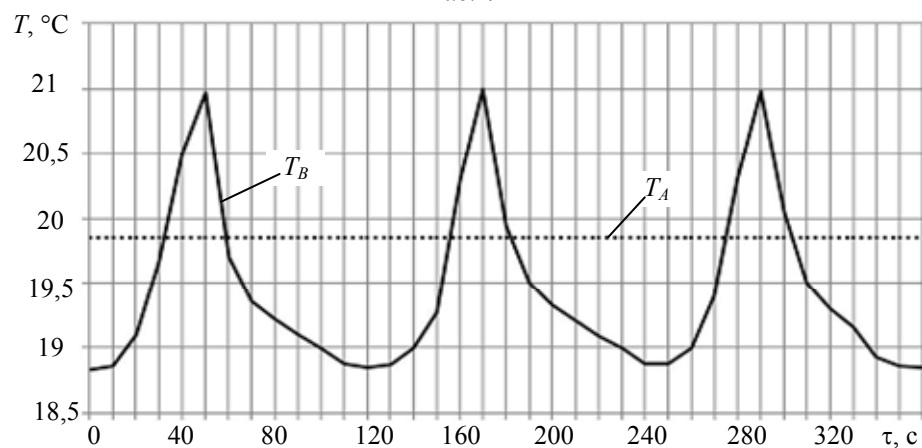


Рис. 5

Выводы и рекомендации. Анализ полученных в ходе исследований результатов позволяет сделать следующие выводы:

— наибольшее тепловое воздействие на волоконно-оптический гироскоп оказывают платы электроники и триады акселерометров;

— БИМ выходит на стационарный режим в течение 4 ч при $T_{cp} = \text{const}$, ВИМ — в течение 5 ч (см. рис. 3, 4);

— градиенты температур по поверхностям интерферометров в обоих приборах существенно зависят от изменения температуры окружающей среды; предложенные методы расчетов позволяют определять степень этой зависимости и принимать меры по ее уменьшению (см. рис. 3, 4).

— максимальные перепады температур по поверхностям интерферометров могут превышать 1 К, что негативно сказывается на распределении температур по волоконному контуру и требует принятия мер по их снижению (см. рис. 5).

— вращение основной части ВИМ не влияет существенно на тепловой режим прибора в целом, но при прохождении интерферометров над вычислителем (см. рис. 2, поз. 4) во время вращения основания значительны возмущения, вызванные изменением температуры (см. рис. 5).

По итогам анализа результатов был предложен ряд рекомендаций по изменению конструктивных параметров БИНС для улучшения их характеристик. В частности, было принято решение отделить интерферометры экранами и теплоизоляцией от остальных тепловыделяющих элементов, изменить расположение в системе нескольких плат электроники в целях уменьшения их теплового влияния на волоконно-оптические гироскопы и рассмотреть возможность теплоизоляции и термостатирования всего объема БИНС.

Заключение. В результате проведенных исследований проанализированы распределения температур в БИНС на основе ВОГ с неподвижным (БИМ) и вращающимся (ВИМ) основанием, определены перепады температур по поверхностям наиболее значимых элементов конструкций — интерферометров. В перспективе планируются дальнейшие исследования по данной тематике: усовершенствование тепловых моделей БИНС, подробный анализ тепловых режимов интерферометров, оценка эффективности новых способов снижения градиентов температур по поверхностям интерферометров и влияния возмущений, вызванных изменением температуры, на точность показаний гироскопического прибора в целом. Сравнительный анализ значений температур по поверхностям интерферометров БИМ, рассчитанных с помощью предложенных методов, и экспериментальных данных, полученных для отдельных частей и макетов приборов, показывает расхождение не более чем на 15 %. Это позволяет рассмотренные методы и тепловые модели использовать для расчетов и обеспечения тепловых режимов приборов и устройств, представляющих собой систему тел в внутренних источниках тепловыделений и находящихся в среде с изменяющейся температурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пешехонов В. Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. № 1(72). С. 3—16.
2. Филатов Ю. В. Волоконно-оптический гироскоп. СПб: Изд-во СПбГЭТУ, 2003. 52 с.
3. Джашитов В. Э., Панкратов В. М. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2005. 404 с.
4. Голиков А. В., Джашитов В. Э. Температурные погрешности волоконно-оптических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2001. № 2(33). С. 3—17.
5. Галактионов А. А. Косвенная термостабилизация гироскопов и гиросtabilизируемых платформ. Способы повышения точности // Там же. 2003. № 1(40). С. 5—12.
6. Кондратьев Г. М., Дульнев Г. Н., Платунов Е. С., Ярышев Н. А. Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении. СПб: СПбГУ ИТМО. 2003. 560 с.
7. CFDesign Customer Portal [Электронный ресурс]: <<http://www.cfdesign.com/support/customerportal>>.

Сведения об авторах

- Дмитрий Сергеевич Громов** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: dmitrygromov17@gmail.com
- Александр Васильевич Шарков** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: Sharkov@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
компьютерной теплофизики и
энергофизического мониторинга

Поступила в редакцию
17.02.12 г.

УДК 536.24: 66.096.5

В. П. Ходунков

КАЧЕСТВО ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ: ПУТЬ К ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Показана связь качества псевдооживления с характеристиками тепломассопереноса псевдооживленного слоя. Приведены результаты экспериментальных исследований и их анализ в целях практического использования для диагностики промышленных аппаратов.

Ключевые слова: качество псевдооживления, диагностика, коэффициент диффузии, эффективность перемешивания, частота тепловых колебаний.

Введение. Для технологических процессов, проводимых с использованием псевдооживленного (кипящего) слоя, определяющее значение имеет оптимальная организация движения дисперсного материала. Обобщенной характеристикой гидродинамических и тепломассообменных процессов в слое является качество псевдооживления.

В настоящее время известны несколько способов оценивания указанного параметра. Один из первых предложен в работе [1], где качество псевдооживления определяется по формуле

$$\xi = \beta \vartheta_{pv} / U_f, \quad (1)$$

где $\vartheta_{pv} = H_0 R / \tau$ — вертикальная скорость частиц слоя, м/с; H_0 — высота слоя при минимуме псевдооживления, м; τ — время прохождения частицами вертикального габарита слоя, с; R — степень расширения слоя; β — численная постоянная, определяемая экспериментально; U_f — скорость фильтрации газа через слой, м/с.

Другой способ [2] предусматривает определение качества псевдооживления по формуле

$$\xi = (1 - \varepsilon) \sqrt{f_0 f_t}, \quad (2)$$

где ε — порозность псевдооживленного слоя; f_0, f_t — частоты флуктуаций порозности и температуры слоя соответственно, Гц.

Оба способа в достаточной степени адекватны процессу, в то же время какие-либо жесткие связи введенного параметра ξ с основными характеристиками псевдооживленного слоя (коэффициентом перемешивания, эффективной теплопроводностью и др.) в них не установлены.

Параметр качества псевдооживления, в первую очередь, должен характеризовать интенсивность перемешивания твердой фазы в кипящем слое (КС). Поскольку в кипящем слое эффективная температуропроводность $a_{\text{эф}}$ и коэффициент перемешивания $D_{\text{см}}$ практически тождественны: $a_{\text{эф}} = D_{\text{см}}$ [3], установление связи параметра качества псевдооживления с данными характеристиками приобретает еще большую актуальность. Сложность решения задачи усугубляется отсутствием единого подхода к определению коэффициента перемешивания. Измеренные разными авторами значения $D_{\text{см}}$ для различных условий отличаются на 2—3 порядка и более. В теоретических же исследованиях величина $D_{\text{см}}$ связывается только с параметрами газовых пузырей слоя или предлагаются корреляции между критериальными числами, содержащими внутренние параметры самого кипящего слоя, но не аппарата.

Второе обстоятельство, влияющее на сложность решения задачи, заключается в том, что значения $D_{\text{см}}$ в крупномасштабных промышленных аппаратах значительно превышают значения $D_{\text{см}}$, измеренные в лабораторных установках малого диаметра. Это указывает на тесную связь интенсивности перемешивания с циркуляционными потоками твердой фазы. К сожалению, никому из исследователей, предлагавших различные корреляции для коэффициента $D_{\text{см}}$, не удалось корректно отразить влияние масштаба аппарата с кипящим слоем на величину $D_{\text{см}}$.

Цель исследования, описываемого в настоящей статье, — установление связи параметра качества псевдооживления ξ с эффективной температуропроводностью слоя $a_{\text{эф}}$, коэффициентом перемешивания $D_{\text{см}}$ и масштабами аппарата с КС, а также определение физической сущности и практической значимости введенного параметра качества псевдооживления.

Решение. Известно, что при обычной молекулярной диффузии в газе коэффициент диффузии равен $D_{\text{г}} = 1/3\vartheta l$, где ϑ — средняя скорость хаотического движения молекул, l — средняя длина свободного пробега молекул; при нормальных условиях $D_{\text{г}} = 10^{-5}$ м²/с.

Для потока, турбулизируемого движущимися массами твердой фазы, сохраняется структура выражения для эффективного коэффициента перемешивания, но абсолютное его значение на несколько порядков выше, чем в газе [3]:

$$D_{\text{см}} = a_{\text{эф}} = \varphi \vartheta_p L_{\text{ц}}, \quad (3)$$

где ϑ_p — средняя циркуляционная скорость масс твердой фазы, м/с; $L_{\text{ц}}$ — основной масштаб пульсаций (путь смещения — циркуляции), м; $\varphi \cong 0,1$ — численный коэффициент.

Для псевдооживленных систем основной масштаб пульсаций $L_{\text{ц}}$ определяется геометрическими размерами слоя — диаметром аппарата $2R$ и насыпной высотой слоя H_0 , а его предельное значение равно (рис. 1)

$$L_{\text{цmax}} = 2(H_0 N + 2R), \quad (4)$$

где N — количество циркуляционных контуров.

Средняя циркуляционная скорость ϑ_p масс твердой фазы определяется частотой f_0 гравитационных колебаний, габаритами слоя, структурными параметрами, технологическими и конструктивными особенностями аппарата. Поэтому теоретическое предсказание величины ϑ_p весьма затруднительно, да и не целесообразно ввиду некорректности любых применяемых моделей и упрощений, изначально имеющих высокую погрешность. Все известные рас-

четные соотношения для ϑ_p получены на основе обобщения экспериментальных данных. Так, в работах [3, 4] предложена следующая формула:

$$\vartheta_p \approx \varphi_1 f_0 H_0, \tag{5}$$

где $\varphi_1 = 0,816$.

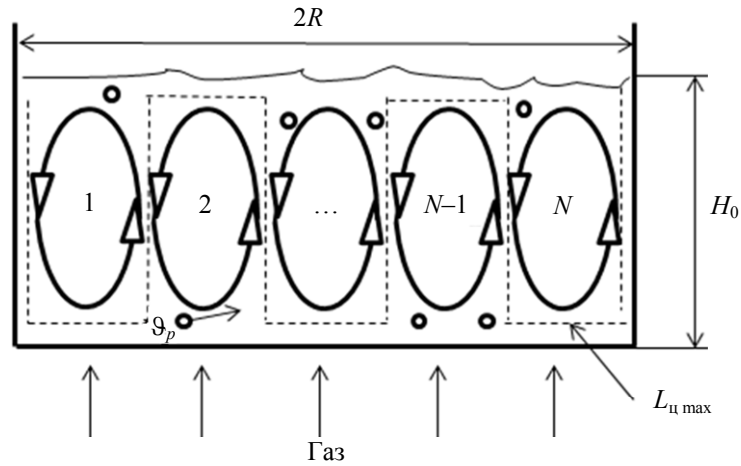


Рис. 1

Рассмотрим новое соотношение для $a_{эф}$, $D_{см}$. В результате многочисленных экспериментов, выполненных на установках различного масштаба (от 0,2 до 9 м), выявлено наличие низкочастотной составляющей в спектре флуктуаций температуры и теплового потока на границе раздела псевдооживленный слой — поверхность [5, 6]. Значения частоты f_t тепловых колебаний на порядок меньше значений частоты f_0 гравитационных колебаний слоя (рис. 2). Наличие низкочастотной составляющей f_t обусловлено неравномерностью температурного поля в объеме аппарата и процессом перемешивания материала. Как следует из экспериментальных данных, отношение частот стремится к значению $2(H_0 N + 2R) / H_0$. Характер изменения величин f_0 , f_t и зависимость частоты f_0 от масштаба аппарата хорошо описываются известной формулой [3]

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{g / H_0}, \tag{6}$$

где g — ускорение свободного падения.

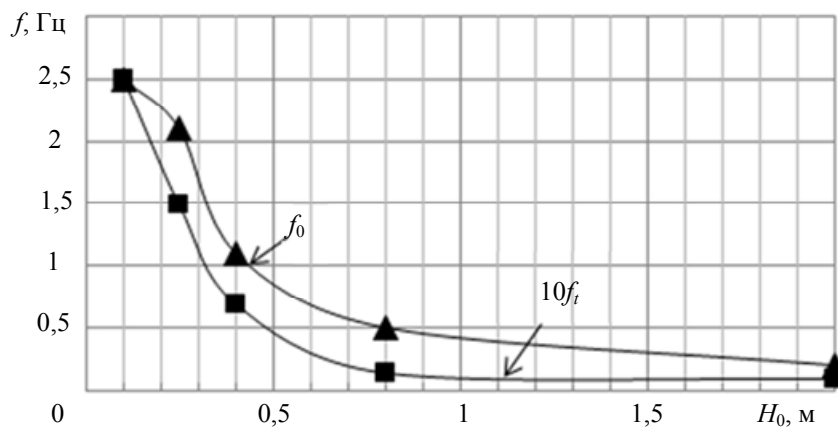


Рис. 2

Масштаб пульсаций $L_{ц}$ может быть выражен через указанную выше частоту f_t тепловых колебаний слоя:

$$L_{ц} = \mathfrak{D}_p / f_t. \quad (7)$$

Здесь следует особо отметить, что тепловые флуктуации (температуры, теплового потока) в каждом конкретном аппарате происходят в широком спектре частот в диапазоне 10^{-3} —10 Гц в зависимости от размеров слоя [5]. Из выражений (3), (5) и (7) следует

$$D_{см} = a_{эф} = \varphi \varphi_1^2 H_0^2 f_0^2 / f_t. \quad (8)$$

С другой стороны, коэффициент перемешивания можно выразить через эффективное сечение переноса $S_{эф} = L_{ц}^2$, тогда

$$D_{см} = a_{эф} = S_{эф} f_t = L_{ц}^2 f_t. \quad (9)$$

Используя формулы (8), (9), получаем следующие соотношения:

$$S_{эф} = \varphi \varphi_1^2 H_0^2 \frac{f_0^2}{f_t^2} \Rightarrow L_{ц} = \varphi_1 \sqrt{\varphi} \cdot H_0 \frac{f_0}{f_t}.$$

Входящее в данные выражения отношение f_0 / f_t назовем параметром качества псевдооживления ξ .

Физическая сущность введенного здесь параметра: „*качество псевдооживления характеризует площадь эффективного сечения, в котором происходит активное перемешивание твердой фазы, при этом чем выше значение параметра качества, тем бóльшая часть слоя в технологическом аппарате находится в интенсивном гидродинамическом и тепловом режимах*“.

В случае идеального перемешивания $L_{ц} = L_{ц\max}$, тогда с учетом выражения (4) получаем

$$\frac{L_{ц}}{L_{ц\max}} = \varphi_1 \sqrt{\varphi} \cdot \frac{H_0}{2(H_0 + 2R)} \frac{f_0}{f_t} = \eta,$$

где η — новый вводимый термин — эффективность перемешивания.

С учетом известных значений $\varphi_1 = 0,816$, $\varphi = 0,1$ получаем расчетную формулу:

$$\eta = 0,129 \frac{H_0}{H_0 + 2R} \xi.$$

По величине η можно судить о том, какая часть (доля объема) слоя участвует в активном перемешивании, что в дальнейшем важно для диагностики аппаратов с кипящим слоем.

Экспериментально-диагностические исследования. С использованием методик и средств измерения, разработанных в исследовательской лаборатории кафедры теплофизики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики [6—8], был проведен сравнительный анализ характеристик различных лабораторных установок и промышленных аппаратов. Полученные результаты представлены в таблице, где \bar{f}_0 , \bar{f}_t — усредненные значения измеренных частот.

Тип аппарата, место установки	$2R$, м	H_0 , м	\bar{f}_0 , Гц	\bar{f}_t , Гц	N	ξ	$\eta \cdot 100\%$	$a_{эф} = D_{см}$, м ² /с
Лабораторная установка с КС	0,2	0,12	2,5	0,15	1	17	82	0,04
Лабораторная установка с КС	0,25	0,25	2,1	0,25	1	8	52	0,07
Обжиговая печь КС-450	9,0	1,8	0,2	0,008	4	25	36	1,08
Кристаллизатор-гранулятор	1,6	0,4	1,1	0,07	3	16	30	0,18
Топка с кипящим слоем	6,0	0,8	0,5	0,01	6	50	48	1,06

На рис. 3 представлен график распределения показателя эффективности перемешивания η по радиусу R аппарата (где R соответствует расстоянию от стенки аппарата).

Экспериментальные значения эффективной температуропроводности $a_{эф}$ рассчитывались по формуле (8), теоретические значения — по известной формуле [3]

$$a_{расч} = \frac{1}{60} \sqrt{gH_0^3} .$$

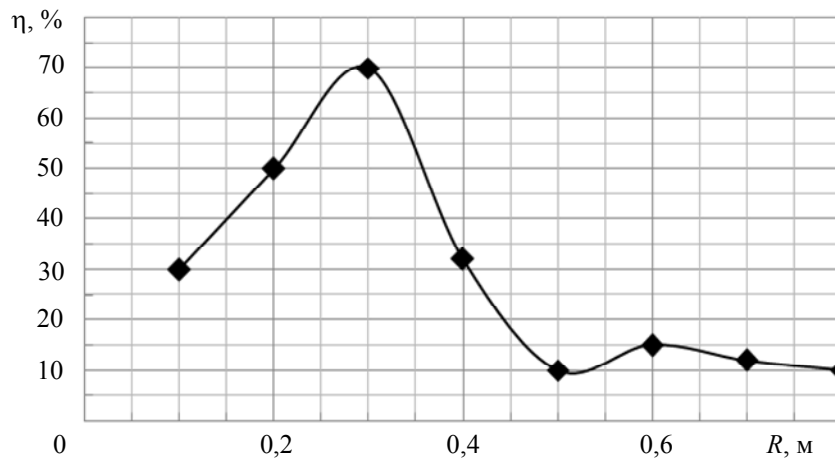


Рис. 3

Анализ результатов. Лабораторные установки, работающие при комнатных температурах и имеющие небольшие габариты, обеспечивают высокую эффективность перемешивания. Промышленные аппараты имеют меньшую эффективность, что связано с менее равномерным газораспределением, обусловленным конструкцией газораспределительной решетки. Однако существуют способы улучшения перемешивания слоя — в частности, введение в слой специальных активаторов или насадок: например, топка с кипящим слоем (см. таблицу) оснащена активизирующей перемешивание насадкой в виде „пучка“ труб, расположенных в шахматном порядке.

Эффективная температуропроводность слоя и коэффициента перемешивания, рассчитанные по измеренным частотам f_0 , f_i и формулам (8), (9) для $\varphi = 0,1$ и $\varphi_1 = 0,816$, имеют высокие значения, определяемые диапазоном $0,04—0,1 \text{ м}^2/\text{с}$ для небольших аппаратов, но могут достигать и величин порядка $1,0 \text{ м}^2/\text{с}$ для крупных аппаратов. Следует заметить, что аналогичные высокие значения указанных параметров получены в работе [9].

Установлено, что эффективность перемешивания значительно изменяется вдоль сечения аппарата (см. рис. 3). Соотношение максимального и минимального значений η может достигать порядковых величин, что указывает на высокую неравномерность процессов теплопереноса в псевдооживленном слое, особенно в аппаратах промышленного масштаба. Это является следствием, в первую очередь, конструктивных недостатков аппаратов, а также неэффективной организации технологического процесса.

Заключение. Впервые обоснована целесообразность и физическая сущность введенного ранее параметра качества псевдооживления — показана его прямая связь с характеристиками теплопереноса. Особую практическую значимость представляет новый параметр — эффективность перемешивания, введение которого позволяет оптимизировать конструкцию промышленных аппаратов с псевдооживленным слоем и осуществлять качественное управление, обеспечивающее требуемую энергетическую эффективность технологического процесса и его ресурсосбережение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лева М. Псевдооживление. М.: Гостоптехиздат, 1961. 400 с.
2. А. с. 1170329 СССР. Способ количественной оценки качества псевдооживления / О. М. Тодес, В. Я. Чушев, О. Б. Цитович, Н. В. Пилипенко, В. М. Ключев // Б.И. 1985. № 28.

3. Тодес О. М. Цитович О. Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем. Л.: Химия, 1981. 296 с.
4. Ходунков В. П. Исследование теплообмена в псевдооживленном слое // XV Королевские чтения МФТИ: Сб. науч. тр. М., 1984. Деп. ВИНТИ. № 6660-84. С. 42—44.
5. Ходунков В. П. Устройство для анализа низкочастотных колебаний температуры // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1987. Т. 30, № 1. С. 90—92.
6. Дульнев Г. Н., Пилипенко Н. В., Ключев В. М., Ходунков В. П. Методы и устройства для измерения структурно-гидродинамических и тепловых параметров псевдооживленных систем // Проблемные доклады Минск. междунар. форума по тепломассообмену. Минск: Ин-т тепломассообмена, 1988. С. 171—182.
7. Пилипенко Н. В. Динамический метод измерения эффективных температур и коэффициентов теплоотдачи в псевдооживленных слоях // Приборы. 2004. № 10. С. 37—39.
8. Дульнев Г. Н., Пилипенко Н. В., Ходунков В. П. Теплофизические аспекты процесса псевдооживления в энергетических установках // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 3. С. 83—89.
9. De Groot J. H. Proc. Intern. Symp. Fluidis, Eindhoven. Amsterdam, 1967. P. 348.

Сведения об авторе

Вячеслав Петрович Ходунков — канд. техн. наук; НИЦ по скрытности и защите кораблей ВУНЦ ВМФ „Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова“, Санкт-Петербург;
E-mail: walkerearth@mail.ru

Рекомендована кафедрой
компьютерной теплофизики и
энергофизического мониторинга
СПб НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
24.04.12 г.

О. С. ЮЛЬМЕТОВА, В. А. ВАЛЕТОВ, А. Г. ЩЕРБАК

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ШЕРОХОВАТОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Обосновывается необходимость оптимизации шероховатости поверхностей деталей приборов, влияющей на оптические характеристики роторов шаровых гироскопов с оптоэлектронной системой съема информации. Приводится алгоритм оптимизации, базирующийся на применении аппарата теории планирования эксперимента и непараметрических критериев оценки шероховатости функциональных поверхностей.

Ключевые слова: оптимизация, оптическая контрастность, лазерное маркирование, шероховатость, планирование эксперимента.

Введение. В технологии изготовления узлов гироскопических приборов важное место занимает процесс формирования функциональных поверхностей, при этом в ряде случаев рабочие характеристики полученной поверхности находятся в прямой зависимости от характера ее шероховатости. Один из возможных путей повышения качества изделий — обеспечение требуемого уровня функционального свойства поверхностей за счет оптимизации их шероховатости [1, 2].

Примером изделия, оптические (контрастность) и механические (дисбаланс) характеристики которого зависят от шероховатости его поверхности, является тонкостенный бериллиевый ротор электростатического гироскопа (ЭСГ). Ротор представляют собой сферу с доведенной до зеркального блеска наружной поверхностью, на которую методом локального электрохимического травления наносятся оптические элементы заданной контрастности, имеющие вид двух полюсных меток — двух полудисков диаметром 2,8 мм. Возможные направления работ по повышению точности электростатических гироскопов связаны, с одной стороны, с поиском более прогрессивного метода нанесения меток заданной контрастности на поверхности ротора, а с другой — с необходимостью применения эффективных технологических методов для обеспечения стабильности рабочих характеристик узлов гироскопов.

Необходимость поиска альтернативного способа нанесения оптических меток обусловлена недостаточной управляемостью применяемой в настоящее время технологии электрохимического травления, что выражается в относительно низкой воспроизводимости контраста, колеблющегося в пределах от 0,5 до 0,8 для роторов, изготовленных по единой технологии. Кроме того, возрастающая необходимость повышения точности гироскопов требует конструктивной модификации технологии нанесения меток, и для ротора ЭСГ их формирование следует осуществлять с относительной разностью контраста не менее 10 %. Однако электрохимический метод в принципе не может обеспечить стабильную разность контраста, что не позволяет повысить точностные характеристики прибора.

В настоящей статье рассматривается возможность повышения стабильности оптических характеристик ротора электростатического гироскопа путем оптимизации шероховатости функциональных поверхностей. При этом формирование оптических меток заданной контрастности 0,5 на поверхности ротора предлагается осуществлять методом лазерного маркирования, который является одним из перспективных способов нанесения меток [3]. Потребность в оптимизации шероховатости поверхностей объясняется тем, что ее измерение осуществляется до процедуры нанесения меток, после производится контроль лишь оптических и механических характеристик.

Алгоритм оптимизации шероховатости функциональных поверхностей. Для обеспечения процесса оптимизации был разработан алгоритм, схема которого представлена на рис. 1.

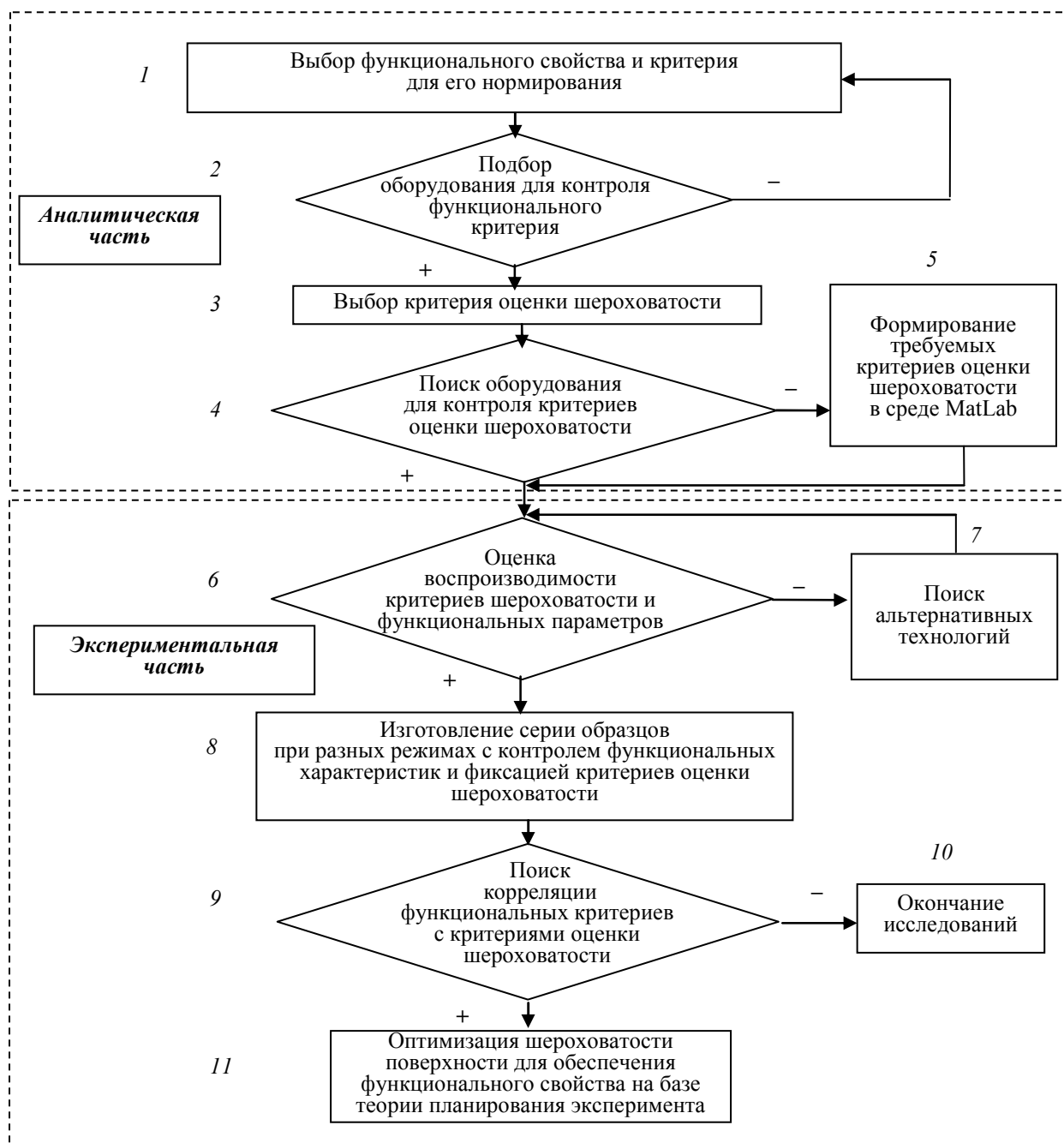


Рис. 1

Согласно алгоритму процесс оптимизации начинается с выбора функционального свойства и критерия для его нормирования. В задаче оптимизации шероховатости поверхности ротора ЭСГ оптическое свойство предложено нормировать контрастностью меток, опреде-

ляемой разностью коэффициента отражения базовой наружной поверхности бериллиевого ротора с износостойким покрытием из нитрида титана и коэффициента отражения маркированной метки. При этом коэффициенты отражения предлагается измерять с помощью микроскопа-спектрофотометра МСФУ-К, позволяющего строить зависимости коэффициентов от длины световой волны в диапазоне от 350 до 900 нм.

Следующий шаг алгоритма связан с выбором критерия оценки шероховатости. Шероховатость поверхности метки существенно влияет не только на контрастность, но и на дисбаланс ротора, поэтому необходимо создать метку с уровнем контрастности 0,5 на длине волны 860 нм при минимальном изменении шероховатости поверхности ротора в зоне нанесения метки. Иными словами, контрастность — это параметр оптимизации, а шероховатость является ограничительным фактором.

Шероховатость поверхности ротора перед операцией по нанесению метки составляет сотые доли микрометра по параметру R_q (среднеквадратическое отклонение профиля поверхности). При формировании метки методом лазерного маркирования ее шероховатость колеблется в пределах от сотых долей до одной десятой микрометра. Параметрический способ описания слабо чувствителен к изменениям шероховатости прецизионных поверхностей, происходящим после их обработки. Следовательно, параметр R_q не отражает реального изменения микрогеометрии метки, полученной лазерным маркированием. Более точным способом описания профиля обработанных прецизионных поверхностей является плотность распределения тангенсов углов наклона профиля. Современные приборы, предназначенные для оценки шероховатости, например измерительная станция Hommel Tester T8000, позволяют фиксировать координаты профиля поверхности и сохранять их в виде набора дискретных точек. Дальнейшая обработка координат и определение эмпирических плотностей распределения тангенсов углов наклона профилей производится в среде программирования MatLab. Последовательность этих действий отражена в блоках 3, 4 и 5 схемы алгоритма (см. рис. 1). Блоки 6—9 отражают действия по оценке воспроизводимости предлагаемой технологии и ее соответствия техническим условиям. Заключительным шагом алгоритма (блок 11) является проведение оптимизации шероховатости поверхности с применением теории планирования эксперимента.

Теория планирования эксперимента. Эксперимент является основным этапом процесса оптимизации шероховатости функциональных поверхностей. Оптимизировать влияние шероховатости на функциональное свойство предлагается путем поиска оптимума функционального критерия при варьировании технологических режимов обработки. В связи с этим важной задачей является процедура организации экспериментов для исключения хаотичных опытов и повышения эффективности исследований.

В качестве инструмента оптимизации шероховатости поверхностей был использован метод Бокса — Уилсона [4]. Оптимизация по этому методу включает следующие основные этапы:

- выбор параметра оптимизации;
- определение факторов технологического процесса и границ их варьирования;
- построение плана эксперимента или матрицы планирования;
- осуществление экспериментов согласно плану;
- проведение статистического анализа;
- построение уравнения регрессии;
- оценка адекватности полученной математической модели результатам реальных экспериментов.

Параметром оптимизации, как отмечено ранее, является контрастность меток. Факторами процесса маркирования меток с требуемым уровнем контрастности выступают режимы лазерного маркирования — мощность излучения, скорость перемещения сканирующего устройства и плотность линий (число линий, пройденных лазером на 1 мм поверхности).

В табл. 1 приведены основные факторы и диапазоны их варьирования, выбранные исходя из технических возможностей лазерного оборудования (минимаркер М10), а также результатов предварительных экспериментов [3].

Таблица 1

Фактор	Кодовое обозначение	Интервалы варьирования	Уровень факторов		
			нижний (-1)	базовый (0)	верхний (+1)
Мощность P , Вт	X_1	$\pm 0,2$	1,8	2	2,2
Плотность линий N , лин/мм	X_2	± 200	300	500	700
Скорость V , мм/с	X_3	± 20	30	50	70

Матрица планирования полнофакторного эксперимента 2^k , где k — число варьируемых факторов, представляющая собой все возможные комбинации уровней факторов, приведена в табл. 2. Число экспериментов составляет 2^3 , при этом каждый эксперимент был проведен 2 раза. Фактор X_0 введен в табл. 2 в целях получения свободного члена в уравнении регрессии.

Таблица 2

Номер эксперимента	Значения факторов, в кодовых обозначениях				Комбинация произведений факторов, в кодовых обозначениях				Значение параметра оптимизации Y
	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	0,03
									0,06
2	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0,06
									0,04
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	0,88
									0,87
4	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	0,055
									0,056
5	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	0,74
									0,68
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	0,15
									0,12
7	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	0,96
									0,96
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,75
									0,76

На основе матрицы планирования (см. табл. 2) был осуществлен расчет коэффициентов уравнения регрессии, связывающего параметр оптимизации с режимами лазерного маркирования. Пренебрегая коэффициентами, вклад которых в оценку Y незначителен, получаем уравнение регрессии следующего вида:

$$Y = 0,448 + 0,192X_1 + 0,213X_2 - 0,199X_3 - 0,056X_2X_3 + 0,149X_1X_2X_3$$

или для выражения контраста:

$$K = 0,448 + 0,192P + 0,213N - 0,199V - 0,056NV + 0,149PNV.$$

Проверка корректности модели по критерию Фишера (F-критерию), показала, что рассчитанное значение F-критерия (0,014) не превышает табличного (0,6), поэтому с соответствующей доверительной вероятностью модель можно считать корректной.

Анализ приведенных выражений показывает, что по степени влияния на контраст оптических меток, полученных на поверхности с покрытием из нитрида титана, факторы могут быть распределены следующим образом: плотность линий N , скорость V и мощность излучения P . При этом коэффициенты уравнения регрессии при мощности (0,192) и скорости (-0,199) близки по абсолютному значению, поэтому влияние этих факторов на контрастность одинаково существенно. Также важны комбинация двух факторов — плотности линий и скорости перемещения сканирующего устройства — и взаимовлияние всех трех факторов.

Знак коэффициентов в уравнении регрессии при варьируемых факторах (мощности P , скорости V и плотности линий N) определяет характер влияния каждого из них на оптимизируемый параметр: „+“ означает, что увеличение данного фактора приводит к возрастанию оптимизируемого параметра, а знак „-“ — к уменьшению параметра оптимизации. При мощности P и плотности линий N коэффициенты положительные, а при скорости сканирования V коэффициент отрицательный, что полностью согласуется с экспериментальными данными, приведенными в работе [3].

Таким образом, в результате проведения оптимизации были получены:

1) математическая модель, описывающая процесс создания метки методом лазерного маркирования на доведенной поверхности с покрытием из нитрида титана и позволяющая прогнозировать уровень контрастности при варьировании факторов;

2) технологические режимы — $P=2$ Вт, $N=500$ лин/мм и $V=50$ мм/с — для создания метки с требуемым уровнем контрастности при минимальном отклонении шероховатости для поверхности с покрытием из нитрида титана; на рис. 2 представлено изображение метки, полученное с помощью микроскопа при 10-кратном увеличении;

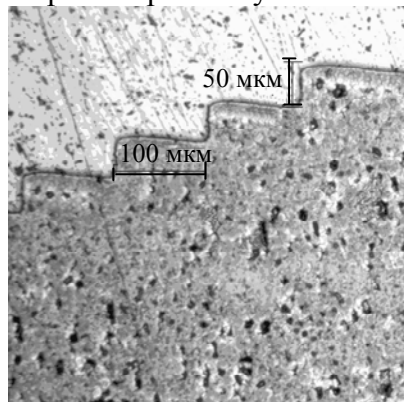


Рис. 2

3) оптимальная шероховатость поверхности, контроль которой предлагается осуществлять на основе определения плотности распределения тангенсов углов наклона профиля (α); на рис. 3 представлен график оптимальной плотности распределения тангенсов наклона (H) для базовой доведенной поверхности с покрытием из нитрида титана (кривая 1) и поверхности маркированной метки, формирование которой осуществлялось при оптимальных режимах (кривая 2).

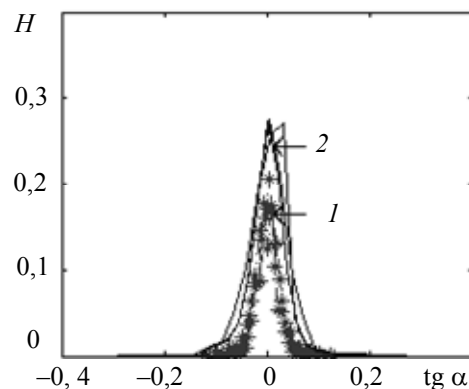


Рис. 3

Заключение. С использованием аппарата теории планирования эксперимента и непараметрических критериев оценки шероховатости функциональных поверхностей проведена оптимизация шероховатости, позволяющая обеспечить контрастность полюсных меток, формируемых методом лазерного маркирования на доведенной поверхности ротора электростатического гироскопа, а также стабильность оптических характеристик гиросузда.

Получена математическая модель оценивания уровня контрастности для выбранных режимов технологии лазерного маркирования.

Предложена прогрессивная технология формирования метки (метод лазерного маркирования), обеспечивающая возможность получения заданной величины относительной разности контраста полюсных меток, что позволяет повысить точность съема информации.

Статья подготовлена по результатам работ, выполненных при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 10-08-00158а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мусалимов В. М., Валетов В. А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб: Ин-т машиностроения, 2006. 168 с.
2. Юльметова О. С., Сисюков А. Н., Юльметова Р. Р. Создание базы данных непараметрических критериев оценки микрогеометрии функциональных поверхностей // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 8. С. 15—19.
3. Юльметова О. С., Щербак А. Г. Исследование процесса формирования светоконтрастного раstra посредством лазерного маркирования // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2010. № 05(69). С. 28—34.
4. Валетов В. А., Васильков С. Д., Сисюков А. Н., Юльметова О. С. Методика исследования характеристик поверхностного слоя деталей приборов: Учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010.

Сведения об авторах

- Ольга Сергеевна Юльметова** — ОАО Концерн «ЦНИИ “Электроприбор”», Санкт-Петербург; ст. науч. сотрудник; E-mail: www.ralli@rambler.ru; E-mail: olga@yulmetova.ru
- Вячеслав Алексеевич Валетов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: valetov.v@mail.ru
- Александр Григорьевич Щербак** — д-р техн. наук; ОАО Концерн «ЦНИИ “Электроприбор”», Санкт-Петербург; вед. науч. сотрудник; E-mail: a_sch@gtm.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения
СПб НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
25.04.11 г.

В. П. ЛАРИН, Д. К. ШЕЛЕСТ

ОПЕРАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ С ВНУТРЕННИМ МОНТАЖОМ

Рассматриваются задачи операционного контроля при изготовлении электронных модулей, содержащих компоненты внутреннего монтажа. Сформулированы базовые теоретические принципы построения системы контроля при изготовлении таких модулей и описана процедура ее синтеза.

Ключевые слова: электронный модуль с внутренним монтажом компонентов, эффективность использования, критичные объекты, теоретические принципы построения операционного контроля.

Использование конструкций устройств на основе внутреннего монтажа компонентов, как показано в работах [1, 2], эффективно только в изделиях с высокими требованиями по массогабаритным характеристикам и условиям эксплуатации, например в аэрокосмической отрасли. Однако использование устройств в этой области диктует, в свою очередь, чрезвычайно высокие требования по надежности, которые при изготовлении конструкций электронных модулей с внутренним монтажом (ЭМВМ) должны быть обеспечены соответствующими сборочно-монтажными и контрольно-испытательными технологиями. Анализ современного арсенала методов и средств операционного контроля применительно к ЭМВМ и изложение теоретических принципов проектирования операций контроля в технологическом процессе их изготовления и является целью настоящей статьи.

Трудоемкость изготовления ЭМВМ, необходимость освоения новых технологий для элементов конструкции и новых технологий монтажа, высокие требования к точности выполнения большинства операций непосредственно связаны с задачей достаточно четкого определения технических объектов, в которых использование ЭМВМ наиболее эффективно. Сравнение конструкций ЭМВМ и традиционных модулей поверхностного монтажа показывает, что ЭМВМ имеют такие преимущества, как: более высокий уровень миниатюризации, лучшие характеристики распределения ресурса масс и объемов, возможность обеспечения эффективного теплоотвода от теплонагруженных элементов, высокий уровень виброустойчивости. Данные преимущества позволяют считать наиболее эффективной областью применения ЭМВМ сложные технические объекты, относящиеся к категории критичных по отказам.

Технико-экономическая эффективность критичных объектов за весь период эксплуатации напрямую зависит от их текущей безотказности и показателей долговечности (технического ресурса, срока службы). К критичным объектам обычно относят:

- космические системы (космические аппараты, стартовые и ракетные комплексы);
- летательные аппараты (пилотируемые и беспилотные аппараты различных типов и назначения);
- крупные военные объекты (в том числе, атомные подводные лодки, системы противоракетной обороны и др.);
- энергетические системы (ядерные энергетические установки АЭС и другие системы энергообеспечения);
- предприятия нефтегазовой и химической промышленности (перерабатывающие предприятия, системы магистральных трубопроводов, перекачки нефти и газа).

Для большинства объектов первых трех видов микроминиатюрность ЭМВМ, высокий уровень функциональной и конструктивной интеграции и устойчивость к высоким механическим нагрузкам имеют принципиально важное значение, тогда как для других видов критичных объектов эти свойства не являются существенными.

Итак, области наиболее эффективного использования ЭМВМ ограничиваются бортовыми системами и аппаратами специального применения, такими как автономные подводные объекты, беспилотные аппараты воздушного и морского применения, некоторые наземные боевые средства и т.п. Аппаратура таких объектов характеризуется жесткими и особо жесткими условиями эксплуатации и в основном относится к критичным элементам систем по тяжести последствий отказов.

Для использования ЭМВМ в качестве основного варианта конструктивного исполнения электронной аппаратуры в высоконадежных системах необходима разработка базовых теоретических принципов построения системы контроля при изготовлении таких модулей. Введение контрольных операций лишь на завершающей стадии изготовления ЭМВМ [3] носит, скорее, рекламный характер и не соответствует требованиям высокой степени их безотказности и стабильности качества.

В работе [4] приведена классификация функций и соответствующих им устройств приборной аппаратуры гиперзвуковых летательных аппаратов по категории тяжести последствий отказов. В качестве первого этапа можно использовать оценку затрат на надежность в соотношении с тяжестью последствий (ущербом) от отказов, что позволит решить принципиально задачу целесообразности разработки ЭМВМ для рассматриваемых объектов. Следующим этапом будет определение конструктивно-технологических требований к процессу изготовления ЭМВМ исходя из категории тяжести последствий его отказов.

Процесс обеспечения качества ЭМВМ, соответствующего высоким требованиям по надежности, предъявляемым к аппаратуре аэрокосмических систем, включает в себя множество факторов, среди которых особое значение имеют методы и средства контроля при их производстве. Выбор методов и средств контроля в каждом конкретном случае зависит от требуемой достоверности результатов и характеризуется вероятностью выявления дефектов. На вероятность выявления дефектов влияют чувствительность метода, а также условия проведения контроля. Определение вероятности выявления дефектов является достаточно сложной задачей, которая еще более усложняется, если для повышения достоверности определения дефектов приходится комбинировать методы контроля. Комбинирование методов подразумевает не только использование нескольких методов, но и их чередование в определенной последовательности в технологическом процессе изготовления ЭМВМ. Вместе с тем стоимость применяемых методов контроля должна быть по возможности ниже.

Таким образом, выбор стратегии применения методов контроля основывается на стремлении, с одной стороны, повысить вероятность выявления дефектов и, с другой стороны, снизить различные технико-экономические затраты на проведение контроля. Если исходить из принятой практики обеспечения надежности особо критичных изделий, то, как правило, экономические факторы уходят на второй план, а главными являются требования бездефектности. Задача заключается в разработке и применении на каждом этапе технологического процесса (ТП) изготовления ЭМВМ методик строгого контроля, т.е. формировании набора параметров, подлежащих контролю, выборе последовательности их контроля и средств, соответствующих требуемой достоверности результатов контроля.

В качестве базовой основы формулировки цели и задач контроля примем укрупненные группы операций ТП изготовления ЭМВМ и характеристики параметров объектов, формируемых на этих операциях. Основные элементы процедуры анализа „операции ТП — объекты контроля“ представлены в таблице.

Используя принятый для задач технологического проектирования системный подход, будем рассматривать в качестве объекта проектирования технологическую систему контроля (СК), включающую в себя совокупность операций контроля, средства контроля, ресурсы и информационно-методическое обеспечение.

Операции анализа в ТП изготовления ЭМВМ	Характеристика параметров объектов контроля
Поступление исходных компонентов монтажа	Геометрические параметры материала основания. Установочные поверхности кристалла
Сборка кристалла в окне пластины	Площадь нанесения адгезива (или герметика) в окне монтажного основания. Местоположение кристалла по координатам и углу поворота после посадки. Качество поверхности кристалла после посадки
Вскрытие защитного слоя для формирования контактных площадок	Размеры окон для формирования контактных площадок. Совмещение окон с площадью активной стороны кристалла
Образование контактных площадок на кристалле	Толщина металлического слоя контактных площадок. Равномерность металлического слоя. Прочностная характеристика сцепления слоя

Задачу синтеза системы контроля для технологического процесса изготовления ЭМВМ сформулируем следующим образом: *в соответствии с целью контроля и имеющейся совокупностью контролируемых признаков определить минимально необходимое количество параметров, характеризующих свойства объекта с заданной достоверностью, поставить им в соответствие средства контроля и разработать оптимальный процесс контроля.*

Схема процедуры синтеза системы контроля для технологического процесса изготовления ЭМВМ приведена на рис. 1. Процедура синтеза состоит из последовательного решения задач контроля на каждом этапе процесса и заключается в принятии решения о нецелесообразности проведения контроля или о проектировании операции контроля.



Рис. 1

Схема технологического проектирования операции контроля приведена на рис. 2. Окончательное формирование процесса контроля, реализуемого системой контроля, выполняется по схеме, представленной на рис. 3.

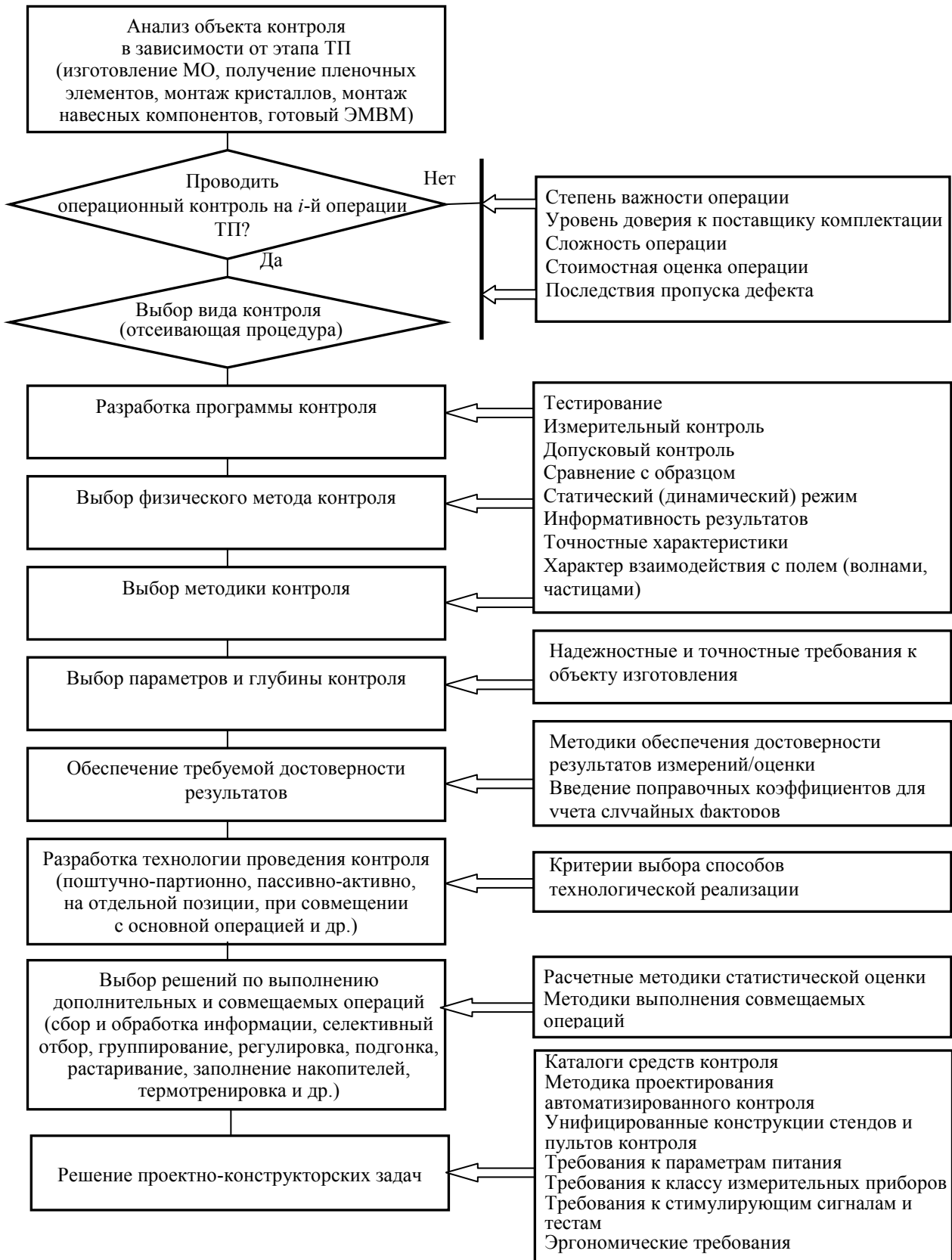


Рис. 2



Рис. 3

В процессе синтеза формируется структура системы контроля с использованием функционально-модульного принципа построения. Данный принцип заключается в том, что процесс проектирования подчиняется последовательно проводимой процедуре, состоящей из правил, выполняемых для каждой операции контроля, вводимой в ТП изготовления объекта производства [5]. Последовательность процедурных правил выглядит следующим образом:

- анализируется i -я операция (группа операций) ТП изготовления изделия и в соответствии с целью E (обеспечение заданного уровня качества) принимается решение о предпочтительности проведения контроля в данной точке ТП;
- формируются функции контроля G_j для рассматриваемой j -й операции контроля; эти функции формируются на основе анализа интенсивности, вида и источника появления дефектов и понимаются как функциональные задачи на проектирование данной операции контроля;
- определяются связи функций контроля и целей для назначения глубины, точности и программы контроля;
- формируется полный перечень параметров, контроль которых может соответствовать функциональным задачам проектируемой операции;
- проводится усечение множества сформированных параметров с выделением характеристических параметров для определения значимых функций H_j данной операции контроля;
- производится формирование модуля C_j , заключающееся в назначении функциям контроля соответствующих средств и обеспечения (ресурсного, методического, информационно-программного);
- сформированный модуль контроля включается в качестве претендента в матрицу C элементов системы контроля.

Последующая процедура заключается в структурно-параметрической оптимизации полученного множества элементов структуры СК (модулей-претендентов) и построении процесса контроля на основе схем, приведенных на рис. 2 и 3.

При проектировании системы контроля для ТП изготовления ЭМВМ типовой функциональной задачей анализа при формировании j -го модуля является выбор метода контроля для

обнаружения вероятного дефекта. Дефекты при изготовлении ЭМВМ могут быть поверхностными, подповерхностными или залегать в глубине структуры; различаются их виды и другие особенности. В таких условиях выбор метода и соответствующего средства контроля имеет два граничных последствия:

1) выбор минимального числа средств не позволит выявить все дефекты;

2) выбор количества средств, необходимых для выявления всех дефектов, приведет к большому числу проблем (увеличению времени контроля, стоимости оборудования и обслуживания, производственной площади, количества специалистов, необходимых ресурсов и др.).

Например, оптический и растровый электронный микроскопы обладают высокой разрешающей способностью, но мало пригодны для исследования внутренних областей непрозрачных материалов. Для анализа внутренней структуры изделий электроники применяются рентгенотелевизионные микроскопы, однако при их использовании возникают сложности, связанные с расшифровкой получаемых изображений, а также с изучением слабоконтрастных объектов. Таким образом, решение каждой из задач синтеза системы контроля связано с выбором оптимального решения, обеспечивающего в конечном итоге требуемое качество ЭМВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларин В. П., Шелест Д. К., Васильев С. А., Герцев П. В., Репина А. В. Конструктивно-технологические варианты проектирования электронных модулей на основе внутреннего монтажа // Изв. ГУАП. Аэрокосмическое приборостроение: науч. журн. 2011. С. 112—116.
2. Ларин В. П., Веряскин И. А., Герцев П. В. Выбор конструктивного решения для электронных модулей гиперзвукового летательного аппарата // Завалишинские чтения: Сб. докл. СПб: СПбГУАП, 2010. С. 139—141.
3. Назаров Е. Внутренний монтаж функциональных радиоэлектронных блоков // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2008. Вып. 3. С. 36—39.
4. Ларин В. П. Проблемы обеспечения надежности аппаратуры гиперзвуковых летательных аппаратов // Науч. сессия ГУАП: Сб. докл. Ч. I. Технические науки. СПб: СПбГУАП, 2010. С. 28—30.
5. Ларин В. П. Проектирование технологии контроля при производстве устройств с внутренним монтажом // Завалишинские чтения: Сб. докл. СПб: СПбГУАП, 2011. С. 171—177.

Сведения об авторах

Валерий Павлович Ларин

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский университет аэрокосмического приборостроения, кафедра микро- и нанотехнологий аэрокосмического приборостроения;
E-mail: larinvp39@yandex.ru

Дмитрий Константинович Шелест

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский университет аэрокосмического приборостроения, кафедра микро- и нанотехнологий аэрокосмического приборостроения;
E-mail: shelestd@gmail.ru

Рекомендована кафедрой
микро- и нанотехнологий
аэрокосмического приборостроения

Поступила в редакцию
30.03.12 г.

SUMMARY

P. 3—7.

DEVELOPMENT OF SEMANTICALLY SUBSTANTIAL RULES FOR EXPERT SYSTEMS IN PROBLEMS WITH ENHANCED ACCURACY OF SOLUTION

A method is proposed for construction of logical-linguistic model of fuzzy inference amendments with the account for decisions made in a set of control cases. A modification of Sugeno fuzzy inference systems algorithm is developed on the base of generalized Faber — Schauder basis functions. The modified algorithm makes it possible to reduce decision errors with immutable semantics of initial definitions.

Keywords: logical-linguistic model, Sugeno algorithm, Faber — Schauder functions.

Data on authors

- Vladimir A. Terekhov* — Cand. Techn. Sci.; Moscow State Technical University “Moscow Institute of Radio Electronics and Automation”, Department of Technical Electrodynamics and Electronics; Professor
- Konstantin A. Maikov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Bauman Moscow State Technical University, Department of Computer Software and Information Technology; E-mail: maikov@mx.bmstu.ru
- Sergey M. Zhiryakov* — Cand. Techn. Sci.; Russian Aircraft Corporation “MiG”, Mikoyan Engineering Center, Moscow; Senior Engineer; E-mail: zs-mailbox@mail.ru

P. 8—12.

CHOICE CRITERIA FOR CONTROLLED BY MEANS OF DETECTION PARAMETERS IN SECURITY SYSTEM

Security system model based on the set theory is analyzed with the account for specific features of the security system, threats manifestations, and environmental conditions. Criteria of choice of object parameters measured by detection devices are formulated.

Keywords: security system, detection devices parameters, choice criteria.

Data on author

- Vladimir V. Volkhonsky* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics; E-mail: volkhonski@mail.ru

P. 13—17.

INCREASING INFORMATION TRANSFER SYSTEM RELIABILITY ON THE BASE OF THE THEORY OF BOOLEAN FUNCTIONS PROHIBITIONS

A scheme is proposed to improve communication system reliability with the use of a high-strength encryption algorithm. The algorithm reliability is provided by a scale encryption generator with a non-linear complexity block designed on the base of the theory of Boolean functions prohibitions. The results can be used in devices for transfer of responsibility information.

Keywords: information security, Boolean functions prohibitions theory, gamma of cipher, cryptanalysis of pseudo-random generators.

Data on authors

- Alexey Yu. Rozhnev* — Post-Graduate Student; Ural State University of Railway Transport, Department of Electrical Machines, Ekaterinburg; E-mail: alexon@k66.ru
- Boris S. Sergeev* — Dr. Techn. Sci., Professor; Ural State University of Railway Transport, Department of Electrical Machines, Ekaterinburg; E-mail: sergeew@uralmail.com
- Igor G. Tilk* — Cand. Techn. Sci.; Ural State University of Railway Transport, NPC “Promelectronica”, Ekaterinburg; Director; E-mail: I_Tilk@npcprom.ru

P. 18—26.

DIAGNOSTICS OF AUTOMATED SYSTEM OF CONTROL OVER COMPLEX OBJECT WITH THE USE OF A PRIORY INFORMATION

The problem of increasing the reliability of diagnostics for the complex technical systems in the conditions of uncertainty is considered. A diagnostic technique was developed on the base of a posteriori conclusion of the Bayesian belief networks, including synthesis of the optimal diagnostic strategy taking into account dynamics of the a priori information and various laws of the distribution of continuous diagnostic signs.

Keywords: diagnostics, Bayesian belief networks, reliability, a posteriori conclusion.

Data on authors

- Alexander B. Kuznetsov* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Automated Systems of Preparation and Launch of Space Appointment Rockets, St. Petersburg; E-mail: alexandr_k_spb@mail.ru
- Nikita A. Osipov* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Automated Systems of Preparation and Launch of Space Appointment Rockets, St. Petersburg; E-mail: bayes@mail.ru
- Igor V. Dorozhko* — Advanced Student; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Automated Systems of Preparation and Launch of Space Appointment Rockets, St. Petersburg; E-mail: Dorozhko-Igor@yandex.ru

P. 26—31.

ROBUST STATIC CONTROL ALGORITHM FOR LINEAR OBJECTS WITH DELAY

An algorithm of robust control over linear objects described by parametrically and signal-uncertain differential equation with delay is proposed. The static control algorithm provides proximity of the object output to a reference signal with a desired accuracy. Simulation results illustrating the algorithm performance are presented.

Keywords: robust control, observer, singularly perturbed object.

Data on author

- Igor B. Furtat* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: cainenash@mail.ru

P. 32—38.

IMPACT OF EXTERNAL PERTURBATION ON INERTIAL SENSOR ERRORS

A mathematical model of movement of sensitive element of pendulous compensation- type accelerometer is presented. Results of numerical integration are generalized, and influence of perturbations on measuring accuracy of accelerometer CE-199 in periodic operation mode with pulse-width modulator of the second kind is carried out.

Keywords: accelerometer, angular velocity sensor, periodic mode, measuring accuracy.

Data on authors

- Sergey V. Luchko* — Dr. Techn. Sci., Professor; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Automatics and Electronics, St. Petersburg
- Sergey Yu. Baluev* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Automatics and Electronics, St. Petersburg; E-mail: S.baluev@mail.ru
- Mikhail A. Vatutin* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Automatics and Electronics, St. Petersburg
- Igor S. Guryev* — Dr. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, RD Department, St. Petersburg

P. 39—44.

SYNTHESIS OF OPTIMAL DATA-HOLD DEVICE

The problem of optimization of data-hold device characteristics depending on spectrum width and central frequency of random input signal is considered. Optimization of the data-hold device weight coefficients is shown to reduce significantly the extrapolation errors.

Keywords: discretization of signal, extrapolation, optimization, errors.

Data on author

- Sergey I. Ziatdinov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Information Network Technologies; E-mail: Kaf53@GUAP.ru

P. 45—49.

METHOD FOR DETERMINATION OF OBJECTS ANGULAR POSITION

A method is proposed for determination of an object angular position relative to another one. Theoretical substantiation of the method and expressions for object rotation angles calculation are presented. Results of experimental study are described.

Keywords: measurement, optical-electronic method, angular position of object.

Data on author

- Alexander I. Shimarov* — Cand. Techn. Sci.; Samara State Technical University, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; E-mail: alexandr-shimarov@rambler.ru

P. 50—54.**FOCUSING ABILITY OF POLYMER MICRO-OPTICAL ELEMENTS ON THE TOP OF THE FIBER FORMED BY PHOTOPOLYMERISATION**

Technology of polymer optical element formation on a fiber top by polymerization with the use of outgoing radiation from the fiber is investigated. Analysis of the formed microelement focusing efficiency is carried out.

Keywords: optical waveguide, optical fiber, micro-optical element, coupling, self-focusing, photopolymer.

Data on authors

- Nina O. Sobeschuk** — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum-Sized Systems; Engineer;
E-mail: daedraazura@gmail.com
- Igor Yu. Denisiuk** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum-Sized Systems;
E-mail: denisiuk@mail.ifmo.ru
- Maria I. Fokina** — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum-Sized Systems; Scientist;
E-mail: mari2506@rambler.ru

P. 55—58.**TRANSFORMATION OF CRYSTAL CONOSCOPIC FIGURES UNDER CHANGES OF OPTICAL OBSERVATION SYSTEM**

Variation of observation scheme is shown to lead to the transformation of crystal conoscopic figures thus expanding the method capabilities in investigation of optically active crystals. Results of experiments carried out with TeO₂ active crystal under changes in position of a quarter-wave plate in the optical observation system are presented.

Keywords: interference, circular polarization, conoscopic pattern, quarter-wave phase plate.

Data on authors

- Olga Yu. Pikoul** — Cand. Phys.-Math. Sci.; Far Eastern State Transportation University, Department of Physics, Khabarovsk; E-mail: pikoul2008@gmail.com
- Genrietta V. Kulikova** — Post-Graduate Student; Far Eastern State Transportation University, Department of Physics, Khabarovsk; E-mail: kulikova_genriet@mail.ru
- Vladimir I. Stroganov** — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; Far Eastern State Transportation University, Department of Physics, Khabarovsk; E-mail: garmonica@festu.khv.ru

P. 58—61.**NEAR-FIELD HIGH FREQUENCY SENSING FOR ESTIMATION OF SURFACE ACTIVITY OF POLYETHYLENE PIPELINE COVER**

A method of estimation of relative surface activity of polyethylene after thermal treatment is discussed. The method is based on detection of relative dielectric conductivity change in surface layer. Detection is performed with designed sensor and autonomous indicator.

Keywords: activity, dielectric conductivity, electromagnetic field, antenna, sensor, indicator.

Data on authors

- Yury A. Baloshin** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Physics;
E-mail: baloshin1940@mail.ru

- Mikhail G. Ryzhov* — Cand. Techn. Sci.; Russian Scientific Center “Applied Chemistry”, St. Petersburg; Senior Scientist
- Pavel N. Silin* — Cand. Techn. Sci.; “BIURS” Closed Corporation, St. Petersburg; Director for R&D
- Anatoly A. Sorokin* — Cand. Techn. Sci.; Ustinov Baltic State Technical University “Voenmeh”, Department of Radio-Electronic Control Systems, St. Petersburg;
E-mail: an_sor@mail.ru
- Mikhail A. Ustinskoy* — Post-Graduate Student; Ustinov Baltic State Technical University “Voenmeh”, Department of Radio-Electronic Control Systems, St. Petersburg; E-mail: ustinskoy@mail.ru

P. 62—67.

HEAT REGIMES OF GYROSCOPIC INSTRUMENTS ON THE BASE OF FIBER OPTICAL GYROSCOPES

Thermal regimes of instruments on the base of fiber optical gyroscopes are studied with the use of up-to-date software. Suggestions on optimization of the instrument design and further investigation in the field are formulated.

Keywords: gyroscope, thermal regime, finite elements method.

Data on authors

- Dmitry S. Gromov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: dmitrygromov17@gmail.com
- Alexander V. Sharkov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: Sharkov@grv.ifmo.ru

P. 67—72.

FLUIDIZATION QUALITY – A WAY TO ENERGY SAVING TECHNOLOGIES

Connection between of fluidization quality with the fluidized bed heat and mass transfer characteristics is demonstrated. Results of experimental study are presented; analysis of practical application of the results to industrial equipment diagnostics is given.

Keywords: quality of fluidization, diagnosis and effectiveness of mixing, oscillation frequency, temperature, diffusion coefficient.

Data on author

- Vyacheslav P. Hodunkov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: walkerearth@mail.ru

P. 73—78.

APPLICATION OF THE THEORY OF EXPERIMENT PLANNING TO OPTIMIZATION OF ROUGHNESS OF FUNCTIONAL SURFACES

The necessity of optimization of roughness affecting the optical characteristics of rotors in electrostatic gyro with optoelectronic read-out systems is justified. An optimization algorithm is developed on the base of the theory of experimental planning and non-parametric criteria of roughness estimation for functional surfaces.

Keywords: optimization, optical contrast, laser marking, roughness, experimental planning.

Data on authors

- Olga S. Yulmetova* — Concern CSRI “Elektropribor”, JSC, St. Petersburg; Senior Scientist;
E-mail: www.ralli@rambler.ru; E-mail: olga@yulmetova.ru
- Vyacheslav A. Valetov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology;
E-mail: valetov.v@mail.ru
- Alexander G. Scherbak* — Dr. Techn. Sci.; Concern CSRI “Elektropribor”, JSC, St. Petersburg; Leading Scientist;
E-mail: a_sch@gtm.ru

P. 79—84.

OPERATIONAL CONTROL IN THE PROCESS OF MANUFACTURING OF ELECTRONIC MODULES WITH INTERNAL INSTALLATION

The problems of design of technological operational control over manufacturing process of electronic modules containing internal installation components are considered. Theoretical principles of monitoring system construction are formulated; procedure of the system synthesis is described.

Keywords: electronic module with internal installation components, efficiency of use, critical objects, theoretical principles of construction of operational control.

Data on authors

- Valery P. Larin* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Micro- and Nanotechnologies in Aerospace Instrumentation;
E-mail: larinvp39@yandex.ru
- Dmitry K. Shelest* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Micro- and Nanotechnologies in Aerospace Instrumentation;
E-mail: shelestd@gmail.ru