

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Шишкин И. Ф., Сергушев А. Г. К вопросу об эффективности приборов поиска объектов..... 5
- Мусалимов В. М., Дик О. Е., Тюрин А. Е. Параметры действия энергетического спектра вейвлет-преобразований..... 10
- Петрова Е. Н., Коротков К. Г., Орлов Д. В., Короткова А. К. Принципы построения и структура автоматизированного программно-аппаратного комплекса оценки состояния здоровья 16

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Фуртат И. Б., Цыкунов А. М. Адаптивное управление объектами с неопределенностью знака коэффициента передачи 21
- Кабанов Д. С. Оптимальное управление ядерным реактором с учетом случайных возмущений 27

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Будько М. Ю. Повышение безопасности работы компьютерных сетей на основе анализа потоков данных 31
- Гирик А. В. Применение методов многокритериального прогнозирования в сетевых системах обнаружения вторжений..... 34

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Зиатдинов С. И. Оценка нелинейных искажений сигнала, вносимых электронным усилителем..... 38
- Сенкевич Ю. И. Автоматизация медицинских наблюдений в полярных зонах 42

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Смирнов В. Д., Кнороз И. В., Герсанова С. Е. Чувствительность оптико-электронных приборов при малом контрасте объекта к окружающему фону 47
- Лебедько Е. Г., Нгуен Ву Тунг. Погрешность измерения радиальной протяженности поверхности при ее моноимпульсном облучении..... 50

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

- Меркухин Е. Н.** Использование графовых моделей пространства допустимых решений в задаче размещения электронных элементов 56
- Марков О. И.** Математическое моделирование работы низкотемпературных охлаждающих термоэлементов 61
- Платунов Е. С., Баранов И. В., Платунов А. Е.** Теплофизическая лаборатория низких температур 65

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

- Скворцов А. М., Чуйко В. А., Ле Зуй Туан, Фам Куанг Тунг.** Формирование регулярного массива нанокластеров кремния методом проекционного лазерного облучения 69
- Махов В. Е., Палаев А. Г., Потапов А. И.** Автоматизация контроля качества сварных швов с использованием ультразвуковой технологии 75

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Бояшова С. А.** Метрологическая основа построения автоматизированной системы тестирования 82
- SUMMARY (*перевод Ю. И. Копилевича*) 85

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Shishkin I. F., Sergushev A. G.** On Estimation of Efficiency of Object-Detecting Facilities 5
- Musalimov V. M., Dick O. E., Tyurin A. E.** Action Parameters of Energy Spectrum of Wavelet Transform 10
- Petrova E. N., Korotkov K. G., Orlov D. V., Korotkova A. K.** Principles of Construction and Structure of Automated Hard- and Software Complex for Estimation of State of Health 16

DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

- Furtat I. B., Tsykunov A. M.** Adaptive Control of Linear Systems with Unknown Sign of High-Frequency Gain 21
- Kabanov D. S.** Optimal Control Over Nuclear Reactor with the Account for Random Disturbances 27

COMPUTING TECHNIQUE

- Budko M. Yu.** Improvement of Network Security on the Base of Data Stream Analysis 31
- Guirik A. V.** Application of Multicriteria Prediction Methods in Systems for Detection of Network Intrusions 34

ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

- Ziatdinov S. I.** Estimation of Nonlinear Distortion of Signal Caused by Electron Amplifier 38
- Senkevich Yu. I.** Automation of Medical Supervision in Polar Zone 42

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Smirnov V. D., Knoroz I. V., Gersanova S. E.** Sensitivity of Opto-Electronic Devices at Low Contrast between Object and Background 47
- Lebedko E. G., Nguen Vu Tung.** Error in Measurement of Radial Extent of a Surface at Monopulse Irradiation 50

HEAT REGIMES AND RELIABILITY OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Merkuhin E. N.** Application of Graph Models for the Space of Allowable Solutions to the Problem of Arrangement of Electronic Elements 56
- Markov O. I.** Mathematical Modeling of Operation of Low-Temperature Cooling Thermoelements 56
- Platunov E. S., Baranov I. V., Platunov A. E.** Thermophysics Laboratory of Low-Temperature 69

INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

- Skvortsov A. M., Chujko V. A., Le Duy Tuan, Pham Quang Tung.** Formation of Regular Array of Silicon Nanoclusters by Method of Projection Laser Irradiation 69
- Mahov V. E., Palaev A. G., Potapov A. I.** Automation of Welded Seams Quality Assurance with the Use of Ultrasonic Technology..... 73

BRIEF NOTES

- Boyashova S. A.** Metrological Basis for Development of Automated Testing System..... 82
- SUMMARY 85

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

И. Ф. ШИШКИН, А. Г. СЕРГУШЕВ

К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИБОРОВ ПОИСКА ОБЪЕКТОВ

Обсуждаются вопросы эффективности и качества приборов поиска различных объектов с использованием аппарата теории поиска. Рассматриваются такие характеристики, как вероятность обнаружения, служащая главным показателем качества прибора, и вероятность контакта, позволяющая учитывать влияние помех на процесс поиска. Выводятся уравнения для вероятности обнаружения и показателя, характеризующего производительность поиска.

Ключевые слова: поиск объектов, эффективность приборов поиска, вероятность обнаружения, вероятность контакта, производительность поиска.

Поиск различных объектов в окружающем пространстве — распространенная область применения технических средств. Для классификации приборов используются различные физические принципы, методы измерений, способы обработки и отображения информации и т.д. По виду и диапазону регистрируемых физических величин приборы поиска можно подразделить на оптические, радиотехнические, электрические, магнитные, акустические (в том числе, гидроакустические), химические, теплотрические, радиационные и т.п.; по режиму работы — на активные, полуактивные и пассивные; по дальности действия — на контактные и дистанционные; по способу применения — на стационарные и передвижные. Но даже такая, далеко не полная классификация показывает, что разработка, производство и эксплуатация приборов поиска составляет обширную сферу деятельности. В этих условиях обеспечение высокого качества выпускаемой продукции является сложной научной, технической и организационной задачей.

Согласно ГОСТ Р ИСО 9000-2000 „качество продукции — это степень соответствия собственных характеристик продукции требованиям“. Характеристики качества делятся на собственные и присвоенные. Этим же стандартом определен термин „управление качеством продукции“; одним из основных этапов управления является оценка качества.

Наиболее важное свойство, определяющее качество и эффективность приборов поиска, — способность обнаруживать те или иные объекты. Это свойство имеет вероятностно-статистическую природу, вследствие чего обнаружение объекта поиска относится к разряду случайных событий. При этом расчету может подлежать лишь вероятность обнаружения, которая характеризует степень использования продукции по назначению и поэтому является главным показателем эффективности и качества приборов поиска. Методу ее расчета и посвящена настоящая статья.

Целью поисковых действий является обнаружение объекта поиска [1]. При непрерывном пуассоновском поиске, как и в реальных условиях, обнаружение объекта за время t — случайное событие, характеризующееся вероятностью $P(t)$. Вероятность того, что объект не будет обнаружен за это время, равна $1 - P(t)$. Вероятность обнаружения объекта в последующий

бесконечно малый промежуток времени dt равна $\gamma(t)dt$. Следовательно, вероятность того, что объект поиска не будет обнаружен за время $t + dt$, определяется как

$$1 - P(t + dt) = [1 - P(t)][1 - \gamma(t)dt].$$

При $dt \rightarrow 0$ получается дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$\frac{dP(t)}{dt} = \gamma(t)[1 - P(t)],$$

которое при начальном условии $P(0) = 0$ имеет решение

$$P(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t \gamma(t)dt\right],$$

где, по определению [1], $\int_0^t \gamma(t)dt = u(t)$ — математическое ожидание числа обнаружений за время поиска, т.е. потенциал обнаружения.

Таким образом, окончательно

$$P(t) = 1 - \exp[-u(t)]. \quad (1)$$

Вероятность обнаружения является неотрицательной функцией времени и монотонно возрастает с увеличением потенциала обнаружения.

Поскольку цель поиска состоит в обнаружении объекта, постольку вероятность обнаружения есть целевая функция. Ожидаемая мера достижения поставленной цели с помощью приборов поиска определяет их эффективность и качество, а вероятность обнаружения является количественной характеристикой, выражающей эту меру. Помимо соответствия цели этот показатель удовлетворяет и таким требованиям, как наглядность, простота вычисления, критичность к условиям применения и техническим характеристикам приборов поиска. Важным достоинством выбранного показателя является ограниченность его значений.

Из выражения (1) следует, что для вычисления вероятности $P(t)$ необходимо определить потенциал обнаружения $u(t)$. Так как

$$u(t_2) = \int_0^{t_2} \gamma(t)dt = \int_0^{t_1} \gamma(t)dt + \int_{t_1}^{t_2} \gamma(t)dt = u(t_1) + \int_{t_1}^{t_2} \gamma(t)dt,$$

а $\gamma(t) \geq 0$ (по определению) и $\int_{t_1}^{t_2} \gamma(t)dt \geq 0$, то при $t_2 > t_1$ $u(t_2) \geq u(t_1)$, т.е. потенциал обнаружения является монотонной возрастающей неотрицательной функцией времени. Для его вычисления необходимо знать интенсивность обнаружения $\gamma(t)$, которая при пуассоновском

поиске не зависит от времени: $\gamma(t) = \gamma = \text{const}$.

Это соответствует предположению о равномерной плотности распределения вероятности местоположения объекта поиска (α) в обследуемом пространстве. Если объект достоверно находится в пространстве поиска, то $\alpha = 1/Q$, где Q — геометрический размер пространства.

Отсюда

$$\gamma = \Pi/Q, \quad (2)$$

$$u(t) = \int_0^t \gamma dt = \Pi t / Q, \quad P(t) = 1 - \exp(-\Pi t / Q),$$

где Π — математическое ожидание площади, обследуемой в единицу времени, т.е. производительность поиска.

При поиске с возрастающей интенсивностью каждый участок пространства обследуется только один раз. Соответственно плотность равномерного распределения вероятности местоположения объекта в течение времени возрастает:

$$\alpha = \frac{1}{Q - \Pi t}, \quad \gamma(t) = \frac{\Pi}{Q - \Pi t}.$$

Подставляя в последнее выражение значение Π из уравнения (2), получаем

$$\gamma(t) = \frac{\gamma}{1 - \gamma t},$$

откуда следует, что потенциал обнаружения

$$u(t) = -\ln(1 - \gamma t),$$

а вероятность обнаружения равна потенциалу обнаружения при пуассоновском поиске:

$$P(t) = 1 - \exp[\ln(1 - \gamma t)] = \gamma t = \Pi t / Q.$$

Для вычисления значения Π и установления соответствия вероятности обнаружения объекта техническим характеристикам прибора поиска введем необходимые определения [2, 3].

Определение 1. Линией фронта поиска называется прямая, перпендикулярная вектору относительной скорости \mathbf{v}_p .

Определение 2. Проекция объекта поиска на линию фронта поиска есть фронтальная проекция цели $l_{фр}$.

Определение 3. Величина $F = 2D + l_{фр}$ — фронт поиска, где D — дальность действия прибора.

Производительность поиска при случайном курсе φ носителя прибора поиска относительно объекта с плотностью распределения курса $f(\varphi)$ определяется следующим образом:

$$\Pi = \int_0^{2\pi} f(\varphi) F(\varphi) v_p(\varphi) d\varphi.$$

Плотность распределения курса, как правило, равномерная:

$$f(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \quad \text{при} \quad 0 < \varphi \leq 2\pi.$$

Таким образом, производительность поиска определяется двумя составляющими:

$$\Pi = \Pi_c + \Pi_{пр}.$$

Первая составляющая определяет собственную производительность поиска:

$$\Pi_c = 2D \mathbf{v}_p,$$

где вектор \mathbf{v}_p , с учетом $v_p = \sqrt{v_H^2 - v_C^2 - 2v_H v_C \cos \varphi}$, выражается через средние скорости объекта поиска (v_C), если он движется, и носителя прибора поиска (v_H) с помощью полного эллиптического интеграла второго рода $E(k, \pi/2)$:

$$\mathbf{v}_p = \frac{2(v_H + v_C)}{\pi} E(k, \pi/2), \quad k = \frac{2\sqrt{v_H v_C}}{v_H + v_C}.$$

Вторая составляющая $\Pi_{\text{пр}}$ определяет производительность поиска, приобретенную за счет пространственной протяженности объекта поиска (если он таковой обладает):

$$\Pi_{\text{пр}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [I_{\text{фр}}(\varphi)] \gamma_p(\varphi) d\varphi.$$

Величина $\Pi_{\text{пр}}$ характеризует постоянный выигрыш в эффективности при поиске протяженных объектов по сравнению с поиском объектов, относящихся к малоразмерным, и рассчитывается по специальной методике, приведенной в работах [2, 3].

Попадание объекта поиска в зону действия приборов поиска еще не означает, что он будет наверняка обнаружен. Функционирование приборов поиска подвержено воздействию помех, что и делает обнаружение объекта случайным событием. Это обусловлено тем, что полезный сигнал от объекта поиска регистрируется аппаратурой обнаружения на фоне случайных помех, и принятие решения о наличии полезного сигнала характеризуется вероятностью его правильного обнаружения. Вероятность правильного обнаружения тем выше, чем ниже некоторое пороговое значение сигнала на выходе устройства обнаружения. Поэтому при установке порога обнаружения сигнала должен использоваться критерий, позволяющий выбрать оптимальное значение порога, так как с его уменьшением растет вероятность ложных тревог. Вероятность правильного обнаружения при оптимальном пороге называется вероятностью контакта.

В режиме поиска основными задачами прибора являются обнаружение и распознавание объекта [4, 5]. Модель приемного устройства прибора поиска представляется в виде схемы оптимального обнаружителя и оптимальной схемы принятия решения в условиях неопределенности [4]. В этих условиях приемник должен обеспечивать принятие решения о справедливости или несправедливости одной из двух статистических гипотез о значении некоторого параметра λ , который априори неизвестен и определяет наличие или отсутствие полезного сигнала. Параметр λ может принимать только одно из двух значений: $\lambda=1$ (в принимаемом сигнале есть полезный сигнал от объекта поиска) и $\lambda=0$ (сигнал от объекта поиска отсутствует).

Разработанные к настоящему времени методы проверки параметрических гипотез позволяют принимать оптимальное решение на основе исследования отношения правдоподобия. Это отношение является во многих случаях достаточной статистикой для принятия решения о наличии в принимаемом сигнале полезного сигнала от объекта поиска [4, 5]. При этом решение о наличии полезного сигнала от объекта поиска принимается по результатам наблюдения принимаемого сигнала на интервале времени $(0, T)$, называемого реализацией. Иными словами, отношение правдоподобия содержит всю информацию о параметре λ , имеющуюся в реализации. Поясним это на конкретном примере принятия решения о параметре λ по результатам наблюдения напряжения (тока) $y(t)$ на выходе контактного датчика прибора поиска на конечном интервале времени $(0, T)$, что может быть записано следующим образом:

$$y(t) = \lambda s(t) + n(t); \quad 0 \leq t \leq T,$$

где $s(t)$ — ожидаемый сигнал, $n(t)$ — шум, представляющий собой реализацию случайного процесса гауссова типа.

Предположим, что существуют альтернативные гипотезы относительно параметра λ , а именно: $\lambda=0$, когда реализация сигнала $y(t)$ представляет собой только флюктуационный шум (гипотеза H_0); $\lambda=1$, если реализация содержит суперпозицию сигнала и флюктуационного шума (гипотеза H_1). Предположим, далее, что гипотезам H_0 и H_1 соответствуют многомерные плотности распределения вероятности: $p_0(y)$ и $p_1(y)$. Статистическая задача при-

нения решения в данном случае состоит в том, чтобы по результатам наблюдения реализации к моменту времени $t = T$ определить, какая из гипотез справедлива: H_0 или H_1 . Как отмечалось ранее, решение принимается на основе анализа отношения правдоподобия

$$m(y) = \frac{p_1(y)}{p_0(y)} \text{ при } t = T$$

путем сравнения его с некоторым пороговым значением m_0 .

Если $m(y) < m_0$, $t = T$, то принимается решение об отсутствии сигнала $s(t)$ в рассматриваемой реализации ($\lambda = 0$); если $m(y) > m_0$, полагается справедливой гипотеза H_1 , т.е. сигнал $s(t)$ в реализации присутствует.

Возможны два вида ошибок в рассматриваемой задаче: ошибка первого рода — полагается справедливой гипотеза H_1 , тогда как в действительности справедлива гипотеза H_0 , т.е. имеет место ложная тревога; ошибка второго рода — принимается гипотеза H_0 , тогда как справедлива гипотеза H_1 , т.е. прибором поиска допущен пропуск цели.

В зависимости от имеющейся информации о сигнале и помехе, а также принятого критерия обнаружения сигнала структура и характеристики оптимального приемника сигналов могут быть различными. Обычно в поисковых задачах используется критерий Неймана — Пирсона, в соответствии с которым при фиксированной вероятности ложной тревоги ($P_{л.тр}$) минимизируется вероятность пропуска объекта поиска или максимизируется вероятность его правильного обнаружения $P_{обн}$. Если $n(t)$ представляет собой реализацию белого гауссова шума, и речь идет об обнаружении, к примеру, радиосигнала, то в качестве отношения правдоподобия $m(y)$ может рассматриваться параметр q , определяемый соотношением [4]

$$q = \sqrt{2W/N},$$

где W — энергия сигнала, N — спектральная плотность шума.

Параметр q сравнивается с параметром h , который определяется принятым значением вероятности ложной тревоги $P_{л.тр}$.

В случае когда параметры сигнала полностью известны и шум белый, вероятность правильного обнаружения и вероятность ложной тревоги определяются следующими соотношениями:

$$P_{обн} = 0,5 - \Phi_0\left(\frac{h}{q} - q\right); \quad (3)$$

$$P_{л.тр} = 0,5 - \Phi_0\left(\frac{h}{q}\right); \quad (4)$$

$$\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-r^2/2) dt, \quad (5)$$

где $\Phi_0(x)$ — функция Лапласа (находится из таблицы спецфункций).

Из уравнений (4), (5) следует, что при заданной вероятности ложной тревоги вероятность правильного обнаружения определяется только отношением энергии сигнала к спектральной плотности шума в момент времени $t = T$ и не зависит от формы сигнала. Последний может прерываться в течение интервала наблюдения и модулироваться. Важно при этом исключить потерю энергии сигнала в процессе его преобразования на интервале наблюдения $(0, T)$. Оптимальное устройство обработки сигнала и шума должно представлять собой согласованный фильтр.

Анализ формул (3)—(5) показывает, что при фиксированном значении энергии сигнала W путем увеличения спектральной плотности шума N вероятность правильного обнаружения радиосигнала может быть сколь угодно малой, даже в том случае, когда его параметры полностью известны, а приемник является оптимальным.

Изложенный в настоящей статье теоретический подход к оценке эффективности и качества приборов поиска объектов по характеристикам назначения в дальнейшем может быть использован для решения конкретных практических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Динер И. Я. Исследование операций. Л.: Изд-во ВМОЛУА, 1969. 605 с.
2. Шишкин И. Ф., Сергушев А. Г. Эффективность поисковых средств // Проблемы машиноведения и машиностроения: Межвуз. сб. СПб.: СЗТУ, 2003. Вып. 30. С. 42—45.
3. Шишкин И. Ф., Сергушев А. Г. Теория поиска // Тр. Междунар. семинара „Интеграция информации и геоинформационные системы — 2005“ / Санкт-Петербург. Дом ученых РАН. СПб., 2005. С. 167—169.
4. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.
5. Вакин С. А., Шустов Л. Н. Основы радиоэлектронной борьбы: Учеб. пособие. М.: Изд-во ВВИА, 1998. Ч. 1. 435 с.

Сведения об авторах

Игорь Федорович Шишкин

— д-р техн. наук, профессор; Северо-Западный государственный заочный технический университет, кафедра метрологии, Санкт-Петербург; E-mail: kaf_metro@nwpi.ru

Алексей Геннадьевич Сергушев

— аспирант; Северо-Западный государственный заочный технический университет, кафедра метрологии, Санкт-Петербург; E-mail: atel@fromgu.com

Рекомендована кафедрой метрологии

Поступила в редакцию 19.11.08 г.

УДК 519.24

В. М. МУСАЛИМОВ, О. Е. ДИК, А. Е. ТЮРИН

ПАРАМЕТРЫ ДЕЙСТВИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Предложен новый метод оценивания параметров спектральной плотности энергии сигнала и детализирующих компонентов, полученных при дискретном вейвлет-разложении сигнала. Эффективность метода проверена при исследовании профилограмм поверхностей металлических образцов и анализе временных рядов кинетического тремора, возникающего при поддержании изометрического усилия руки человека.

Ключевые слова: вейвлет-преобразование, спектральная плотность сигнала, кумулята, параметры действия.

Введение. Вейвлет-преобразования широко используются для решения задач, связанных с подавлением шумов, сжатием больших объемов информации, анализом геофизических полей и сигналов, анализом электрокардиограмм, рентгенограмм и томограмм мозга [1—4].

Применение вейвлетов заключается в разложении одномерного сигнала $x(t)$ по базису, образованному сдвигами и разномасштабными копиями функции-прототипа (материнского вейвлета $\psi(t)$). Вся информация о сигнале содержится в этом довольно небольшом наборе значений. При вейвлет-преобразовании выполняется свертка сигнала с масштабирующей функцией $\phi(t)$, что дает сглаженную версию исходного сигнала. Таким образом, выделяются характерные особенности сигнала в области локализации вейвлета. К сглаженному и детализирующим компонентам применяется быстрое преобразование Фурье с последующим оцениванием спектральной плотности энергии или спектральной плотности мощности, что позволяет исследовать распределение энергии компонентов сигнала или их мощности по частотам [5, 6].

Цель настоящей статьи — представление и обсуждение оригинального метода оценки спектральной плотности энергии нестационарного сигнала с использованием компьютерных технологий на примерах анализа метрических триботехнических профилограмм и временных рядов кинетического тремора, возникающего в процессе поддержания изометрического усилия руки здорового человека и больного с синдромом паркинсонизма.

Исследование шероховатости поверхности. Профилограмма представляет собой дискретный ряд $\{x(t_i)\}_{i=1}^N$, мкм, значений пиков и впадин рельефа поверхности трибопары. Для анализа были выбраны пять фрагментов одномерного сигнала, содержащего 3500 отсчетов с базы $L=1,75$ мм. С помощью профилографа записывался профиль поверхности образцов до и после взаимодействия. В течение 1 с профилограф „проходил“ 0,25 мм поверхности, записывая новое значение через каждые 0,5 мкм с частотой дискретизации 1000 Гц. В качестве исследуемого материала использовался сплав ЛС59. Предварительно поверхность образцов была отшлифована, при этом шероховатость составила $Ra=0,22$ мкм. Исследования производились на триботехнической установке „Трибал“ [7]. Возвратно-поступательное движение исследуемых образцов относительно друг друга осуществлялось при определенной скорости их перемещения и выбранной величине нормального нагружения.

Исследование кинетического тремора. Для проведения экспериментов были привлечены 9 здоровых человек в возрасте от 40 до 52 лет и 9 больных с синдромом паркинсонизма в возрасте от 51 года до 58 лет. Испытуемые, сидя за столом перед монитором, нажимали пальцами выпрямленных рук на платформы с тензочувствительными датчиками, которые преобразовывали силу давления $y(t)$, Н, каждой руки в электрический сигнал. Благодаря жесткости платформ обеспечивалась более корректная регистрация усилия в изометрическом режиме (т.е. без движения пальцев в пространстве). Длительность регистрации составила 30 с, частота дискретизации 100 Гц. Регистрируемый сигнал изометрического усилия содержал медленный тренд и быстрый произвольный компонент (тремор). Этот компонент был выделен из полученного сигнала с помощью программы MatLab, которая использует пороговую обработку вейвлет-коэффициентов по принципу Штейна несмещенной оценки риска. С учетом жесткости тензочувствительного элемента ($r=1$ Н/мм) величина тремора определяется как $x(t)=y(t)/r$, мм.

Вейвлет-преобразование и кратно-масштабный анализ. Для дискретного сигнала $\{x(t_i)\}_{i=1}^N$ конечной длины N вейвлет-преобразование вычисляется для дискретных значений параметров масштаба $a=2^j$ и сдвига $d=k \cdot 2^j$, где k, j — целые числа, при этом вейвлет- и масштабирующие функции имеют следующий вид:

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{t}{2^j} - k\right), \quad \phi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \phi\left(\frac{t}{2^j} - k\right).$$

Тогда дискретное преобразование сигнала на j -м уровне разложения представляет собой суперпозицию вейвлетов и масштабирующих функций [8]:

$$W_j = \sum_{k=0}^{k_{\max}} a_{j,k} \varphi_{j,k}(t) + \sum_{k=0}^{k_{\max}} d_{j,k} \psi_{j,k}(t); \quad k_{\max} \leq 2^j - 1; \quad j=0, 1, \dots, m, \quad m = \text{float}(\log_2 N).$$

Для вычисления вейвлет-коэффициентов $a_{j,k}$ и коэффициентов $d_{j,k}$, которые задаются интегралами

$$a_{j,k} = \int x(t) \varphi_{j,k}^*(t) dt, \quad d_{j,k} = \int x(t) \psi_{j,k}^*(t) dt,$$

используется каскадный алгоритм [8]. На последнем уровне разложения m , который не может превышать значения $\text{float}(\log_2 N)$, формируются наборы коэффициентов аппроксимации последнего уровня и детализирующих коэффициентов всех уровней. Для восстановления сигнала по известному набору коэффициентов используется каскадный алгоритм обратного вейвлет-преобразования. В итоге анализируемый сигнал равен сумме сглаженного компонента последнего уровня (A_m) и деталей всех уровней разложения (D_m, \dots, D_1):

$$x(t_i) = A_m(t_i) + D_m(t_i) + \dots + D_1(t_i) = \sum_{k=0}^{k_{\max}} a_{m,k} \varphi_{m,k}(t) + \sum_{j=1}^m \sum_{k=0}^{k_{\max}} d_{j,k} \psi_{j,k}(t).$$

Для анализа полученных компонентов сигнала обычно применяется алгоритм быстрого дискретного преобразования Фурье с последующим оцениванием спектральной плотности энергии этих компонентов.

Параметры действия спектральной плотности энергии нестационарного сигнала.

Компоненты D_1, \dots, D_m сигнала в явной форме не содержат информации о характеристиках процесса. Для получения данных об энергетических характеристиках процесса целесообразно использовать методы цифрового спектрального анализа [9].

Спектральная плотность энергии сигнала равна квадрату фурье-преобразования сигнала:

$$E(f) = |X(f)|^2 = \left| \int x(t) e^{-2\pi i f t} dt \right|^2,$$

где $X(f)$ — спектр сигнала.

Частотное накопление спектральной плотности энергии, условно называемое кумулятой энергии, в пределах полосы частот (f_1, f_2) определяется как $\varepsilon = \int_{f_1}^{f_2} E(f) df$.

Проведем анализ размерностей величин. Его обычно связывают с конкретными характеристиками приборов: например, частотой ω_0 собственных колебаний чувствительного элемента или его приведенной жесткостью c и массой m . Учитывая константу прибора $k = \frac{c^2}{m} = \omega_0^2 c$, Н/(м·с²), введем $E_s(f) = kE(f)$, Дж. Тогда кумулята энергии будет измеряться в ваттах: Вт=Дж/с.

Примеры графиков спектральной плотности энергии и накопления энергии представлены на рис. 1, а, б соответственно, где E_{\max} — максимальное значение спектральной плотности энергии; f_{\max} — максимальная частота, соответствующая E_{\max} ; ε^* — предельное значение кумуляты энергии.

В качестве характеристик спектральной плотности энергии рассмотрим следующие величины:

$$p_1 = \frac{\varepsilon^*}{(f_2 - f_1) f_{\max}}, \quad p_2 = \frac{E_{\max}}{f_{\max}}.$$

Параметры p_1 и p_2 измеряются в джоулях в секунду (Дж·с). Разделим оба параметра на постоянную Планка $h=6,62\cdot 10^{-34}$ Дж·с, тогда номинальный и интервальный параметры действия $h_1 = \lg(p_1/h)$ и $h_2 = \lg(p_2/h)$ будут безразмерными. (Физическая величина, имеющая размерность произведения энергии на время, называется действием.)

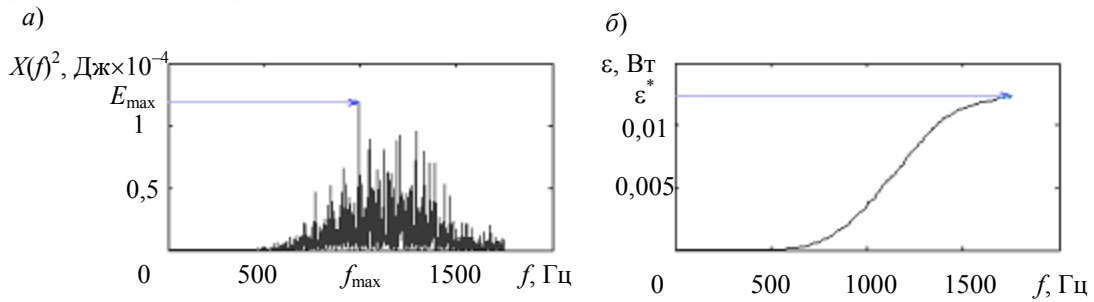


Рис. 1

Анализ профилограмм. Исходная профилограмма, записанная с поверхностей образца (трибопары) до взаимодействия, представлена на рис. 2, а, а на рис. 2, б, в — соответственно профилограммы нижней и верхней поверхностей образца после взаимодействия.

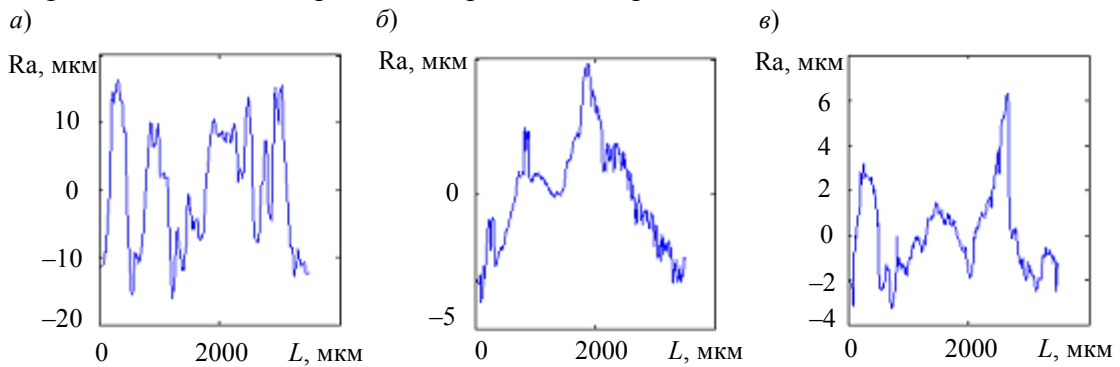


Рис. 2

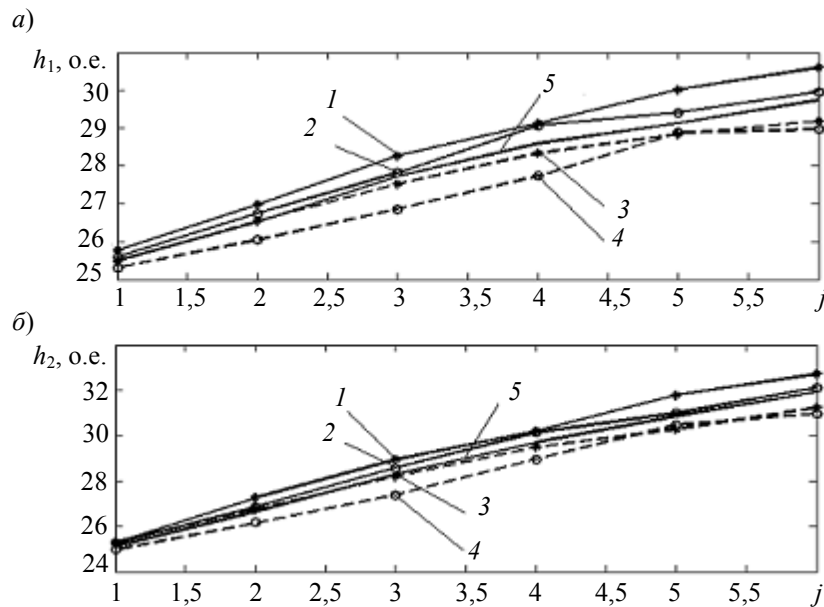


Рис. 3

Графики зависимостей параметров действия h_1 и h_2 от уровня разложения представлены на рис. 3 а, б соответственно, где приведены следующие обозначения кривых: 1 — 1-я пара трения (нижний профиль); 2 — 1-я пара трения (верхний профиль); 3 — 2-я пара трения (нижний профиль), 4 — 2-я пара трения (верхний профиль); 5 — исходный профиль.

Результаты обработки временных рядов физиологического и паркинсонического тремора. Результаты исследований быстрого произвольного компонента, или тремора сигнала (амплитудой A), полученные для здорового человека (рис. 4, *a*) и больного с синдромом паркинсонизма (рис. 4, *б*), демонстрируют двукратные отличия по амплитуде и отсутствие видимых отличий по частоте.

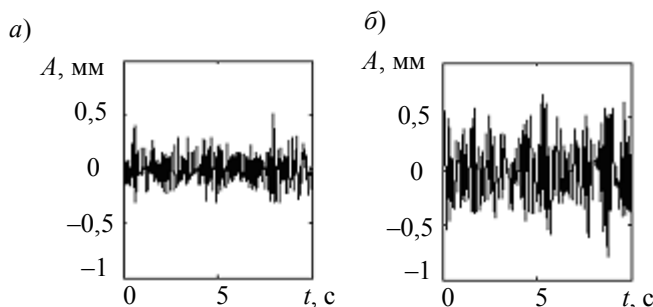


Рис. 4

Средние значения параметров действия h_1 и h_2 в зависимости от уровня разложения представлены на рис. 5 *a*, *б* соответственно, где кривая 1 отражает результаты исследования здоровых испытуемых, кривая 2 — больных с синдромом паркинсонизма. Оба параметра возрастают на каждом последующем уровне разложения. Для здоровых испытуемых средние значения h_1 и h_2 меньше значений, полученных для больных. Наибольшие отличия наблюдаются на первом уровне разложения (т.е. для высокочастотных деталей). Для параметра h_1 тангенсы углов наклона усредненных прямых равны 0,624 (для здоровых испытуемых) и 0,25 (для больных), т.е. отличаются в три раза; для параметра h_2 тангенсы углов наклона практически совпадают и равны 0,49.

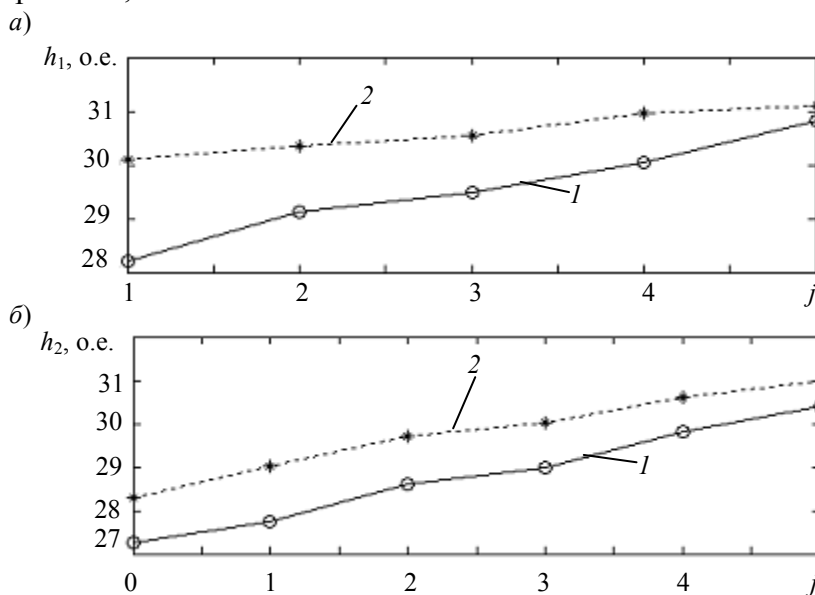


Рис. 5

Таким образом, параметр h_1 наиболее чувствителен к изменениям в состоянии человека и может служить критерием отличия спектральной плотности энергии детализирующих компонентов разложения исходных сигналов.

Заключение. Рассмотрен оригинальный метод оценки спектральной плотности энергии нестационарного сигнала с использованием компьютерных технологий. В основу оценки положены физически обоснованные номинальный и интервальный параметры действия.

На примерах анализа трибометрических профилограмм и временных рядов кинетического тремора, возникающего в процессе поддержания изометрического усилия руки здорового человека и больного с синдромом паркинсонизма, продемонстрирована эффективность

применения параметров действия. Интервальный и номинальный параметры действия используются при исследовании трибоконтактных взаимодействий различных материалов как интегральные характеристики, включая коэффициенты трения и меры шероховатости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. № 166. С. 1145—1170.
2. Crowe J. A., Gibson N. M., Woolfson M. S., Somekh M. G. Wavelet transform as a potential tool for ECG analysis and compression // J. of Biomedical Scientific Instruments. 1994. Vol. 30. P. 63—68.
3. Бойцов С. А., Гришаев С. Л., Солнцев В. Н., Кудрявцев Ю. С. Анализ сигнал-усредненной ЭКГ (по данным вейвлет-преобразования) у здоровых и больных ИБС // Вестн. аритмологии. 2001. № 23. С. 32—36.
4. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории. М.: Техносфера, 2006. 280 с.
5. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MatLab. М.: ДМК Пресс, 2005. 301 с.
6. McAuley J. H., Marsden C. D. Physiological and pathological tremors and rhythmic central motor control // Brain. 2000. Vol. 123, N 8. P. 1545—1567.
7. Мусалимов В. М., Валетов В. А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 186 с.
8. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. М.: Мир, 2005. 671 с.
9. Марпл-мл. С. Л. Цифровой и спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.

Сведения об авторах

- Виктор Михайлович Мусалимов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: musVM@yandex.ru
- Ольга Евгеньевна Дик** — канд. физ.-мат. наук; Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, Санкт-Петербург; ст. науч. сотрудник; E-mail: glazov.holo@mail.ioffe.ru
- Андрей Евгеньевич Тюрин** — магистрант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: andrey4t5@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
16.12.08 г.

Е. Н. ПЕТРОВА, К. Г. КОРОТКОВ, Д. В. ОРЛОВ, А. К. КОРОТКОВА

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И СТРУКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ

Представлены структура и описание программно-аппаратного диагностического комплекса для экспресс-оценки состояния здоровья человека. Приведены структурные схемы аппаратного и программного блоков, алгоритм работы комплекса и классификация оценок состояния организма, по которой формируется диагностическое заключение.

Ключевые слова: диагностика, диагностический комплекс, неинвазивный метод, экспресс-диагностика, функциональные системы, психофизиологическое состояние.

Одной из важнейших задач медицины является своевременная диагностика состояния организма и выявление изменений состояния на ранних стадиях. В последнее время в практической медицине большое распространение получают методы неинвазивной компьютерной диагностики функционального состояния органов и систем человека [1—3]. При этом новые методы должны обеспечивать безопасность обследования, комфортность и оперативность при высокой достоверности количественных результатов [4].

В связи с этим разработка и практическая апробация комплексной компьютеризированной системы превентивной экспресс-диагностики является важной и актуальной задачей.

Авторами настоящей статьи разработан новый унифицированный модульный программно-аппаратный комплекс (ПАК) для диагностики состояния человека. Структура и принципы работы комплекса представлены в данной статье.

Программно-аппаратный комплекс представляет собой портативный измерительный блок в комплекте с персональным компьютером. Комплекс приборов, объединенных общей программной оболочкой, позволяет осуществлять квазипостоянный мониторинг состояния ряда физиологических систем организма: сердечно-сосудистой, пищеварительной, эндокринной, мочеполовой, дыхательной, нервной.

Выбор методик, обеспечивающих работу комплекса, обусловлен, во-первых, практическими диагностическими результатами, достигнутыми при их использовании, и, во-вторых, безопасностью этих методик и комфортностью для пациентов, а также малым временем, затрачиваемым на проведение измерений (реализация каждой методики требует от 2 до 7 мин). Кроме того, используемая аппаратура отвечает требованиям компактности, что позволяет разместить все приборы в едином корпусе. Таким образом, в состав комплекса были включены аппаратные блоки, реализующие следующие диагностические методы:

- анализ variability сердечного ритма (ВСР),
- электрофотонный анализ (ЭФА),
- электросоматография (ЭСГ),
- измерение артериального давления (АД),
- эргоспирометрия (ЭСМ).

Блок, осуществляющий анализ variability сердечного ритма, отражает состояние сердечно-сосудистой системы и обеспечивает получение информации о степени напряжения регуляторных систем, что позволяет судить об адаптационных возможностях организма [5]. Важнейшим показателем состояния сердечно-сосудистой системы и организма в целом является также артериальное давление [6].

Электрофотонный анализ, основанный на методе газоразрядной визуализации (ГРВ), — это метод системной экспресс-диагностики, позволяющий определить психофизиологическое состояние человека, оценить состояние организма в целом, а также состояние его основных систем и органов [2].

При использовании метода электросоматографии проводится анализ показателей электрического сопротивления и объемной электропроводности органов, что дает характеристику основных биохимических процессов в организме и позволяет оценить состояние органов и систем [7].

Эргоспирометрические показатели позволяют оценить состояние респираторной системы, определить функциональное состояние легких и охарактеризовать функции дыхания.

Структурная схема программно-аппаратного комплекса представлена на рис. 1. Измерительный блок имеет единую лицевую панель с выходом порта USB-концентратора. Питание осуществляется от внешнего преобразователя AC/DC–110-220/12 В или от автономного блока питания 12 В (БП).

Программное обеспечение (ПО) функционирует в режиме оболочки, с его помощью осуществляется ведение базы данных пациентов, интеграция пакетов программ различных методов измерения и формирование общего заключения по унифицированной шкале. Структурная схема организации основных блоков программной оболочки и алгоритм работы программного обеспечения представлены на рис. 2 и 3.

Блок „Регистратура“ (см. рис. 2) позволяет регистрировать новых пациентов, вести анамнез пациента, корректировать данные карточек из базы данных, вести список посещений и организовывать статистический анализ по базе данных. Блок является основным окном работы с программой и обеспечивает переход к блокам „База данных“ и „Диагностика“.

Блок „База данных“ содержит информацию о пациентах, результаты проведенной диагностики и сформулированные заключения и рекомендации.

Блок „Диагностика“ предназначен для работы с аппаратными средствами диагностики, входящими в состав комплекса. Данный программный блок обеспечивает съемку диагностической информации посредством измерительных блоков, входящих в состав комплекса, а также осуществляет расчет и запись необходимых параметров, системный анализ и синтез результатов различных методов диагностики.

Блок „Психологическое тестирование“ содержит модуль психологического тестирования, результаты которого учитываются при формировании заключения.

Блок „Формирование заключения“ предназначен для комплексной оценки состояния пациента с последующим формированием общего заключения. Формирование заключения осуществляется путем сопоставления, интеграции и корреляционного анализа результатов различных методов диагностики, ранжирования полученных параметров и принятия решения в соответствии с унифицированной классификацией.

По выбранной унифицированной классификации состояние организма представляется в виде „лестницы состояний“ (рис. 4). Физиологическая норма характеризует нормальное состояние здоровья и хорошую адаптацию к условиям окружающей среды. Умеренное функциональное напряжение указывает на снижение адаптационных возможностей организма. Донозологическое состояние свидетельствует о состоянии, предшествующем болезни, при этом функциональные возможности организма и адаптация снижены. Преморбидное состояние характеризуется предпатологическим состоянием, перенапряжением регуляторных систем организма и нарушением адаптационных механизмов. Состояние срыва механизмов регуляции говорит о патологических изменениях на органно-системном уровне с резким снижением функциональных возможностей организма.

По данной классификации формируется оценка общего состояния организма и оценка состояния его основных функциональных систем. При наличии отклонений от нормы какой-либо из исследованных систем программа представляет результаты анализа органов, входящих

в данную систему, и выдает рекомендации по проведению более глубокого обследования у профильного специалиста. В программе также предусмотрена возможность вывода на печать результатов диагностики всех входящих в комплекс методик.

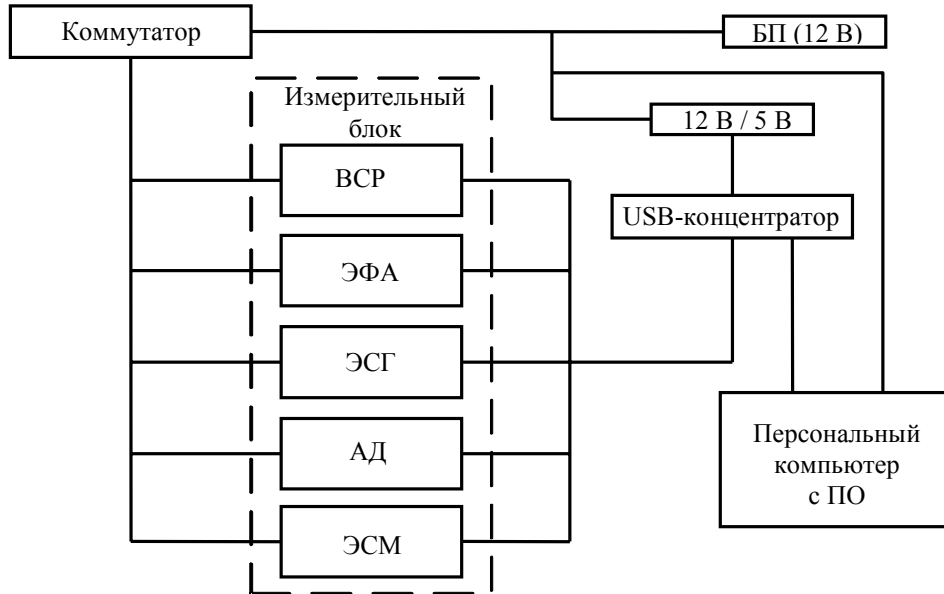


Рис. 1

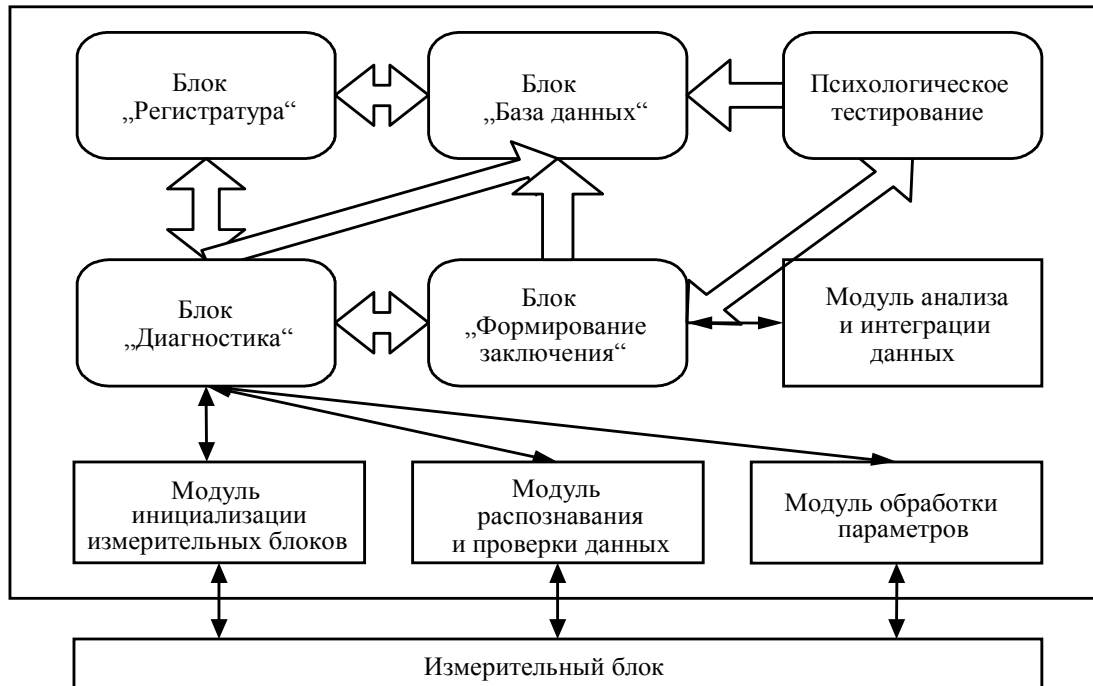


Рис. 2

Следует отметить, что обследования, проводимые с использованием программно-аппаратного комплекса, безвредны для пациентов и обслуживающего медицинского персонала, поэтому могут повторяться с любой требуемой частотой. Простота диагностических процедур и их кратковременный характер (обследование занимает 20—30 мин) обеспечивают формирование портрета функционального состояния различных органов и систем пациента, что, таким образом, позволяет реализовать принцип системности в оценке состояния здоровья человека и его резервного потенциала.

Помимо оценки здоровья, комплекс может быть использован для индивидуального подбора оздоровительных, профилактических или лечебных процедур.

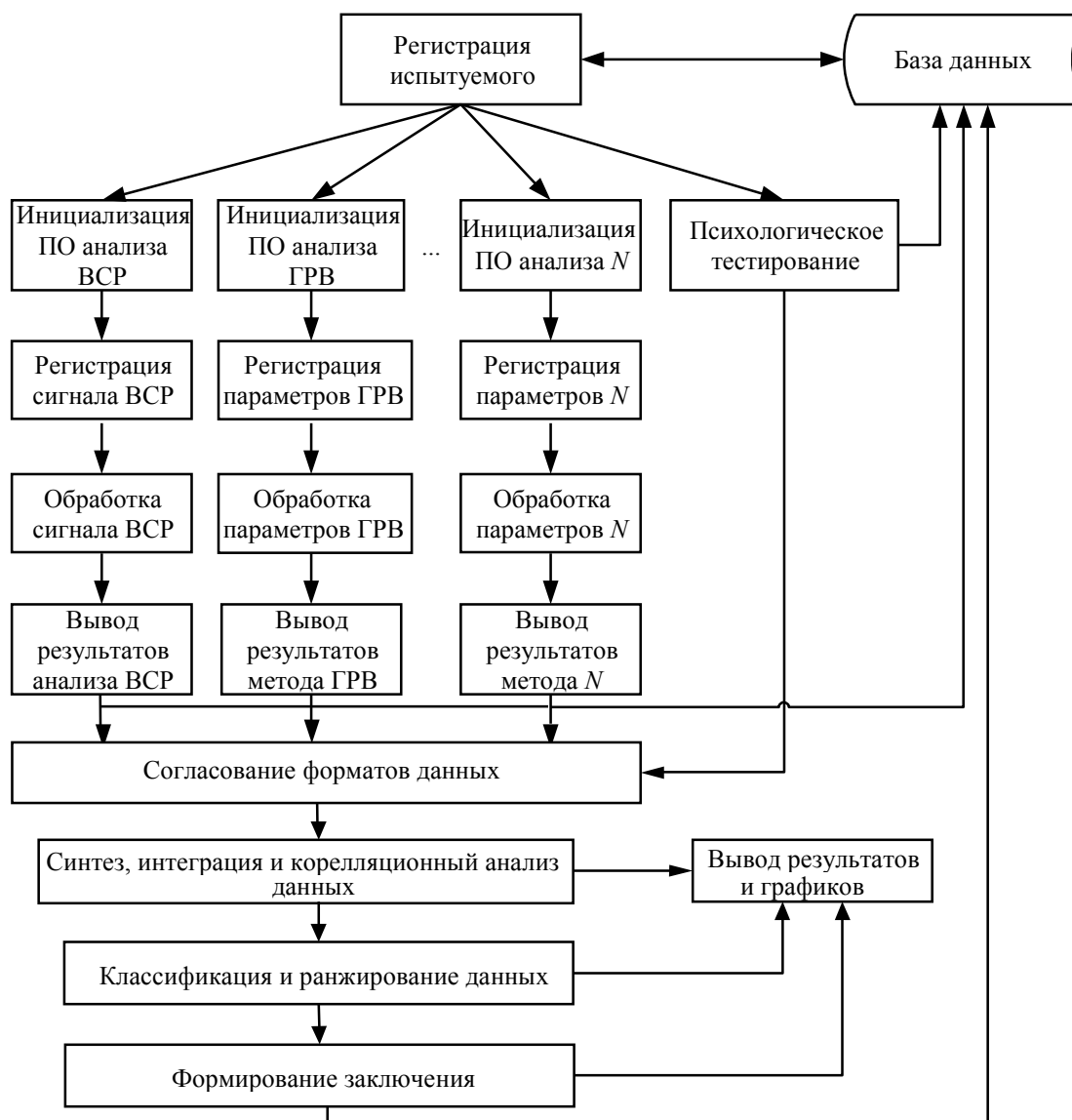


Рис. 3



Рис. 4

Основными достоинствами представленного программно-аппаратного комплекса являются:

- повышение достоверности диагностических заключений, формируемых путем интегральной оценки на базе искусственного интеллекта, на основе анализа результатов, полученных различными диагностическими методами;
- комплексная оценка состояния организма и основных функциональных систем;
- компактность, мобильность, возможность автономной работы;
- комфортность и удобство в использовании;
- малое время, требуемое на проведение исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попечителев Е. П., Корневский Н. А. Медицинские приборы, аппараты, системы и комплексы. Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 2006. Ч. 1. 156 с.
2. Коротков К. Г. Принципы анализа ГРВ-биоэлектрографии. СПб.: Изд-во „Реноме“, 2007. 286 с.
3. Родионов О. В., Некравцева Т. А. Теория биотехнических систем: Учеб. пособие. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2004. 224 с.
4. Авиалумов А. Ш., Судаков К. В., Филаретов Г. Ф. Новая информационная технология системной диагностики функциональной активности органов человека // Мед. техника. 2006, № 3. С. 13—18.
5. Машин В. А., Машина М. Н. Классификация функциональных состояний и диагностика психоэмоциональной устойчивости на основе факторной структуры показателей вариабельности сердечного ритма // Рос. физиолог. журн. 2004. Т. 90, № 12. С. 1508—1521.
6. Корневский Н. А., Попечителев Е. П., Филлист С. А. Приборы и технические средства функциональной диагностики: Учеб. пособие. Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 2004. Ч. 2. 252 с.
7. Система функциональной диагностики DDFAO [Электронный ресурс]: <www.ddfao.ru/info.php>.

Сведения об авторах

- Елена Николаевна Петрова** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: heleonores@mail.ru
- Константин Георгиевич Коротков** — д-р. техн. наук, профессор; НИИ физической культуры, Санкт-Петербург; зам. директора; E-mail: gdv@korotkov.org
- Дмитрий Владиславович Орлов** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: mitya-9@mail.ru
- Анна Константиновна Короткова** — канд. психолог. наук; НИИ физической культуры, Санкт-Петербург

Рекомендована кафедрой
проектирования компьютерных
систем СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
05.11.08 г.

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62-506.1 (047)

И. Б. ФУРТАТ, А. М. ЦЫКУНОВ

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ С НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ ЗНАКА КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ

Рассматривается адаптивное управление линейными объектами в условиях параметрической и функциональной неопределенности и при отсутствии информации о знаке коэффициента передачи. Задача решена на базе модифицированного алгоритма адаптации высокого порядка с использованием функции, позволяющей компенсировать неопределенность данного знака. Приводятся результаты численного моделирования.

Ключевые слова: адаптивное управление, модифицированный алгоритм адаптации высокого порядка, высокочастотный коэффициент усиления, наблюдатель.

Введение. При проектировании систем управления объектами необходимо учитывать знак коэффициента передачи (высокочастотного коэффициента усиления) [1—4]. Это связано с тем, что при выборе алгоритмической структуры управляющего устройства должна быть обеспечена отрицательная обратная связь. При отсутствии информации о знаке данного коэффициента возможно появление положительной обратной связи, что повлечет за собой неработоспособность системы управления.

Публикаций, посвященных решению данной проблемы, довольно мало (см., например, [5, 6]). В частности, в работе [5] предложена алгоритмическая структура управляющего устройства для стабилизации объектов, описываемых линейными дифференциальными уравнениями первого порядка с неизвестным знаком коэффициента передачи. Закон управления формируется в виде $u = N(x)y$, где $N(x) = x^2 \cos x$ — коэффициент Насбаума [5]; $\dot{x} = y^2$, y — выходной сигнал объекта управления. Если при формировании сигнала управления знак коэффициента передачи учтен неверно, то значения y и, как следствие, функции x увеличиваются. С увеличением x знак $\cos x$ изменяется на противоположный. В результате положительная обратная связь по управлению становится отрицательной.

Идея, предложенная в работе [5], была использована для построения на основе эталонной модели адаптивной системы управления объектом, коэффициент передачи которого также неизвестен [6]. В этом случае решение было получено с использованием метода расширения ошибки и включения коэффициента Насбаума в алгоритм настройки параметров управляющего устройства. Однако предложенные схемы не свободны от недостатков: в частности, система, рассматриваемая в работе [6], содержит интегратор, на вход которого подается сигнал y^2 ; при наличии возмущений значение сигнала x будет увеличиваться, что приведет к

неработоспособности системы. Кроме того, техническая реализация этой схемы, как и всякой системы, где используется метод расширенной ошибки, довольно сложна.

В настоящей статье предлагается схема адаптивного управления объектом по выходному сигналу в условиях априорной и функциональной неопределенности и при отсутствии информации о знаке коэффициента передачи. Задача решается с помощью модифицированного алгоритма адаптации высокого порядка [1, 2] с использованием устройства, позволяющего компенсировать неопределенность знака коэффициента передачи.

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

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

где $y(t) \in \mathbb{R}$ и $u(t) \in \mathbb{R}$ — входной и выходной сигналы объекта; $f(t) \in \mathbb{R}$ — неконтролируемое возмущающее воздействие; $Q(D)$, $R(D)$ — нормированные линейные дифференциальные операторы; $k \in \mathbb{R}$ — неизвестный коэффициент передачи; $D = d/dt$ — оператор дифференцирования.

Эталонная модель объекта управления задана уравнением

$$Q_m(D)y_m(t) = k_m R_m(D)r(t), \quad (2)$$

здесь $y_m(t) \in \mathbb{R}$ — выходной сигнал эталонной модели; $r(t) \in \mathbb{R}$ — задающее воздействие; $Q_m(D)$ и $R_m(D)$ — линейные дифференциальные операторы с известными коэффициентами; коэффициент k_m известен.

Целью управления является синтез закона, обеспечивающего выполнение целевого условия

$$\overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} |e(t)| = \overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} |y(t) - y_m(t)| < \delta \quad (3)$$

и ограниченность всех сигналов в замкнутой системе; здесь $e(t)$ — ошибка слежения; $\delta > 0$ — достаточно малое число.

Предположение 1. Коэффициенты операторов $Q(D)$, $R(D)$ и k — неизвестные постоянные числа, зависящие от вектора неизвестных параметров $\zeta \in \Xi$, где Ξ — известное ограниченное множество.

Предположение 2. Известны: максимально возможное начальное условие $|e(0)| \leq \delta_1$; порядки операторов $Q(D)$, $R(D)$, $Q_m(D)$ и $R_m(D)$, которые равны n , q , n и q соответственно; $\gamma = n - m > 1$ — относительная степень объекта.

Предположение 3. Полиномы $R(s)$, $Q_m(s)$, $R_m(s)$ — гурвицевы, где s — комплексная переменная в преобразовании Лапласа.

Предположение 4. Задающее воздействие $r(t)$ и возмущение $f(t)$ — ограниченные функции.

Предположение 5. В системе управления не доступны измерению производные сигналов $y(t)$, $u(t)$ и $r(t)$.

Метод решения. Предположим, что знак коэффициента k известен, и рассмотрим схему, предложенную в работах [1, 2]. Представим операторы $R(D)$ и $Q(D)$ в виде суммы: $R(D) = R_m(D) + \Delta R(D)$, $Q(D) = Q_m(D) + \Delta Q(D)$, где $\Delta R(D)$ и $\Delta Q(D)$ — остаточные многочлены, причем $\deg \Delta R(D) = q - 1$, $\deg \Delta Q(D) = n - 1$; $Q_m(D)$ и $R_m(D)$ выбираются исходя из предположений 2 и 3. Тогда с учетом выражений (1) и (2) уравнение ошибки слежения $e(t) = y(t) - y_m(t)$ можно записать следующим образом:

$$e(t) = k \frac{R_m(D)}{Q_m(D)} \left[u(t) + \frac{\Delta R(D)}{R_m(D)} u(t) - \frac{\Delta Q(D)}{k R_m(D)} y(t) + \frac{R(D)}{R_m(D)} f(t) - \frac{k_m}{k} r(t) \right]. \quad (4)$$

Введем закон управления

$$u(t) = T(D)\bar{v}(t), \quad v(t) = c^T(t)w(t), \quad (5)$$

здесь $T(D)$ — линейный дифференциальный оператор порядка $\gamma-1$, такой что полином $T(s)$ гурвицев; $\bar{v}(t)$ — оценка вспомогательного управляющего воздействия $v(t)$; $c(t)$ — вектор настраиваемых параметров; $w(t) = [V_u^T(t), V_y^T(t), y(t), g(t)]^T$ — вектор регрессии, сформированный с помощью фильтров

$$\begin{aligned} \dot{V}_y(t) &= F_y V_y(t) + by(t), \quad \dot{V}_u(t) = F_u V_u(t) + bu(t), \quad \dot{V}_r(t) = F_r V_r(t) + br(t); \\ V_y(0) &= 0, \quad V_u(0) = 0, \quad V_r(0) = 0, \quad g(t) = LV_r(t). \end{aligned} \quad (6)$$

В уравнениях (6) $V_y(t) \in \mathbb{R}^{n-1}$, $V_u(t) \in \mathbb{R}^{n-1}$, $V_r(t) \in \mathbb{R}^{\gamma-1}$ — векторы состояния фильтров; $F_y \in \mathbb{R}^{(n-1) \times (n-1)}$, $F_u \in \mathbb{R}^{(n-1) \times (n-1)}$, $F_r \in \mathbb{R}^{(\gamma-1) \times (\gamma-1)}$ — числовые матрицы в форме Фробениуса с характеристическими многочленами $R_m(s)T(s)$, $R_m(s)T(s)$ и $T(s)$ соответственно; $b = [0, \dots, 0, 1]^T$, $L = [1, 0, \dots, 0]$.

Выберем полиномы $Q_m(s)$, $R_m(s)$ и $T(s)$, так чтобы $R_m(s)T(s)Q_m^{-1}(s) = (s+a)^{-1}$, $a > 0$. Тогда с учетом выражений (5) и (6) уравнение (4) преобразуется к виду

$$\dot{e}(t) = -ae(t) + k(c(t) - c_0)^T w(t) + k\varepsilon(t) + k\varphi(t), \quad (7)$$

здесь $\varepsilon(t) = \bar{v}(t) - v(t)$; $\varphi(t) = R(D)[R_m(D)T(D)]^{-1} f(t)$ — ограниченная функция в силу предположений 3, 4 и гурвицевости полинома $T(s)$; $c_0^T = -[c_{01}^T, c_{02}^T, c_{03}, k]$ — вектор неизвестных параметров, где c_{01} — вектор, компонентами которого являются коэффициенты многочлена $\Delta R(D)$; c_{02} — вектор с коэффициентами оператора $\Delta \bar{Q}(D)$; c_{03} — скаляр, полученный при выделении целой части в выражении $\frac{\Delta Q(D)}{kR_m(D)T(D)} = c_{03} + \frac{\Delta \bar{Q}(D)}{kR_m(D)T(D)}$.

Для оценки производных сигнала $v(t)$ в уравнении (5) воспользуемся схемой, предложенной в работе [4]:

$$\dot{\xi}(t) = G_0 \xi(t) + B_0 (\bar{v}(t) - v(t)), \quad \bar{v}(t) = L\xi(t), \quad (8)$$

здесь $\xi(t) \in \mathbb{R}^{\gamma-1}$; $G_0 = \begin{bmatrix} 0 & I_{\gamma-2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$; $I_{\gamma-2} \in \mathbb{R}^{(\gamma-2) \times (\gamma-2)}$ — единичная матрица;

$$B_0 = -[b_1 \mu^{-1}, b_2 \mu^{-2}, \dots, b_{\gamma-1} \mu^{1-\gamma}]^T,$$

причем $b_1, \dots, b_{\gamma-1}$ выбираются из условия гурвицевости матрицы $G = G_0 - \bar{B}L$, где $\bar{B} = [b_1, b_2, \dots, b_{\gamma-1}]^T$, μ — достаточно малое число.

Утверждение. Пусть выполнены условия предположений, но известен знак коэффициента k . Тогда для любых коэффициентов полиномов $Q(s)$, $R(s)$ и числа k из множества Ξ существуют величины $\rho > 0$, $\sigma > 0$ и $\mu_0 > 0$, такие что при $\mu \leq \mu_0$ система уравнений (5)—(8) совместно с алгоритмом

$$\dot{c}(t) = -\text{sgn}(k)\theta(t) - \sigma e^2(t)c(t) \left(1 + e^2(t)\right)^{-1}, \quad \theta(t) = \rho e(t)w(t), \quad (9)$$

диссипативна, и выполнено целевое условие (3).

Доказательство приведено в работе [1].

Рассмотрим, далее, вариант, когда знак коэффициента k неизвестен. Для компенсации данной неопределенности сформируем алгоритм адаптации (9) в следующем виде:

$$\dot{c}(t) = -\Phi(\psi)\theta(t) - \sigma e^2(t)c(t)(1+e^2(t))^{-1}, \quad \psi(e) = \alpha - \beta\bar{\psi}(e), \quad (10)$$

где $\alpha > 0$, $\beta > 0$; $\bar{\psi}(e)$ — положительно-определенная функция; $\Phi(\psi)$ — функция, принимающая значения ± 1 и изменяющая свой знак на противоположный при превышении функцией $\beta\bar{\psi}(e)$ значения α .

Функция $\Phi(\psi)$ может быть реализована, например, на базе триггера со счетным входом, который изменяет свое состояние при изменении знака функции $\psi(e)$ с плюса на минус. Зададим $\bar{\psi}(e) = |e(t)|$. Структурная схема устройства, компенсирующего неопределенность знака коэффициента передачи, представлена на рис. 1.

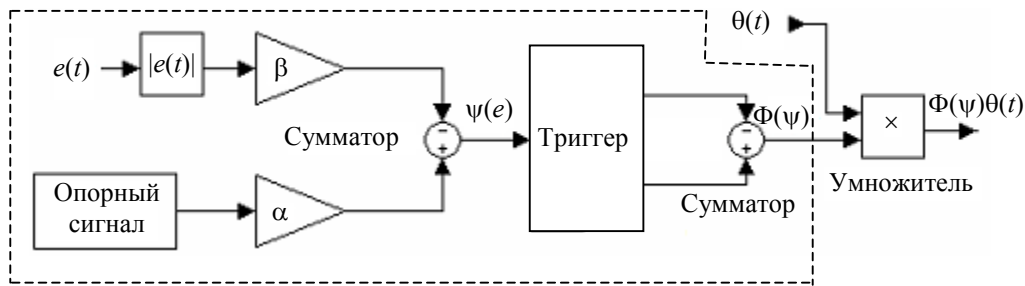


Рис. 1

Как следует из приведенного выше утверждения, если знак коэффициента k известен, то алгоритмическая структура управляющего устройства, описываемого уравнениями (5)—(9), обеспечивает выполнение условий $\lim_{t \rightarrow \infty} |e(t)| < \delta$, $\lim_{t \rightarrow \infty} |(c(t) - c_0)^T w(t)| < \delta$ и ограниченность всех сигналов в замкнутой системе.

Пусть коэффициент k неизвестен и алгоритм адаптации сформирован в виде уравнения (10). Если знак коэффициента k тот же, что и у функции $\Phi(\psi)$, то ошибка $e(t)$ уменьшается, а значит, функция $\Phi(\psi)$ не изменит знак на противоположный, так как $\beta\bar{\psi}(e(t)) < \alpha$. Если знак коэффициента k не соответствует знаку функции $\Phi(\psi)$, то ошибка $e(t)$ будет возрастать. Тогда наступит некоторый момент времени t_0 , при котором $\beta\bar{\psi}(e(t_0)) \geq \alpha$, вследствие чего функция $\Phi(\psi)$ изменит знак на противоположный, соответствующий знаку коэффициента k , и ошибка $e(t)$ начнет уменьшаться. Иными словами, применение функции $\Phi(\psi)$ позволяет компенсировать неопределенность знака коэффициента передачи k . При этом система управления, описываемая уравнениями (5)—(8), (10), обеспечивает выполнение целевого условия (3) и ограниченность всех сигналов в системе.

Замечания. 1) Выбор параметров α и β существенно зависит от начальных условий (1). Поэтому при $|e(0)| \leq \delta_1$ (предположение 2) значения α и β выбираются из условия $\alpha - \beta\delta_1 > 0$. 2) Функция $\Phi(\psi)$ может быть введена не только в формулу алгоритма адаптации, но и в закон управления $u(t) = \Phi(\psi)T(D)\bar{v}(t)$ либо $v(t) = \Phi(\psi)c^T(t)w(t)$ или в уравнение ошибки слежения $e(t) = \Phi(\psi)(y(t) - y_m(t))$.

Пример 1. Рассмотрим объект управления $(D^3 + a_2D^2 + a_1D + a_0)y(t) = ku(t)$, где a_0 , a_1 , a_2 и k считаются неизвестными. Класс неопределенности задан неравенствами:

$-50 \leq a_0 \leq 50$, $-20 \leq a_1 \leq 20$, $-10 \leq a_2 \leq 10$, $-7 \leq k \leq 7$, $|e(0)| \leq 5$. Эталонную модель определим следующим дифференциальным уравнением: $(D+1)^3 y_m(t) = r(t)$, $r(t) = 1 + \sin 7t + \sin 2t + \sin 0,5t$.

Так как относительная степень объекта управления равна 3, то зададим $T(D)$ как $T(D) = (D+1)^2$. Тогда число a в уравнении (7) равно 1, и фильтры (см. уравнения (6)) будут определяться как $\dot{V}_{y1}(t) = V_{y2}(t)$, $\dot{V}_{y2}(t) = -V_{y1}(t) - 2V_{y2}(t) + y(t)$, $V_y(0) = 0$; $\dot{V}_{u1}(t) = V_{u2}(t)$, $\dot{V}_{u2}(t) = -V_{u1}(t) - 2V_{u2}(t) + u(t)$, $V_u(0) = 0$; $\dot{V}_{r1}(t) = V_{r2}(t)$, $\dot{V}_{r2}(t) = -V_{r1}(t) - 2V_{r2}(t) + r(t)$, $V_r(0) = 0$, $g(t) = [1, 0]V_r(t)$. Значит, вектор регрессии будет составлен из следующих компонент: $w(t) = [V_u^T(t), V_y^T(t), y(t), g(t)]^T$. Наблюдатель, определяемый уравнением (8), приобретает следующий вид: $\dot{\xi}_1(t) = -\xi_2(t) - b_1\mu^{-1}(\xi_1(t) - v(t))$, $\dot{\xi}_2(t) = -b_2\mu^{-2}(\xi_1(t) - v(t))$, $\bar{B} = [b_1, b_2]^T = [3, 3]^T$, $\mu = 0,01$. Закон управления (10) и алгоритм адаптации (9) формируются как $u(t) = \xi_1(t) + 2\xi_2(t) + \dot{\xi}_2(t)$, $v(t) = c^T(t)w(t)$, $\dot{c}(t) = -\psi(e) \left[\rho e(t)w(t) + \sigma e^2(t)c(t) \left(1 + e^2(t) \right)^{-1} \right]$, где $\rho = 300$, $\alpha = 5$.

Пример 2. Зададим следующие параметры объекта управления: $a_0 = 0$, $a_1 = 15$, $a_3 = -8$, возмущающее воздействие $f(t) = 2 + \sin 1,1t + \cos 1,7t$, коэффициент передачи $k = 7 \sin(\pi t)$, начальные условия $y(0) = \dot{y}(0) = \ddot{y}(0) = 1$. При $\delta_1 = 5$ выберем в уравнении (10) $\alpha = 1$, $\beta = 1/6$ и $\bar{\psi}(e) = |e(t)|$, тогда $\alpha - \beta\delta_1 > 0$. График процессов в объекте управления и эталонной модели представлен на рис. 2.

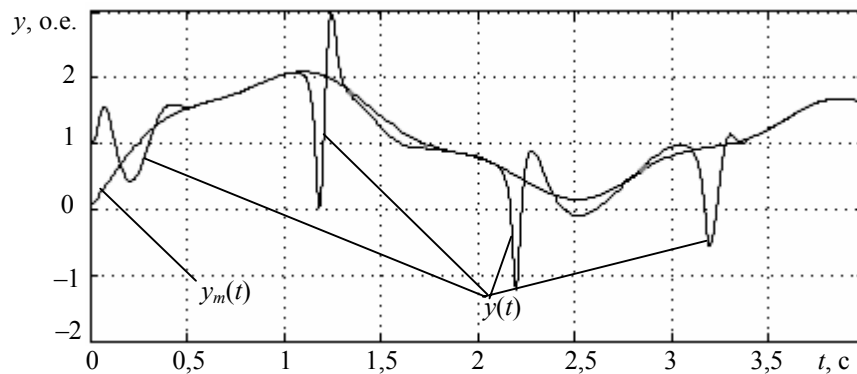


Рис. 2

При моделировании коэффициент $k = 7 \sin(\pi t)$ изменяет свой знак через каждую секунду с положительного на отрицательный, и наоборот. При $t \in [0; 1)$ с знаки коэффициента k и функции $\Phi(\psi)$ положительные, поэтому переключения знака $\Phi(\psi)$ не происходит, так как $|e(t)| < 6$. При $t \in [1; 2)$ с знак коэффициента k отрицательный, а $\Phi(\psi)|_{t=1} > 0$, вследствие чего ошибка увеличивается до некоторого момента $t_0 \in [1; 2)$, когда будет выполнено условие $|e(t_0)| = 6$. В этот момент происходит переключение знака функции $\Phi(\psi)$ с +1 на -1, и ошибка $e(t)$ уменьшается, и т.д.

Заключение. Рассмотрен способ построения алгоритмической структуры устройства для управления неопределенными линейными объектами при отсутствии информации о знаке коэффициента передачи. Предложен метод компенсации данной неопределенности,

осуществляемой с помощью функции $\Phi(\psi)$, которая является дополнением к ранее разработанному модифицированному алгоритму адаптации высокого порядка [1, 2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыкунов А. М. Модифицированный адаптивный алгоритм высокого порядка для управления линейным объектом по выходу // *АиТ*. 2006. № 8. С. 143—152.
2. Furtat I. B., Tsykunov A. M. Output adaptive control for plants using time delay in output signal based on the modified algorithm of adaptation of the high order [Электронный ресурс]: IPACS Electronic Library. 9th IFAC Workshop “Adaptation and Learning in Control and Signal Processing”. 2007, <<http://lib.physcon.ru/getfile.html?item=1528>>.
3. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.
4. Atassi A. N., Khalil H. K. A separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems // *IEEE Trans. Automat. Control*. 1999. Vol. 44, N 9. P. 1672—1687.
5. Nussbaum R. D. Some remarks on a conjecture in parameter adaptive control // *Syst. Control Lett.* 1983. Vol. 3, N 5. P. 243—246.
6. Mudgett D. R., Morse A. S. Adaptive stabilization of linear systems with unknown high-frequency gains // *IEEE Trans. on Automat. Control*. 1985. Vol. AC-30, N 6. P. 549—554.

Сведения об авторах

Игорь Борисович Фуртат

— канд. техн. наук; Астраханский государственный технический университет, кафедра математики в инженерном образовании;
E-mail: cainenash@mail.ru, furtat_i@mail.ru

Александр Михайлович Цыкунов

— д-р техн. наук, профессор; Астраханский государственный технический университет, кафедра математики в инженерном образовании;
E-mail: tsykunov_al@mail.ru

Рекомендована кафедрой
математики в инженерном образовании

Поступила в редакцию
25.03.08 г.

Д. С. КАБАНОВ

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЯДЕРНЫМ РЕАКТОРОМ С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Рассматривается задача оптимального управления ядерным реактором по неполным данным. Решение основано на принципе разделения с использованием фильтра Калмана и алгоритма оптимального управления по принципу максимума. Приведены результаты численного моделирования, которое позволило установить начальные значения параметров краевой задачи, обеспечивающие сходимость итерационной процедуры при воздействии случайных возмущений.

Ключевые слова: оптимальная фильтрация, управление по принципу максимума, метод Ньютона.

Решение задачи оптимального управления такой сложной системой, как ядерный реактор связано с трудностями, обусловленными необходимостью решения двухточечной краевой задачи. При решении по неполным данным терминальной задачи управления ядерным реактором, модель которого описывает одиночную группу медленных нейтронов [1, 2], требуется увеличить плотность потока нейтронов от исходного состояния до заданного конечного в фиксированный момент времени при минимальных затратах на управление. Использование принципа разделения и классических целевых функционалов позволяет свести алгоритм управления к уравнениям фильтра Калмана и решению двухточечной краевой задачи. Решение этой задачи связано с итерационной процедурой, сходимость которой существенно зависит от выбора начальных значений параметров краевой задачи [1, 3]. В результате применения метода Ньютона для решения этой задачи разработан алгоритм управления и рассмотрены варианты задачи с фиксированным и свободным правым концом [1, 3, 4].

Рассмотрим модель ядерного реактора в виде кинетических уравнений для размножения медленных нейтронов [1]:

$$\dot{x} = f(x, u, t) + \xi_x; \quad (1)$$

$$f(x, u, t) = (f_1, f_2)^T, \quad f_1 = \frac{(\rho - \beta)n}{\Lambda} + \lambda c, \quad f_2 = \frac{\beta}{\Lambda} n - \lambda c,$$

где $x = (n, c)^T$ — вектор состояния системы; n — поток нейтронов; c — поток возбужденных радиоактивных ядер; ρ — реактивность (принимается за управление); β — доля запаздывающих нейтронов деления по отношению к мгновенным нейтронам деления; Λ — эффективное время жизни нейтронов; λ — постоянная распада для возбужденных ядер; $\xi_x = [\xi_{xn}, 0]^T$, ξ_{xn} — случайные возмущения типа белого шума с интенсивностью $B_{xn} = \sigma_{xn}^2$. Величины β , Λ , λ считаются постоянными, а начальные значения переменных n и c заданными.

Уравнение наблюдения имеет вид

$$z = Gx + \xi_z, \quad (2)$$

где $z = z_n$ — вектор измерений параметров наблюдаемого процесса; $G = (1 \ 0)$; $\xi_z = \xi_n$ — случайный процесс типа белого шума с интенсивностью $B_z = B_{zn} = \sigma_{zn}^2$.

Требуется увеличить поток нейтронов от исходного состояния $n(t_0)$ до заданного конечного n_f в момент времени t_f при минимальных затратах на управление.

Задача рассматривалась в двух постановках:

1) с заданным граничным условием $n(t_f) = n_f$ при минимизации функционала Лагранжа

$$I = 0,5 \int_{t_0}^{t_f} \gamma \rho^2 dt;$$

2) с целевым функционалом Больца

$$I = 0,5\alpha [n(t_f) - n_f]^2 + 0,5 \int_{t_0}^{t_f} \gamma \rho^2 dt,$$

здесь α, γ — заданные коэффициенты.

В соответствии с принципом разделения задаче управления предшествует задача оценивания вектора состояния системы по неполным данным, которые определяются уравнением (2).

Оптимальную оценку вектора x можно вычислить с помощью фильтра Калмана [1, 3], уравнения которого для данной задачи имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{n}} &= \frac{\rho - \beta}{\Lambda} \hat{n} + \lambda \hat{c} + R_{11} \sigma_{zn}^{-2} (z_n - \hat{n}); \\ \dot{\hat{c}} &= \frac{\beta}{\Lambda} \hat{n} - \lambda \hat{c} + R_{21} \sigma_{zn}^{-2} (z_n - \hat{n}); \\ \dot{R} &= f_x R + R f_x^T - R G^T B_z^{-1} G R + B_x, R(t_0) = R_0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

здесь $f_x = \frac{\partial f}{\partial x}$; $R_0(1,1) = 9\sigma_{xn}^2$; $B_x = \text{diag}(B_{xn}, 0)$; остальные элементы матрицы начальных ковариаций ошибок оценивания принимались равными нулю.

Для решения второй части задачи — выбора оптимального управления по принципу максимума — полагаем, что вектор состояния известен точно и равен вектору оценок состояния, определенному в системе (3). Чтобы вывести уравнения, составляющие алгоритм управления по принципу максимума, запишем гамильтониан задачи

$$H(x, u, t) = p_n \left(\frac{\rho - \beta}{\Lambda} n + \lambda c \right) + p_c \left(\frac{\beta n}{\Lambda} - \lambda c \right) + 0,5 \gamma \rho^2.$$

Уравнения для сопряженных переменных $p = (p_n, p_c)^T$ имеют вид [1—3]

$$\dot{p}_n = -\frac{\partial H}{\partial n} = -p_n \frac{\rho - \beta}{\Lambda} - p_c \frac{\beta}{\Lambda}, \quad \dot{p}_c = -\frac{\partial H}{\partial c} = -p_n \lambda + p_c \lambda \quad (4)$$

при граничных условиях $p_n(t_f) = \alpha [n(t_f) - n_f]$ (для второго варианта постановки задачи).

Управление определяется из условия $\frac{\partial H}{\partial \rho} = 0$ как

$$\rho(t) = -\gamma^{-1} \frac{n(t)}{\Lambda} p_n(t).$$

Двухточечную краевую задачу для уравнений (1), (4) при соответствующих граничных условиях решим методом Ньютона. Для этого введем вектор невязок $\Phi = (\Phi_1, \Phi_2)^T$, $\Phi_1 = n(t_f) - n_f$, $\Phi_2 = \dot{n}(t_f) - \dot{n}_f$, неявным образом зависящий от параметров краевой задачи: $r = (p_n(t_0), p_c(t_0))^T$, здесь $\dot{n}(t_f) = f_1(t_f)$.

Значения вектора r вычисляются по следующему рекуррентному соотношению: $r_{i+1} = r_i + \Delta r$, $\Delta r = -s\Phi_r^{-1}\Phi$, где матрица частных производных Φ_r и обратная ей матрица Φ_r^{-1} задаются выражениями

$$\Phi_r = \begin{bmatrix} \Phi_{1n} & \Phi_{1c} \\ \Phi_{2n} & \Phi_{2c} \end{bmatrix}; \quad \Phi_r^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \Phi_{2c} & -\Phi_{1c} \\ -\Phi_{2n} & \Phi_{1n} \end{bmatrix},$$

где $\Phi_{1n} = \frac{\partial \Phi_1}{\partial p_n}$, $\Phi_{1c} = \frac{\partial \Phi_1}{\partial p_c}$, $\Phi_{2n} = \frac{\partial \Phi_2}{\partial p_n}$, $\Phi_{2c} = \frac{\partial \Phi_2}{\partial p_c}$; Δ — определитель матрицы Φ_r .

Ввиду неявной зависимости вектора Φ от вектора r матрица частных производных Φ_r находится численно. Скалярный множитель $s \in (0, 1]$ выбирается на каждой итерации исходя из условия $|\Phi(r_{i+1})| < |\Phi(r_i)|$, $|\Phi(r)| = \sqrt{\Phi_1^2 + \Phi_2^2}$. При достижении требований по точности решения задачи управления $|\Phi(r_{i+1})| < \varepsilon$ ($\varepsilon > 0$ — заданная малая величина) итерации прекращаются.

Вначале расчет производился для детерминированного случая в целях нахождения таких значений вектора r , при которых обеспечивается устойчивая сходимость итерационной процедуры. Задача решалась при $n(t_0) = 0,5$ кВт, $c(t_0) = 32$ кВт, $\rho(t_0) = 0$, $\beta = 0,0064$, $\Lambda = 10^{-3}$ с, $\lambda = 0,1$ с⁻¹, при этом требуемые значения следующие: $n_f = 5$ кВт, $\dot{n}_f = 0$. Для интервала оптимизации $t_f - t_0 = 1$ с, шага численного интегрирования по методу Рунге — Кутты $\Delta t = 0,1$ с, $\varepsilon = 0,1$, $\gamma = 1000$ получены следующие результаты при $r = (-0,004; -0,001)^T$: $n(t_f) = 5,021$ кВт, $\dot{n}(t_f) = 0,066$ кВт/с (за 3 итерации).

Для второго варианта постановки задачи с целевым функционалом Больца при тех же значениях вектора r и вектора невязок с компонентами $\Phi_1 = p_n(t_f) - \alpha[n(t_f) - n_f]$, $\Phi_2 = \dot{n}(t_f) - \dot{n}_f$ приемлемые результаты были получены при $\alpha = 0,000006$, $\varepsilon = 0,01$: $n(t_f) = 5,056$ кВт, $\dot{n}(t_f) = 0,000028$ кВт/с (за 12 итераций).

Решение задачи во втором варианте оказалось менее устойчивым к выбору параметров алгоритма, поэтому для решения задачи при воздействии возмущений ξ_x, ξ_z был выбран первый вариант постановки. Сравнение полученного решения с результатами применения алгоритма последовательной оптимизации [4] по иерархии целевых функционалов показало [2], что достижение реактором заданной конечной величины $n(f)$ потока нейтронов осуществляется посредством управления $\rho_{\max} = 8,86 \cdot 10^3$, тогда как в работе [2] $\rho_{\max} = 14 \cdot 10^3$. Кроме того, достигнута более высокая точность конечного значения производной $\dot{n}(t_f) = 0$ (в работе [2] значение $\dot{n}(t_f) = 0,5$ кВт/с зависит от точности итерационной процедуры подстройки модели прогнозирования). Преимущество алгоритма, рассмотренного в работе [2], заключается в малом объеме вычислений, что позволяет формировать управление в реальном времени динамики процесса.

Совместное решение задач фильтрации и управления выявило существенный недостаток рассмотренного в настоящей статье решения, обусловленный необходимостью задания параметров двухточечной краевой задачи, достаточно близких к точным значениям. Поэтому при расчете на интервале $t \in [0; 0,9]$ с для обеспечения сходимости итерационной процедуры шаг численного моделирования (Δt) принимался равным 0,02 с, а в конце расчета при $t \in (0,9; 1]$ с составил $\Delta t = 0,01$ с. Вычисления производились при следующих характеристиках случайных процессов (среднеквадратических отклонениях): $\sigma_{xn} = 0,1$ кВт/с, $\sigma_{zn} = 0,3$ кВт.

Получены следующие результаты: $n(t_f)=5,025$ кВт, $\hat{n}(t_f)=5,01$ кВт. Как видно, численное моделирование подтвердило возможность решения задачи оптимального управления стохастической моделью ядерного реактора по неполным данным с использованием принципа разделения.

Исследования, описанные в настоящей статье, выполнены по гранту Российского фонда фундаментальных исследований, № 09-08-00829.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сейдж Э. П., Уайт Ч. С. Оптимальное управление системами. М.: Радио и связь, 1982. 392 с.
2. *Kabanov D., Kabanov S.* Application of algorithm of forecasting model to the optimal control of nuclear reactor // Proc. 4th MathMOD, 5—7 Febr., 2003, Vienna. Full Papers CD. Vol. 2. P. 1466—1471.
3. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
4. *Кабанов С. А.* Управление системами на прогнозирующих моделях. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997. 200 с.

Сведения об авторе

Дмитрий Сергеевич Кабанов

— ГНПП „Регион“, Москва; инженер; E-mail: kabanovds@mail.ru

Рекомендована кафедрой
систем обработки информации и управления
БГТУ „ВОЕНМЕХ“, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию
07.12.07 г.

М. Ю. Будько

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОТОКОВ ДАННЫХ

Рассматриваются методы обнаружения широковещательных штормов и динамического построения топологии сети на основе анализа потоков данных. Описывается механизм обнаружения широковещательного шторма в сети, его источника и области поражения. Производится сравнение критериев, обеспечивающих поиск идентичных последовательностей значений интенсивности трафика. Разработано программное обеспечение для обработки статистических сведений о функционировании сети.

Ключевые слова: безопасность сети, широковещательный шторм, топология сети.

В настоящее время широкое распространение получили сети передачи данных, построенные с использованием технологии Ethernet. Несмотря на то, что физическая структура таких сетей представляет собой дерево, достаточно большие ее сегменты могут быть объединены на втором уровне модели OSI: это приводит к возникновению угроз безопасности, связанных с использованием широковещательных и групповых адресов для организации штормов в сети. В связи с этим возникает задача динамического анализа потоков данных в целях обнаружения источников дестабилизирующего воздействия на сеть и определения области поражения.

Сетевые атаки можно классифицировать по следующим признакам [1]:

- по расположению источника атаки относительно цели:
 - межсегментные, когда субъект и объект атаки находятся в разных сегментах сети; особенностью такой атаки является возможность обнаружения на границе сегмента;
 - внутрисегментные, когда субъект и объект атаки находятся в одном сегменте сети; такие атаки обнаружить сложнее, так как необходимо контролировать трафик между всеми узлами сети;
- по технологии обнаружения:
 - обнаружение известных сигнатур — наиболее распространенный способ в настоящее время, особенностями которого являются высокая надежность и достоверность обнаружения известных атак;
 - обнаружение аномалий — способ, основанный на формировании статистической модели нормального поведения сети и предусматривающий в случае его отклонения от модели формирование предупреждения об атаке; этот способ менее надежен, но в настоящее время приобретает популярность за счет своей универсальности; в частности, в некоторых случаях он незаменим: например, когда отсутствует возможность контроля трафика между пользователями одного сегмента сети.

При внутрисегментных атаках возникают некоторые трудности их обнаружения. Особенность использования метода аномалий для обнаружения внутрисегментных атак состоит в том, что для эффективного обнаружения самой атаки, выявления ее источника и области поражения необходимо знать структуру охраняемой сети. Следовательно, необходимы механизмы для автоматизации построения топологии сети.

Эффективность решения задачи анализа потоков данных зависит от средств и способов мониторинга сетевой инфраструктуры. В крупных сетях в качестве основного источника информации используется протокол SNMP, с помощью которого собираются сведения о загрузке сетевых интерфейсов коммутирующего оборудования. Считается, что этой информацией недостаточно для обнаружения угроз безопасности, и, как правило, она используется только в качестве дополнительной при наблюдении за сетевыми ресурсами. Однако, как показали проведенные исследования, даже с использованием столь ограниченных сведений можно повысить безопасность сети и получить дополнительные сведения о ее функционировании.

Сложность анализа потоков данных состоит в том, что устройства в сети опрашиваются системой мониторинга несинхронно, т.е. существует разница во времени между опросом первого и последнего устройств из списка для мониторинга. По умолчанию во многих системах сбора статистических данных максимальный интервал времени задержки составляет 300 с. Для уменьшения влияния задержки при опросе устройств данные интерполируются до момента времени, соответствующего началу опроса первого устройства.

Это приводит к различию статистических данных для двух портов, даже если весь трафик с одного из них поступает на вход другого. Соответственно показания, считанные из базы данных системы мониторинга, являются функцией от их реальных значений:

$$y(t) = f(t) + \varepsilon,$$

где $t = t_1, t_2, \dots, t_n$ — вектор значений временных меток, соответствующих началу процесса опроса устройств, где $\Delta t = (t_i - t_{i+1})$ — период опроса устройств, n — количество значений в выборке; $y = y(t_1, t_2, \dots, t_n)$ — вектор сохраненных в системе мониторинга показаний интенсивности (I) трафика, проходящего через порт; $f = f(t_1, t_2, \dots, t_n)$ — реальные значения интенсивности трафика, проходящего через порт; $\varepsilon = \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ — вектор случайных компонент, образовавшихся вследствие несинхронного опроса устройств и последующей интерполяции данных.

Было проведено исследование, в рамках которого оценивались следующие критерии обнаружения одинаковых последовательностей значений I [2, 3]:

- коэффициент d , вычисленный на основе сумм абсолютных значений остаточных разностей [4];
- коэффициент r , использующий сумму квадратов отклонений;
- коэффициент q , использующий сумму остаточных разностей, возведенную в третью степень;
- выборочный коэффициент корреляции Пирсона k_P ;
- выборочный коэффициент ранговой корреляции Кендалла k_K [5].

В качестве исходных данных использовались показания загрузки интерфейсов сетевых устройств в распределенной сети. При этом была предпринята попытка на основе статистических данных найти связанные друг с другом порты оборудования, так как очевидно, что трафик между ними должен быть одинаковым. Результаты приведены на рис. 1 и 2, где показаны степень совпадения обнаруженных связей (S) с реальной структурой сети и процент ошибочно обнаруженных соответствий (E) в зависимости от объема выборки (N).

Из рис. 2 видно, что наиболее достоверным способом обнаружения одинаковых последовательностей значений интенсивности I трафика является использование коэффициента ранговой корреляции Кендалла, при этом единственное ограничение — объем анализируемой выборки: $N \geq 15$.

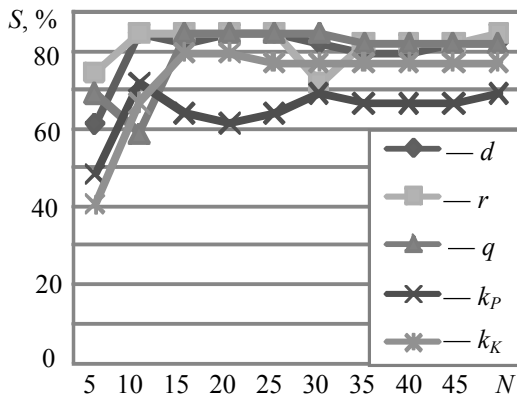


Рис. 1

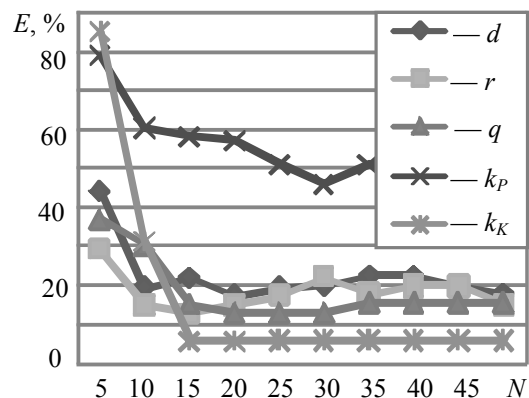


Рис. 2

Следующим этапом анализа является применение аналогичного подхода для обнаружения аномалий значений I на примере широковещательного шторма. Суть этого явления состоит в том, что несанкционированные действия какого-либо узла сети могут привести к увеличению нагрузки на широковещательный сегмент сети, а в некоторых случаях — к перегрузкам и снижению быстродействия других узлов. Это происходит вследствие того, что широковещательный трафик распространяется по всему сегменту и должен быть обработан каждым узлом сети.

Рассмотрим последовательность действий по обнаружению широковещательного шторма:

- 1) определение уровней иерархии устройств в сети с помощью предварительного построения ее структуры;
- 2) анализ трафика на устройствах нижнего уровня, так как именно они используются для подключения конечных пользователей;
- 3) составление списка устройств, у которых разность между средними для каждого порта значениями I предыдущих и последующих отсчетов превышает порог, установленный администратором сети; если разность среднеквадратичных отклонений при этом небольшая, то фиксируется начало широковещательного шторма;
- 4) определение момента окончания шторма — осуществляется так же как и определение начала шторма, только при этом фиксируется уменьшение средней интенсивности трафика;
- 5) определение формы шторма по усредненным для каждого порта значениям I за время шторма;
- 6) анализ исходящего трафика на абонентских портах сетевого оборудования в целях поиска источника шторма, при этом в качестве критерия соответствия используется коэффициент ранговой корреляции Кендалла вследствие его эффективности при обнаружении похожих последовательностей значений I .

Использование рассмотренных методов анализа статистических данных позволяет повысить информированность администраторов о процессах, которые происходят в сети. Средства динамического построения структуры сети можно интегрировать в систему управления и наблюдения за сетью и тем самым упростить ее администрирование. Возможность обнаружения широковещательных штормов позволит своевременно принимать меры для устранения источника дестабилизирующего воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Библиотека I2R [Электронный ресурс]: Классификация атак. 2002. <<http://i2r.ru>>.
2. IEEE, 802.1AB. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Station and Media Access Control Connectivity Discovery. N. Y., 2005.
3. Pat. 5,926,462 USA, МКИ6 H04L 12/28. Method of Determining Topology of a Network of Objects which Compares the Similarity of the Traffic Sequences/Volumes of a Pair of Devices / *D. Schenkel, M. Slavitch, N. Dawes*. 20.07.1999.
4. *Казиев В. М.* Введение в математику и информатику. СПб.: БИНОМ, 2007.
5. *Минько А. А.* Статистический анализ в MS Excel. М.: Изд. дом „Вильямс“, 2004.

Сведения об авторе

Михаил Юрьевич Будько — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций; E-mail: bmu@mail.ru

Рекомендована кафедрой
мониторинга и прогнозирования
чрезвычайных ситуаций

Поступила в редакцию
29.04.08 г.

УДК 004.056, 519.812.3

А. В. ГИРИК

ПРИМЕНЕНИЕ

**МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
В СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ**

Рассматриваются вопросы разработки математических моделей для сетевых систем обнаружения вторжений. Предложен метод обнаружения сетевых аномалий на основе многокритериального прогнозирования показателей безопасности. Поставлена и решена задача расчета весовых коэффициентов, учитывающих значимость моделей прогнозирования, которая может изменяться с течением времени. Предложенный подход обладает малой вычислительной сложностью и не зависит от характера критериев выбора прогнозов.

Ключевые слова: обнаружение вторжений, обнаружение сетевых аномалий, сетевая безопасность, многокритериальное прогнозирование.

Широкое распространение разнообразных информационных систем и расширение набора услуг, предоставляемых клиентам этих систем, обусловили увеличение количества информационных угроз безопасности сетей передачи данных. В связи с этим обеспечение своевременного выявления и идентификации угроз нарушения информационной безопасности является актуальной и важной проблемой. Как правило, она решается с помощью специального программного комплекса — распределенной системы обнаружения вторжений (Intrusion Detection System — IDS), которая осуществляет [1] мониторинг потоков данных в сети, анализ этих данных и выявление в анализируемых потоках данных признаков информационных угроз безопасности.

По принципу функционирования системы обнаружения вторжений делятся на два класса — выполняющие сигнатурный анализ и анализирующие статистику показателей безопасности. Особый интерес представляет обнаружение угроз безопасности сети в целом, так как последствия перегрузок, распределенных DoS-атак и других угроз, направленных на дестаби-

лизацию функционирования сети, приводят к значительным материальным потерям [1]. В общем случае угрозой можно считать аномальное поведение любого из наблюдаемых показателей безопасности. На практике показатели объединяют в группы и считают аномалию достоверно обнаруженной в случае, если поведение каждого показателя в группе идентифицировано как отклонение от нормального профиля сверх некоторого предельного значения.

Метод обнаружения сетевых аномалий в режиме реального времени заключается в следующем: выполняется мониторинг некоторого показателя безопасности, затем на основе накопленных данных строится прогноз, т.е. рассчитывается, какие значения показатель примет в ближайшее время, после чего прогноз сравнивается с реальными значениями показателя и на основании определенных критериев (в первую очередь, величины ошибки прогноза) принимается решение о наличии аномалии.

Эффективность метода зависит от точности прогноза. При решении задач обнаружения сетевых аномалий (в отличие, например, от задач планирования инфраструктуры) существует потребность в получении точных прогнозов с относительно небольшим горизонтом [2]. Для повышения точности прогноза предлагается одновременно использовать несколько моделей прогнозирования. В зависимости от времени и других факторов степень корректности моделей может изменяться, поэтому при формировании обобщенного прогноза необходимо определить степень значимости модели. Таким образом, приходим к задаче выбора весовых коэффициентов, учитывающих значимость модели, т.е. определение вклада, который вносит та или иная модель прогнозирования (тот или иной ее компонент) в формирование прогноза на очередном шаге.

Сформулированные задачи будем решать как задачи многокритериальной оптимизации [3]. Пусть имеется совокупность моделей прогнозирования $Z_k, k=1, 2, \dots, N$, которые обеспечивают формирование прогнозов с некоторым горизонтом h (т.е. на h отсчетов вперед). Степень соответствия совокупности прогнозов $X_j, j=1, 2, \dots, N$, реальным значениям параметра X определяется с помощью семейства критериев $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_S\}$, которое содержит S частных критериев. Будем считать, что каждый критерий $Q_i(X_j) \in [0, 1]$, иными словами, значение каждого частного критерия есть величина из интервала $[0, 1]$, причем „0“ означает полное несовпадение по данному критерию, а „1“ соответствует полному совпадению. Таким образом, частные критерии нормализованы и приведены к безразмерному виду. В этом случае нужно обеспечить $Q_i(X_j) \rightarrow \max$ для всех j .

Как правило, многокритериальная задача сводится к однокритериальной путем введения обобщенного критерия оптимальности F , который может быть аддитивной, мультипликативной или среднестепенной функцией частных критериев [4]. В простейшем случае можно считать, что все критерии обладают одинаковой значимостью. На практике, тем не менее, часто оказывается так, что в зависимости от времени и от исходных данных степень значимости критериев может изменяться. В этом случае каждому критерию ставится в соответствие весовой коэффициент, отражающий его значимость. Для определения значений коэффициентов используются различные методы, например диалоговый метод задания коэффициентов, в общем случае предполагающий, что лицо, принимающее решение, предоставит достаточные для расчета коэффициентов сведения [5]. Другой подход заключается в вычислении значений коэффициентов исходя из качественных характеристик критериев, например чувствительности. Будем считать, что частные критерии качественно соизмеримы между собой.

Введем следующие обозначения: $Q_i^{\text{opt}} = \max_j Q_i(X_j)$ — оптимальное значение i -го критерия для совокупности прогнозов $X_j, j=1, 2, \dots, N$; $X_i^{\text{opt}} = \arg \max_j Q_i(X_j)$ — решение (прогноз), оптимальное по i -му критерию. Рассмотрим меру

$$C_{il} = \left| \frac{Q_i^{\text{opt}} - Q_i(X_l^{\text{opt}})}{Q_i^{\text{opt}}} \right|,$$

которая определяет относительное отклонение оптимального значения i -го критерия от значения i -го критерия, полученного для оптимального решения по l -му критерию, $i, l = 1, 2, \dots, S$. Для всех возможных значений i и l построим матрицу из элементов C_{il} .

По значениям C_{il} можно судить о том, насколько чувствительным к решениям X_j является i -й критерий: для этого нужно проанализировать соответствующий столбец матрицы. Вычислим разность между максимальным и минимальным элементами всех столбцов и сформируем вектор $\mathbf{V}^T = (v_1, v_2, \dots, v_S)$, где $v_i = \max_l C_{il} - \min_l C_{il}$. Весовые коэффициенты определяются как вектор $\mathbf{W}^T = (w_1, w_2, \dots, w_S)$, где

$$w_k = v_i / \left(\sum_{i=1}^S v_i \right).$$

Таким образом, определим обобщенный критерий оптимальности для решения X_j в аддитивной форме:

$$F(X_j) = \sum_{i=1}^S w_i Q_i(X_j), \quad (1)$$

тогда оптимальное решение будет найдено как $X^{\text{opt}} = \arg \max_j F(X_j)$.

Если с течением времени предпочтения, определяющие выбор моделей, изменяются, то весовые коэффициенты для моделей прогнозирования могут быть рассчитаны с учетом динамики изменения значений обобщенного критерия. Рассчитаем эти значения для каждой из N моделей и последних M прогнозов. В результате получим матрицу \mathbf{F} , состоящую из элементов F_{kj} , где F_{kj} — значение обобщенного критерия, рассчитанного с использованием формулы (1) для k -й модели прогнозирования и прогноза X_{kj} , $j = 1, \dots, M$, $k = 1, \dots, N$. Рассчитаем весовые коэффициенты u_k для моделей следующим образом. Пусть $\alpha \in [0, 1]$ — некоторая константа, $p_k = \sum_{j=1}^M \alpha^{M-j+1} F_{kj}$, тогда

$$u_k = p_k / \left(\sum_{l=1}^N p_l \right).$$

Матрица \mathbf{F} переформируется по мере получения реальных значений параметров таким образом, чтобы значения коэффициентов отражали относительный вклад той или иной модели на очередном шаге. Если $Z_k(t)$ — k -я модель прогнозирования, то обобщенная модель процесса может быть представлена в виде

$$X(t) = \sum_{k=1}^N u_k Z_k(t). \quad (2)$$

Для расчета процесса с помощью выражения (2) необходимо заполнить матрицу \mathbf{F} , т.е. нужно, чтобы модели были настроены на обучающей выборке, составляющей, по меньшей мере, M прогнозов.

Рассмотренный в настоящей статье подход, основанный на сравнении оперативных прогнозов показателей безопасности с их нормальным профилем, позволяет обеспечить повы-

шение точности обнаружения сетевых аномалий. Необходимо также отметить, что при защите сети следует ориентироваться не только на известные в настоящее время, но и на возможные угрозы, и, кроме того, учитывать особенности поведения показателей безопасности в конкретном сетевом окружении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукацкий А. В. Системы обнаружения атак // Сетевой. 2002. № 4. С. 45—48.
2. Будько М. Б., Будько М. Ю., Гирик А. В. Применение авторегрессионного интегрированного скользящего среднего в алгоритмах управления перегрузками протоколов передачи потоковых данных // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2007. № 39. С. 319—323.
3. Рыков А. С. Методы системного анализа: многокритериальная и нечеткая оптимизация, моделирование и экспертные оценки. М.: Экономика, 1999. 191 с.
4. Гайдьшев И. Анализ и обработка данных: Спец. справочник. СПб.: Питер, 2001. 752 с.
5. Жигулин Г. П., Серебров А. И., Яковлев А. Д. Прогнозирование устойчивости и функционирования объектов с использованием теории игр и исследования операций. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. 204 с.

Сведения об авторе

Алексей Валерьевич Гирик

— аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций; E-mail: alexei.girik@googlemail.com

Рекомендована кафедрой
мониторинга и прогнозирования
чрезвычайных ситуаций

Поступила в редакцию
25.04.08 г.

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.396:681.323

С. И. ЗИАТДИНОВ

ОЦЕНКА НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛА, ВНОСИМЫХ ЭЛЕКТРОННЫМ УСИЛИТЕЛЕМ

Исследуются нелинейные искажения сигнала, вносимые электронным усилителем. Приведены результаты расчетов коэффициента нелинейных искажений для гармонического входного сигнала. Рассмотрено влияние положения рабочей точки на уровень нелинейных искажений при заданной вольт-амперной характеристике транзистора.

Ключевые слова: усиление, рабочая точка, нелинейность, искажения.

При разработке электронных усилителей необходимо решать задачу обеспечения минимальных нелинейных искажений усиливаемых сигналов.

Причиной нелинейных искажений сигнала является нелинейная вольт-амперная характеристика (ВАХ) активного элемента (транзистора) усилителя. При этом даже при выборе рабочей точки транзистора в середине линейного участка ВАХ (режима класса А) при большом уровне сигнала неизбежно возникают нелинейные искажения.

В существующей практике оценка нелинейных искажений осуществляется по уровню паразитных гармоник в выходном сигнале усилителя. При этом качество усилителя определяется коэффициентом нелинейных искажений

$$K_{н.и} = \sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2 / U_1^2},$$

где U_1 — амплитуда первой гармоники выходного сигнала усилителя; $U_i, i=2, 3, 4, \dots$ — амплитуды паразитных гармоник.

Принято считать, что для усилителя первого класса уровень паразитных гармоник не должен превышать 5 %. Вместе с тем измерение амплитуды паразитных гармоник является достаточно сложной задачей. Объективным критерием нелинейных искажений является степень отличия форм входного и выходного сигналов усилителя.

Введем в рассмотрение коэффициент нелинейных искажений

$$K_{н.и} = \sqrt{1 - R_{12}(0)}, \quad (1)$$

где $R_{12}(0)$ — коэффициент взаимной корреляции входного и выходного сигналов усилителя при отсутствии временного сдвига; коэффициент $R_{12}(0)$ определяется как

$$R_{12}(0) = \frac{B_{12}(0)}{\sigma_{вх} \sigma_{вых}}, \quad (2)$$

где $B_{12}(0)$ — взаимная корреляционная функция входного и выходного сигналов при нулевом временном сдвиге; $\sigma_{вх}$, $\sigma_{вых}$ — среднеквадратические значения входного и выходного сигналов соответственно.

На рис. 1 показана зависимость базового тока транзистора ($I_б$) от входного напряжения между базой и эмиттером ($U_{б-э}$). Значения $I_{б0}$ и $U_{б-э0}$ определяют рабочую точку транзистора. Для обеспечения линейного режима работы транзистора рабочая точка выбирается в середине линейного участка ВАХ. Относительно рабочей точки действует входной сигнал $u_{вх}(t)$, изменяя ток базы $i_б(t)$ транзистора.

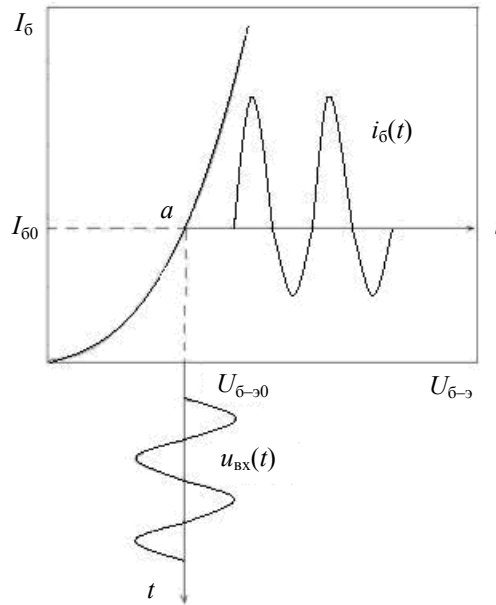


Рис. 1

Рассмотрим с общих позиций вопрос оценки нелинейных искажений с помощью коэффициента (1). Пусть ВАХ транзистора является известной функцией $y(x)$ входного сигнала $x(t)$, имеющего нулевой средний уровень и действующего относительно рабочей точки a .

Разложим функцию $y(x)$ в окрестности точки a в степенной ряд Маклорена [см. лит.]:

$$y(x) = y(a) + \frac{x}{1} y'(a) + \frac{x^2}{1 \cdot 2} y''(a) + \dots + \frac{x^n}{n!} y^{(n)}(a) + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} y^{(n)}(a) \frac{x^n}{n!}, \quad (3)$$

где $y^{(n)}(a)$ — n -я производная ВАХ в рабочей точке.

Тогда выражение для взаимной корреляционной функции $B_{12}(0)$ в соотношении (2) примет вид

$$B_{12}(0) = \overline{x(t) [y(t, a) - y(t, a)]} = \sum_{n=1}^{\infty} y^{(n)}(a) \frac{\overline{x^{n+1}(t)}}{n!}, \quad (4)$$

где черта сверху означает статистическое усреднение.

При этом среднеквадратическое значение функции $y(t)$ будет определяться выражением

$$\sigma_y = \sqrt{\overline{\left[\sum_{n=1}^{\infty} y^{(n)}(a) \frac{x^n(t) - \overline{x^n(t)}}{n!} \right]^2}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} y^{(n)}(a) y^{(m)}(a) \frac{\overline{x^{n+m}(t) - x^n(t)x^m(t)}}{n!m!}}. \quad (5)$$

С учетом соотношений (4) и (5) формула (2) может быть представлена следующим образом:

$$R_{12}(0) = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} y^{(n)}(a) \frac{\overline{x^{n+1}(t)}}{n!}}{\sigma_x \left[\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} y^{(n)}(a) y^{(m)}(a) \frac{\overline{x^{n+m}(t) - x^n(t)x^m(t)}}{n!m!} \right]^{1/2}}. \quad (6)$$

Малые значения величины $1/n!$ при $n > 5$ позволяют в выражении (6) ограничиться небольшим числом членов ряда.

На практике нелинейные искажения оцениваются при гармоническом входном сигнале $x(t) = X \sin \omega t$, где X и ω — амплитуда и круговая частота сигнала. В этом случае после несложных, но громоздких выкладок можно показать, что для нечетных степеней сигнала $x^{2k+1}(t)$ среднее значение по времени $\overline{x^{2k+1}(t)} = 0$, где $k = 0, 1, 2, \dots$, а двойная черта сверху означает временное усреднение. При этом для четных степеней сигнала $x^{2k}(t)$ нетрудно получить

$$\overline{x^2(t)} = \frac{X^2}{2}; \quad \overline{x^4(t)} = \frac{3X^4}{8}; \quad \overline{x^6(t)} = \frac{5X^6}{16}; \quad \overline{x^8(t)} = \frac{35X^8}{128} \quad (7)$$

и т. д., общей закономерности в этом случае не наблюдается.

Полученные соотношения (1), (6) и (7) позволяют исследовать нелинейные искажения сигнала при различном положении рабочей точки и характере нелинейности ВАХ транзистора.

Рассмотрим ряд частных случаев. Пусть рабочая точка определяется значениями $a = 1$ и $y(a) = 0,85$, а ВАХ транзистора содержит учитываемые первую и вторую производные $y'(a) = 1$, $y''(a) = 0,5$. Положим амплитуду входного сигнала $X = 0,2$. При этом из соотношения (3) следует, что ВАХ транзистора и его ВАХ относительно рабочей точки имеют соответственно вид

$$y^*(x^*) = 0,1 + 0,5x^* + 0,25(x^*)^2, \quad y(x) = x + 0,25x^2. \quad (8)$$

График данных функций приведен на рис. 2.

В результате соотношение (6) принимает следующий вид:

$$R_{12}(0) = \frac{\overline{x^2(t)}}{\sigma_x \left\{ \overline{x^2(t)} + 0,0625 \left\{ \overline{x^4(t)} - \left[\overline{x^2(t)} \right]^2 \right\} \right\}^{1/2}}.$$

При этом для ранее принятых значений параметров сигнала коэффициент нелинейных искажений $K_{н.и} = 1,8\%$.

Рассмотрим влияние положения рабочей точки на уровень нелинейных искажений при ранее заданной ВАХ транзистора. Для этого найдем первую и вторую производные от функции (8):

$$\left[y^*(x^*) \right]' = 0,5 + 0,5x^*; \quad \left[y^*(x^*) \right]'' = 0,5.$$

Подставим в данное выражение $x^* = a$. Тогда в рабочей точке ВАХ $y'(a) = 0,5 + 0,5a$, $y''(a) = 0,5$. При $a = 1$ получим $y'(1) = 1$, $y''(1) = 0,5$, что соответствует ранее рассмотренному случаю.

В результате выражение для относительной ВАХ принимает вид

$$y(x) = (0,5 + 0,5a)x + 0,25x^2.$$

При этом можно записать следующее соотношение для коэффициента взаимной корреляции (6):

$$R_{12}(0) = \frac{(0,5 + 0,5a) \overline{x^2(t)}}{\sigma_x \left\{ (0,5 + 0,5a)^2 \overline{x^2(t)} + 0,0625 \left\{ \overline{x^4(t)} - \left[\overline{x^2(t)} \right]^2 \right\} \right\}^{1/2}}.$$

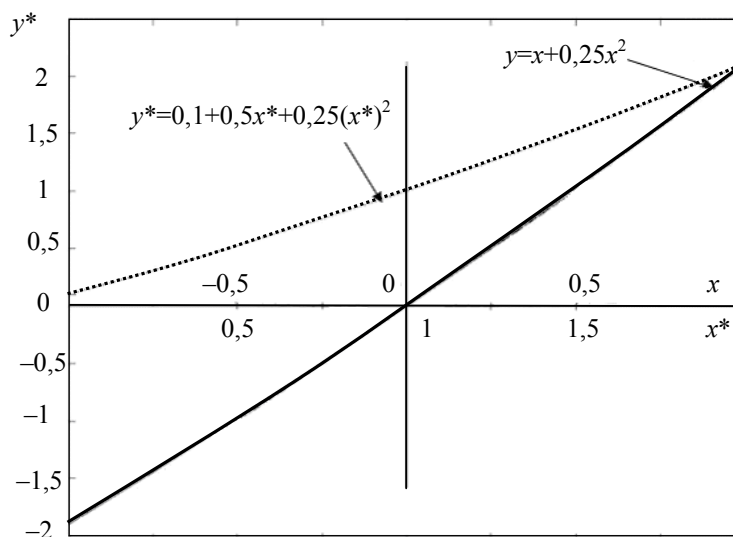


Рис. 2

Ниже приведены результаты расчетов коэффициента нелинейных искажений для различных значений параметра a (положения рабочей точки на ВАХ транзистора) и ранее принятых значений параметров сигнала.

a	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$K_{н.и}$, %	3,0	2,5	2,2	2,0	1,8	1,6

Предложенная методика исследований нелинейных искажений может быть применена для сигнала произвольной формы и вольт-амперной характеристики транзистора.

ЛИТЕРАТУРА

Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления. М.: Наука, 1965. Т. 2. С. 310.

Сведения об авторе

Сергей Ильич Зиятдинов — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра информационно-сетевых технологий; E-mail: kaf.53@GUAP.ru

Рекомендована кафедрой
информационно-сетевых технологий

Поступила в редакцию
21.03.08 г.

Ю. И. СЕНКЕВИЧ

АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕДИЦИНСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В ПОЛЯРНЫХ ЗОНАХ

Рассматривается круг задач, связанных с автоматизацией деятельности врачей, работающих в экстремальных условиях полярных зон. Приведены требования к медицинской электронной аппаратуре, используемой в ходе арктических и антарктических экспедиций. Описаны методы и решения, примененные в разработках аппаратного и программного обеспечения автоматизированного рабочего места полярного врача. Результаты исследований внедрены в медицинской информационной системе обеспечения полярных экспедиций.

Ключевые слова: телемедицинская система, автоматизированное рабочее место, дистанционный мониторинг.

Введение. Существующая проблема охраны здоровья людей, работающих в полярных зонах, непосредственно связана с практическими трудностями размещения в этих зонах многопрофильных лечебно-профилактических учреждений и сложностью оказания высококвалифицированной медицинской помощи. С расширением сети средств коммуникации (в первую очередь, космической связи) и развитием прикладной информатики появилась возможность эффективно решать задачи удаленного медицинского наблюдения и диагностики с помощью средств телемедицины [1]. Однако большинство известных методов дистанционной диагностики и консультирования не могут быть напрямую использованы в зонах Арктики и Антарктики. В связи с этим требовался поиск новых технических решений, разработка специализированных медицинских приборов и технологий, а также методов их применения. Научно-технические работы в этом направлении проводились с 1998 по 2006 гг. в Арктическом и антарктическом НИИ (Санкт-Петербург). Главная цель исследований — поиск путей автоматизации средств и методов полярной телемедицины.

Методика исследований. На начальном этапе были изучены условия функционирования электронных приборов на полярных станциях и выявлены особенности их эксплуатации. Была проведена оценка достижений мировой практики создания медицинских информационных систем для эксплуатации в экстремальных условиях. Анализ изученной информации не выявил готовых решений по реализации электронных измерительных приборов, способных, без их принципиальной доработки, функционировать в полярных зонах. Однако были найдены решения, послужившие аналогами для разработки впоследствии автоматизированного рабочего места полярного врача [2—4]. В частности, был использован опыт формирования пакетов сообщений для обмена информацией в низкоскоростных каналах спутниковой связи. Для сокращения объемов информации при обмене данными в цепи абонент (клиент) — эксперт (сервер) был применен метод шаблонов [5]. Результаты обобщения известного опыта разработок медицинских информационных систем дали возможность сконструировать экспериментальную базу дальнейших исследований, направленных на формирование структуры телемедицинской системы.

Для снижения объемов передаваемой информации использовался распределенный подход к ее обработке и оцениванию, сущность которого заключается в выполнении большинства рутинных операций (в частности, по первичной обработке клинических данных и предварительному анализу полученных результатов) непосредственно абонентом — врачом полярной станции. Таким образом, отправке в центр обработки информации подлежат уже промежуточные данные, объем которых в несколько раз меньше объема исходных данных.

Использование микропроцессорной техники на аппаратном уровне позволяет осуществлять медицинские наблюдения в реальном масштабе времени, так как все операции по оцифровке и фильтрации электрофизиологического сигнала выполняются непосредственно аппаратной частью, а в компьютер передаются уже готовые к анализу данные.

Испытания экспериментальных приборов и программ проводились в реальных условиях амбулаторий полярных станций. В процессе опытной эксплуатации удалось довести созданный стенд до действующего образца телемедицинской системы.

Эксперимент. На основе анализа реальных условий эксплуатации медицинской электронной аппаратуры на полярных станциях были сформулированы требования, которые необходимо учитывать при разработке медицинской электроники. Основные требования таковы:

— повышенная электробезопасность и защита пациентов от пробоев электропитания, что связано с отсутствием на полярных станциях физического заземления;

— повышенная помехоустойчивость, что обусловлено наличием в зонах геомагнитных вихрей, ионной активностью в атмосфере, сильными помехами в цепях электропитания нестабильных электрогенераторов;

— повышенная устойчивость к статическому электричеству, что необходимо вследствие постоянного низового скольжения снежных зарядов по поверхности ледников, несущего высоковольтный статический заряд;

— повышенная прочность, вибрационная устойчивость и износостойкость приборов, что связано с их эксплуатацией при санно-гусеничных походах, в недостаточно приспособленных помещениях амбулаторий полярных станций и на выездах в экстренных случаях неотложной помощи;

— высокая эксплуатационная надежность — вследствие отсутствия на полярных станциях специализированных ремонтных предприятий, резервных приборов и материалов, профильных специалистов;

— компактность и низкое энергопотребление, что обусловлено ограниченным объемом рабочих помещений и необходимостью использования приборов в экстремальных условиях работы передвижных амбулаторий.

На следующем этапе были разработаны и изготовлены удовлетворяющие перечисленным требованиям экспериментальные медицинские электронные приборы для проведения исследований на объектах российской антарктической экспедиции. Отличительная конструктивная особенность этой аппаратуры — унифицированный способ сопряжения приборов с персональным компьютером через последовательные порты ввода/вывода. Для этого был разработан специальный интерфейс, программная часть которого содержит функции управления с использованием внешних ключей и предоставляется в виде динамической библиотеки. Такое решение обеспечивает возможность независимого перепрограммирования часто изменяемых в ходе испытаний функций обработки данных и придает гибкость экспериментальным стендам. Схема универсального аппаратного интерфейса, созданного на основе типовой схемы с использованием перепрограммируемых микропроцессоров, представлена на рис. 1, где *a* — воспринимающее устройство (диагностическое оборудование), *б* — воздействующее устройство (терапевтическая аппаратура).

Конструктивно приборы размещены в прочном металлическом корпусе с жестким креплением вводящих и выводящих сигнальных и питающих экранированных кабелей. В схеме воспринимающих устройств входные усилители обеспечивают необходимое усиление слабых гальванических сигналов с кожных покровов тела человека. Определенным образом построенное межканальное соединение позволяет подавлять синфазные составляющие входных потенциалов. Установленные на входе усилителей защитные цепочки предохраняют устройство от возможного попадания высоковольтных импульсов статического электричества. На выходе входных усилителей установлены дополнительные развязывающие усилители, обеспечивающие

защиту входных цепей мультиплексора. Синхронизированный с мультиплексором процессор осуществляет полосовую фильтрацию сигнала, режекторное подавление сетевых наводок незаземленных измерительных приборов и преобразование цифрового сигнала для передачи в последовательных линиях связи. Были испытаны несколько модификаций цепей гальванической развязки, включая использование в качестве таковой инфракрасного приемопередающего канала.

а)



б)



Рис. 1

В общей сложности для испытаний в антарктических экспедициях были подготовлены опытные образцы таких медицинских приборов, как одно- и четырехканальный компьютерный электрокардиограф, одноканальный электроэнцефалограф, рефлексотерапевтический измеритель предельной тепловой чувствительности, измеритель систолического и диастолического кровяного давления, измеритель температуры тела. Для работы с каждым из базовых медицинских приборов были написаны соответствующие компьютерные приложения с унифицированным аппаратным и программным интерфейсом.

Научные исследования и анализ результатов практических измерений, осуществленные в период с 1998 по 2001 гг., показали, что эпизодических измерений, производимых врачами на полярных станциях, явно недостаточно для формирования целостной картины влияния климатических и геофизических факторов на состояние здоровья участников длительных зимовок: необходимы регулярные наблюдения с малым периодом между смежными измерениями. Таким образом, стала очевидной необходимость интеграции и автоматизации массовых медицинских обследований. Для решения этой задачи было использовано свойство распараллеливания функций измерений в многозадачном режиме работы приложений. При этом выбор одновременно подключаемых приборов и программ осуществляется врачом в зависимости от диагностической цели обследования пациента.

На основе синтеза подготовленных программных модулей и аппаратных решений в единую систему на следующем этапе исследований было создано автоматизированное рабочее место (АРМ) полярного врача "Ambulance YS701" [6].

Структурная схема АРМ "Ambulance YS701" представлена на рис. 2. Экспериментальный стенд имеет единую базу данных. Наличие единой системы ведения электронной документации обеспечивает возможность регистрации результатов обработки и анализа каждого из подключаемых программных модулей. Кроме того, выполняется программа статистиче-

ской и спектральной обработки электрофизиологической информации с применением средств электрофизиологического наблюдения и рефлексотерапевтической диагностики. Принципиально новыми дополнениями диагностического оборудования являются программа терапевтической коррекции функционального состояния пациента с использованием метода биологической обратной связи и программа поддержки отложенных телемедицинских консультаций.



Рис. 2

Для гибкого подключения новых приложений и замены существующих был создан специальный программный интерфейс с возможностью сохранения параметров и конфигурации в отдельном файле. Комплект программ внешних приложений [7] подключается к АРМ через этот специальный программный интерфейс. Недостающие физические последовательные СОМ-порты подключаются через дополнительный контроллер.

Использование АРМ на полярных станциях позволяет проводить массовые обследования участников экспедиций, выполнять расчеты показателей эксплуатационной надежности электронной аппаратуры, проверять ее устойчивость к влиянию специфических климатических, гео- и космофизических факторов; также была произведена оценка работоспособности и эксплуатационной пригодности разработанного программного обеспечения и апробированы возможности АРМ по сбору, обработке и передаче информации в целях организации автоматизированного документооборота.

Результаты исследований. Проведенные работы по информатизации медицинского обеспечения антарктических экспедиций позволили решить технические проблемы разработки аппаратного и программного инструментария полярного врача.

Специфика размещения арктических и антарктических станций связана с их крайней удаленностью от материка и автономностью многомесячного пребывания участников

экспедиции. Поэтому работа врача полярной станции имеет особые свойства — он должен принимать решения любой сложности самостоятельно. С внедрением (с 1998 г.) в российской антарктической экспедиции спутниковой системы связи стала возможной организация удаленных врачебных консультаций с ведущими профильными медицинскими учреждениями Санкт-Петербурга. Помимо этого, для организации удаленных исследований и профилактического контроля здоровья полярников появилась потенциальная возможность регулярно осуществлять на станциях автоматизированный мониторинг функционального состояния всех участников экспедиции. Условием внедрения современных информационных технологий стало наличие развитых средств подготовки информации и методов обмена сообщениями в сети спутниковой радиосвязи. Поэтому начиная с 2000 г. в ходе сезонных операций, выполняемых российской антарктической экспедицией, проводились исследования возможностей использования космических средств связи в целях информатизации медицинской службы: к 2003 г. все российские антарктические станции были оборудованы средствами спутниковой и цифровой коротковолновой связи.

В результате проведенных исследований и экспериментов задача автоматизации телемедицинских наблюдений в Антарктике была успешно выполнена. В настоящее время научные результаты исследований внедрены в телемедицинской системе, объединившей в себе представленные выше принципы и технологию разработки автоматизированного рабочего места врача для амбулаторий российских антарктических станций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полонников Р. И., Юсупов Р. М. Телемедицина — становление, развитие и проблемы // Телемедицина — становление и развитие: Сб. СПб.: СПИИРАН, 2000. С.15—46.
2. Pavlopoulos S., Kyriacou E., Berler A. et al. A novel emergency telemedicine system based on wireless communication technology—Ambulance // IEEE Trans. Inform. Technol. Biomed. 1998. Vol. 2. P. 261—267.
3. Perednia D. A., Allen A. Telemedicine technology and clinical applications // JAMA. 1995. Vol. 273(6) P. 483—8.
4. Дюк В., Эммануэль В. Информационные технологии в медико-биологических исследованиях. СПб.: Питер, 2003.
5. Эльянов М. М. Медицинские информационные технологии: Каталог. М.: Третья медицина, 2002. Вып. 3.
6. Сенкевич Ю. И. Автоматизированное рабочее место полярного врача // Патент на полезную модель России, № 65363. М.: РОСПАТЕНТ, 2007.
7. Компьютерные учебные программы и инновации. 2007. № 8—9 [Электронный ресурс]: <http://www.informika.ru/text/magaz/innovat/n8_2007/n8_2007.html>.

Сведения об авторе

Юрий Игоревич Сенкевич — д-р техн. наук; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, лаборатория биомедицинской информатики;
E-mail: senkevich@spiiiras.nw.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию
31.05.07 г.

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.397.681.772.7.535

В. Д. СМЕРНОВ, И. В. КНОРОЗ, С. Е. ГЕРСАНОВА

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ ПРИ МАЛОМ КОНТРАСТЕ ОБЪЕКТА К ОКРУЖАЮЩЕМУ ФОНУ

Обсуждается проблема достижения потенциальной помехоустойчивости работы оптико-электронной аппаратуры при малом контрасте регистрируемого объекта к окружающему его фону. Получены выражения, определяющие потенциальную чувствительность оптико-электронных приборов и систем при ограничении ее фотонными шумами фонового тока.

Ключевые слова: система первичной обработки информации, приемник излучения, пороговая характеристика, входной зрачок, чувствительность.

Вопросы, относящиеся к решению проблемы работы аппарата человеческого зрения (а также простейших визуальных приборов) при малом контрасте регистрируемого объекта относительно контраста фона, впервые были поставлены основоположником фундаментальной теории о квантовой природе света акад. С. И. Вавиловым и впоследствии изучались А. А. Лебедевым и А. В. Луизовым [1]. Именно эти ученые ввели понятия контраста, порогового контраста, эффективного контраста, а также порогового контраста во времени. В космическом телевидении данная проблема изучалась А. Розе, Л. Хромовым и П. Брацлавцем [2—4].

С появлением современных приемников излучения (линейных и матричных ПЗС видимого диапазона, многоэлементных инфракрасных приемников излучения), работающих в спектральном диапазоне, во много раз превышающем область спектральной чувствительности человеческого глаза, значительно расширился и круг задач, которые в целом можно определить как проблему достижения потенциальной помехоустойчивости работы оптико-электронной аппаратуры в условиях различной величины контраста регистрируемого объекта к окружающему его фону [5—7].

Цель настоящей статьи — определение потенциальной чувствительности оптико-электронных приборов и систем при ограничении ее фотонными шумами фонового потока при регистрации малоразмерных объектов в условиях малого контраста к окружающему фону.

Рассмотрим работу оптико-электронной аппаратуры, когда фоновый поток значительно больше сигнального потока регистрируемого излучения. По определению Р. Хадсона [5], в этом случае режим работы приборов относится к так называемому „ограничению фоном“ („режим ОФ“).

Ток чувствительного элемента матричного приемника излучения, обусловленный фоновым монохроматическим потоком, определяется по формуле

$$J_{\text{ф}\lambda} = eY_{\lambda} \Phi_{\text{ф}\lambda} / h\nu = \pi L_{\text{ф}\lambda} (D/f')^2 \tau_{\text{эл}} d_{\text{эл}}^2 eY_{\lambda} / 16h\nu, \quad (1)$$

где $\Phi_{\text{фл}}$ — фоновый поток от регистрируемого объекта для длины волны λ ; e — заряд электрона; $L_{\text{фл}}$ — энергетическая яркость фона; τ — коэффициент пропускания оптической системы; D — диаметр входного зрачка оптической системы; f' — фокусное расстояние оптической системы; $\pi d_{\text{эл}}^2/4$ — площадь чувствительного элемента матричного приемника излучения (в данном случае полагается, что диаметр чувствительного элемента равен диаметру кружка рассеяния оптической системы: $d_{\text{эл}} = d_{\text{кр}}$); $h\nu$ — энергия кванта; Y_{λ} — квантовый выход приемника излучения для длины волны λ .

Ток, обусловленный световым потоком от регистрируемого малоразмерного объекта, при $d_{\text{кр}} = d_{\text{эл}}$ определяется выражением

$$J_{\text{сл}} = [(\pi D^2)/4](\Delta I_{\text{сл}}/R^2)e\tau Y_{\lambda}/h\nu, \quad (2)$$

где $\Delta I_{\text{сл}}$ — энергетическая сила света малоразмерного объекта; R — расстояние от регистрируемого объекта до оптико-электронного прибора.

Ток, обусловленный шумом, на основании формулы Шоттки при известной полосе пропускания электронного тракта (Δf) определяется как

$$J_{\text{ш}} = [2e(J_{\text{сл}} + J_{\text{фл}})\Delta f]^{1/2}. \quad (3)$$

Полагая, что $J_{\text{фл}} \gg J_{\text{сл}}$, и учитывая выражения (1)—(3), для отношения сигнал/шум можно записать:

$$\rho = J_{\text{сл}}/J_{\text{ш}} = (f'D\tau^{1/2}/d_{\text{кр}})(\Delta I_{\text{сл}}/R^2)(Y_{\lambda}/\Delta f)^{1/2}1/(2L_{\text{фл}}h\nu)^{1/2}. \quad (4)$$

В выражении (4) в первых скобках заключены параметры оптической системы как основного звена оптико-электронного прибора; характеристики системы первичной обработки информации включены в третьи скобки, а вторая и четвертая пары скобок определяют внешние характеристики. Следует подчеркнуть, что выражение (4) описывает работу оптико-электронной аппаратуры в „идеальном“ режиме: регистрируемый сигнал ограничен флуктуационными шумами фонового излучения, характеризуемого большей мощностью, чем мощность полезного сигнала, — условие „малого контраста“ объекта к фону.

В общем виде контраст регистрируемого объекта к окружающему его фону определяется формулой

$$K = (L_{\text{max}} - L_{\text{min}})/(L_{\text{max}} + L_{\text{min}}) = \Delta L/(L_{\text{max}} + L_{\text{min}}).$$

В случае когда яркость фона много больше яркости регистрируемого объекта ($L_{\text{сл}}$), можно записать

$$K = \Delta L_{\text{сл}}/L_{\text{фл}}. \quad (5)$$

Учитывая, что в первых скобках выражения (4) член $(D\tau^{1/2}/d_{\text{кр}})$ характеризует усиленные свойства оптической системы и поэтому непосредственно связан с так называемым „коэффициентом усиления“ [5, 6], равным $\beta = \tau(D^2/d_{\text{кр}}^2)$, а также учитывая, что $\Delta I_{\text{сл}} = \Delta L_{\text{сл}}\Delta S$ (где ΔS — площадь регистрируемого объекта), получаем в соответствии с формулой (5) следующее выражение для отношения сигнал/шум:

$$\rho = f'(\Delta S/R^2)[(Y_{\lambda}\Delta L_{\text{сл}}\beta K\tau_a)/(2h\nu\Delta f)]^{1/2}, \quad (6)$$

где $\Delta S/R^2$ — телесный угол объекта; τ_a — коэффициент прозрачности атмосферы.

Р. Хадсоном [5] предложено определять „идеальное“ (максимально возможное) расстояние до регистрируемого объекта при отношении сигнал/шум, равном единице. На основании выражения (6) „идеальное“ расстояние определяется формулой

$$R_{\text{ид}} = (f'\Delta S)^{1/2}[(Y_{\lambda}\Delta L_{\text{сл}}\beta K\tau_a)/(2h\nu\Delta f)]^{1/4}.$$

Когда оптико-электронный прибор регистрирует малоконтрастный объект, чувствительность прибора необходимо определять по минимальной (пороговой) облученности $E_{\text{п}}$ входного зрачка оптической системы; в этом случае формулу (4) целесообразно преобразовать к виду

$$E_{\text{п}} = (2L_{\text{фл}}h\nu\Delta f)^{1/2} / [f'(Y_{\lambda}\beta\tau_a)^{1/2}].$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луизов А. В. Инерция зрения. М.: Оборонгиз, 1961.
2. Розе А. Зрение человека и электронное зрение. М.: Мир, 1977.
3. Хромов Л. И., Смирнов В. Д. Влияние параметров оптической системы на предельную чувствительность телевизионных систем // Техника средств телевидения. Сер. Техника телевидения. 1981. Вып. 4. С. 3—7.
4. Брацлавец П. Ф. и др. Космическое телевидение. М.: Связь, 1973.
5. Хадсон Р. Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972.
6. Смирнов В. Д. Оптические и оптико-электронные системы космического технического зрения для беспилотных летательных аппаратов. СПб.: Изд-во „Петербургский институт печати“, 2006.
7. Смирнов В. Д. Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника в полиграфии. СПб.: Изд-во „Петербургский институт печати“, 2000.

Сведения об авторах

- Всеволод Дмитриевич Смирнов** — д-р техн. наук, профессор; НИИ телевидения, Санкт-Петербург;
E-mail: niit@infos.ru
- Ирина Владимировна Кнороз** — аспирант; НИИ телевидения, Санкт-Петербург
- Светлана Евгеньевна Герсанова** — аспирант; НИИ телевидения, Санкт-Петербург

Рекомендована Институтом

Поступила в редакцию
12.03.08 г.

Е. Г. ЛЕБЕДЬКО, НГУЕН ВУ ТУНГ

ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЕЕ МОНОИМПУЛЬСНОМ ОБЛУЧЕНИИ

Представлен анализ основных случайных составляющих погрешности определения радиальной протяженности облучаемой поверхности, к которым относятся: шумовая погрешность, вызванная сдвигом отсчетных точек под действием шумов; погрешность, обусловленная уровнем отсчета сигнала при априорной неопределенности формы облучаемой поверхности и ее отражающих свойств; аномальная погрешность, вызванная принятием шумового выброса за сигнальный.

Ключевые слова: локация, дисперсия оценок, импульсная характеристика, радиальная протяженность.

При исследовании планет и астероидов Солнечной системы используются беспилотные аппараты и автоматические транспортные средства, которые могут спускаться на платформах с борта космических аппаратов. При их посадке, во избежание опрокидывания, возникает необходимость определения структуры рельефа посадочной поверхности. Особенно важно при этом знать перепад высот посадочной поверхности. Оперативный анализ ее рельефа должен осуществляться с достаточно больших высот; погрешности изменения перепада высот составляют десятые доли метра. Определенные перспективы для работы таких навигационных систем открывает трансформация пространственных признаков во временные в отраженном сигнале при моноимпульсной локации исследуемой поверхности. В этом случае параметры отраженного сигнала содержат информацию о пространственной структуре облученной поверхности и ее радиальной протяженности при однократном зондировании. При этом радиальная протяженность облучаемой поверхности характеризуется длительностью импульсной характеристики поверхности на нулевом уровне отсчета.

Под импульсной характеристикой поверхности понимается отраженный сигнал от поверхности, облучаемой импульсом в виде дельта-функции. Импульсная характеристика поверхности определяется зависимостью [1]

$$g_z(t) = \iint_S r(\gamma) \cos^2 \gamma \cdot \delta\left(t - \frac{2z}{c}\right) ds,$$

где S — площадь облучаемой поверхности; γ — угол между направлением облучения и нормалью к элементу поверхности ds ; $r(\gamma)$ — коэффициент яркости элемента поверхности; $\delta(t)$ — дельта-функция; c — скорость света.

Такой важный информационный параметр, как длительность импульсной характеристики поверхности изменяется вследствие того, что диаграммы излучения и приема отличаются от идеальных, зондирующий импульс не является дельта-функцией, а в условиях априорной неопределенности появления облучаемой поверхности не удается оптимизировать приемно-усилительный тракт. Перечисленные факторы определяют систематическую погрешность измерений, которую можно в определенной степени скомпенсировать в измерительной схеме приемной системы.

Наряду с этими систематическими погрешностями возникают случайные составляющие погрешностей, к которым относятся:

- 1) шумовая погрешность, вызванная сдвигом отсчетных точек под действием шумов;

2) погрешность, обусловленная уровнем отсчета сигнала при априорной неопределенности формы облучаемой поверхности и ее отражающих свойств;

3) аномальная погрешность, обусловленная принятием шумового выброса за сигнальный;

4) методическая погрешность схемы измерения временного интервала;

5) погрешность, возникающая под действием дестабилизирующих факторов, к которой, в частности, относится погрешность, вызванная условиями распространения излучения (турбулентностью атмосферы, если она имеется).

Настоящая статья посвящена анализу 1, 2 и 3-й случайных составляющих погрешностей при работе навигационной системы в отсутствие атмосферы.

1. Так как искомым информационный параметр содержится в длительности принимаемого сигнала, то дисперсия шумовой погрешности, наряду с дисперсиями оценки фиксации временного положения сигнала по фронту и спаду, в силу корреляции шума в этих точках определяется зависимостью

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{фр}}^2 + \sigma_{\text{сп}}^2 - B_2(\tau_3),$$

где $\sigma_{\text{фр}}^2$ и $\sigma_{\text{сп}}^2$ — дисперсии оценки фиксации (запаздывания) при пересечении заданного уровня фронтом и спадом сигнала на выходе приемно-усилительного тракта; $B_2(\tau)$ — корреляционная функция оценок при длительности τ_3 сигнала на уровне отсчета (фиксации).

Будем считать, что сигнал на выходе приемно-усилительного тракта симметричен, тогда $\sigma^2 = 2\sigma_{\text{фр}}^2 - B_2(\tau_3)$.

В условиях приема на фоне белого гауссова шума с энергетическим спектром G дисперсия оценки фиксации временного положения сигнала по фронту определяется зависимостью

$$\sigma_{\text{фр}}^2 = \frac{G \int_{-\infty}^{\infty} [g(t)]^2 dt}{\left[\int_{-\infty}^{\infty} s_2'(t - \tau_0^*) g(t_0 - t) dt \right]^2},$$

где $g(t)$ — импульсная характеристика приемно-усилительного тракта, который вследствие априорной неопределенности структуры облучаемой поверхности настроен на прием сигнала с параметрами зондирующего импульса; $s_2'(t - \tau_0^*)$ — производная интегральной свертки зондирующего импульса и системной импульсной характеристики поверхности, которая определяется зависимостью

$$g_s^*(t) = \iint_{S^*} \psi_1(\beta_x - \Delta_x, \beta_y - \Delta_y) \psi_2(\beta_x - \Delta_x, \beta_y - \Delta_y) r(\gamma) \cos^2 \gamma \delta(t - 2z/c) ds,$$

здесь $\psi_1(x, y)$ и $\psi_2(x, y)$ — диаграммы полей излучения и приема соответственно.

В силу того что форма оптического импульса заданной энергии незначительно влияет на обнаружение и оценку параметров принимаемых сигналов, для описания диаграмм полей излучения и приема, а также аппроксимации зондирующего импульса будем при расчетах использовать гауссовы функции. В этом случае получим следующие выражения:

$$\sigma_{\text{фр}}^2 = \frac{2G\tau_{20}^3}{\pi^2 t_0^2 a^2(\gamma)} \exp\left(\frac{t_0^2}{\tau_{20}^2}\right); \quad (1)$$

$$B_2(\tau_3) = \frac{\sqrt{2} \cdot G \tau_{20}^3 \exp\left(\pi \frac{t_0^2}{\tau_{20}^2}\right) \exp\left(-\pi \frac{\tau_{30}^2}{2\tau_{20}^2}\right)}{a^2(\gamma) \pi^2 t_0^2}, \quad (2)$$

здесь $\tau_{20} = \sqrt{\frac{\tau_0^2 + \tau_3^2}{2}}$, где τ_0 и τ_3 — длительности зондирующего импульса и системной импульсной характеристики на уровне 0,5 от максимального значения; $\tau_{30} = t_{\text{сп}} - t_{\text{фр}}$, где $t_{\text{фр}}$ и $t_{\text{сп}}$ — математические ожидания оценок фиксации сигнала по фронту и спаду соответственно; $a(\gamma)$ — значение принимаемого сигнала.

Определенный интерес представляет зависимость дисперсии оценки и корреляционной функции от уровня фиксации $1/p$. В этом случае $t_0 = \sqrt{\frac{2 \ln p}{\pi}} \cdot \tau_{20}$, и соотношения (1), (2) принимают следующий вид:

$$\sigma_{\text{фр}}^2 = \frac{G \tau_{20} p^2}{\sqrt{2} \cdot \pi a^2(\gamma) \ln p} = \frac{\sigma_{\text{ш}}^2 \tau_{20}^2 p^2}{\sqrt{2} \cdot \pi a^2(\gamma) \ln p}; \quad (3)$$

$$B_2(p) = \frac{G \tau_{20}}{\sqrt{2} \cdot \pi a^2(\gamma) p^2 \ln p} = \frac{\sigma_{\text{ш}}^2 \tau_{20}^2}{\sqrt{2} \cdot \pi a^2(\gamma) p^2 \ln p}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{ш}}^2 = G/\tau_{20}$ — дисперсия шумов на выходе приемно-усилительного тракта.

Таким образом, с учетом выражений (3) и (4) дисперсия шумовой погрешности определяется зависимостью

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_{\text{ш}}^2 \tau_{20}^2}{\sqrt{2} \cdot \pi a^2(\gamma) \ln p} \left(2p^2 - \frac{1}{p^2} \right). \quad (5)$$

На рис. 1 приведен график зависимостей σ^2 , $\sigma_{\text{фр}}^2$ и B_2 от уровня фиксации сигнала.

Нормировка проводилась при условии, что $\frac{\sigma_{\text{ш}}^2 \tau_{20}^2}{\sqrt{2} \cdot \pi a^2(\gamma)} = 1$.

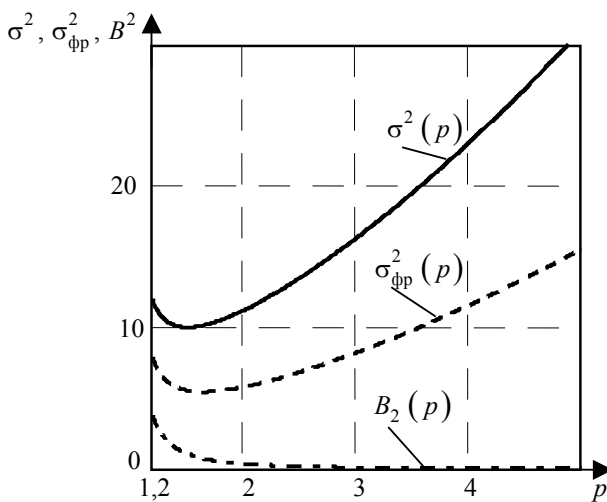


Рис. 1

Как видно из приведенных графиков, величины σ^2 и $\sigma_{\text{фр}}^2$ имеют минимальное значение при $1/p = 1/\sqrt{e}$. Минимальное значение дисперсии оценки фиксации сигнала будет при максимальном значении производной сигнала (для гауссовой функции этот уровень составляет $1/\sqrt{e}$).

В соответствии с формулой (5) и рис. 1 можно сделать заключение о том, что основной вклад в шумовую погрешность вносит дисперсия оценки фиксации по фронту.

2. Истинное значение временной протяженности облучаемой поверхности (τ_1)

пропорционально длительности импульсной характеристики, отсчитанной на нулевом уровне. При заданном уровне отсчета значения длительностей импульсных характеристик для

различных поверхностей при одинаковой их радиальной протяженности различны и зависят от формы поверхности.

Этот вопрос чрезвычайно важен, так как даже в теоретически идеальном случае, когда поверхность облучается равномерным круглым полем с временной функцией в виде δ -функции и отраженный сигнал является импульсной характеристикой поверхности, вследствие воздействия шума уровень отсчета необходимо выбирать, исходя из заданных вероятностных характеристик принятия решения. А так как уровень отсчета не нулевой, и форма облучаемой поверхности неизвестна, то обусловленная этим факторами погрешность является случайной и скомпенсировать ее не удастся.

Следует отметить, что, например, при выборе уровня отсчета, равным 0,5 от максимального значения импульсной характеристики, относительная погрешность определения временной протяженности поверхности может достигать 50 % даже для элементарных поверхностей, рассмотренных в работе [2]. Анализ этой погрешности произведем на примере двух поверхностей — наклонной плоскости и конуса, импульсные характеристики которых наиболее известны и длительность их описывается различными функциями от уровня отсчета (что и вызывает погрешность). При этом временная протяженность поверхностей одинакова.

На рис. 2 приведены диаграммы изменения относительной погрешности Δ определения временной протяженности поверхности в зависимости от уровня отсчета при двух значениях длительности зондирующего импульса: a — $\tau_0 = \tau_1/2$, b — $\tau_0 = 2\tau_1/3$. На графиках кривая 1 соответствует уровню отсчета, равному 0,5, а кривые 2 и 3 — уровням 0,35 и 0,25 соответственно.

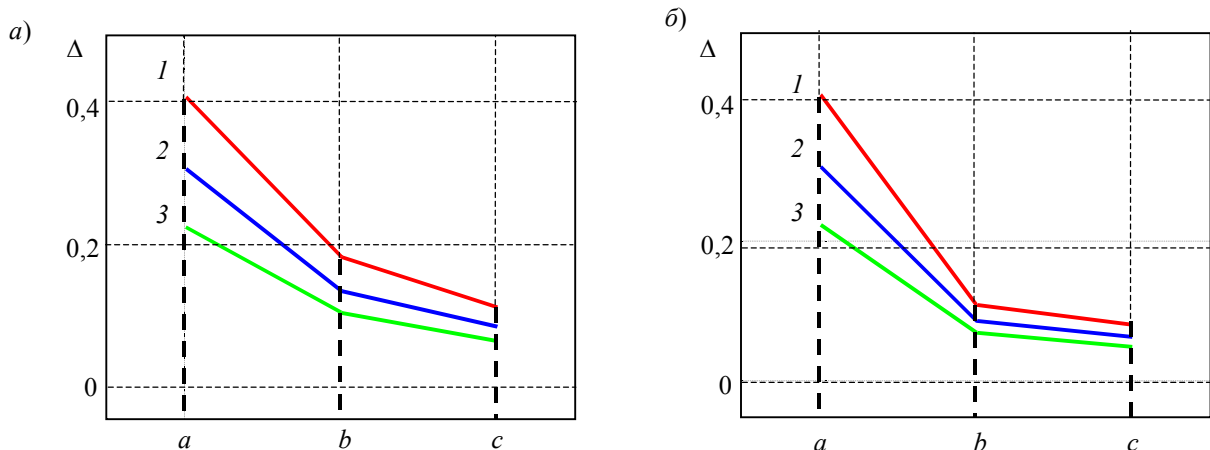


Рис. 2

Диаграммы построены для трех позиций: первая a — для импульсных характеристик поверхностей, когда их первичные информационные параметры не искажены; вторая b — для отраженных сигналов, когда искажение информационных параметров обусловлено длительностью и формой зондирующего импульса, а также полями излучения и приема; третья c — для выходных сигналов, в которых происходит дополнительное искажение первичных информационных параметров в приемно-усилительном тракте.

Как видно из представленных диаграмм, относительная погрешность определения радиальной протяженности облучаемой поверхности сокращается как по мере роста искажений информационных параметров, так и с уменьшением уровня отсчета. Следует отметить, что минимизация этой погрешности требует энергетических затрат и соответствующей технической реализации системы.

3. В условиях, когда отношение порог/шум недостаточно велико, принятие шумового выброса за сигнальной может привести к результатам, отличным от истинных значений оценок длительности принимаемого сигнала. Ошибки, обусловленные принятием шумового

выброса за сигнальный и выводящие оценку параметра за пределы протяженности сигнальной функции, называются аномальными.

Дисперсия аномальной погрешности определяется зависимостью

$$\sigma_a^2 = P_{\text{л.тр}}^2 \sigma_\tau^2,$$

где $P_{\text{л.тр}}$ — вероятность ложной тревоги, σ_τ — среднее квадратическое значение длительности шумового выброса на пороговом уровне C .

Так как вероятность ложной тревоги в задачах анализа рельефа поверхности может составлять величину $10^{-3} \dots 10^{-5}$, а следовательно, отношение порога к шуму $\mu_0 = C/\sigma_{\text{ш}} \approx 5 \dots 7$, то для $C > 0$ большинство положительных выбросов имеют малую длительность. В этом случае поведение дифференцируемого случайного процесса при $C > 0$ аппроксимируют параболой [3, 4], и плотность вероятности длительности выбросов случайного процесса определяется соотношением [5]

$$W(\tau, C) = \frac{1}{4}(-b_0'')\mu_0^2\tau \exp\left[-\frac{1}{8}(-b_0'')\mu_0^2\tau^2\right]; \tau > 0, \mu_0 = \frac{C}{\sigma_{\text{ш}}} \gg 1, \quad (6)$$

где $-b_0'' = \frac{1}{2\pi\sigma_{\text{ш}}^2} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 G(\omega) d\omega$ — мощность производной случайного процесса; $\sigma_{\text{ш}}^2 = B_2(0)$;

$G(\omega)$ — энергетический спектр шумов.

С учетом выражения (6) дисперсия длительности шумового выброса

$$\sigma_\tau^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [\tau - \tau(C)]^2 \frac{1}{4}(-b_0'')\mu_0^2\tau \exp\left[-\frac{1}{8}(-b_0'')\mu_0^2\tau^2\right] d\tau,$$

где $\tau(C)$ — средняя длительность выброса случайного процесса на уровне C :

$$\tau(C) = \frac{2\pi}{\sqrt{-b_0''}} [1 - \Phi(\mu_0)] \exp\left(\frac{\mu_0^2}{2}\right),$$

здесь $\Phi(\mu_0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\mu_0} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$ — интеграл вероятностей.

Произведем анализ аномальной погрешности при условиях оптимальной фильтрации принимаемого сигнала гауссовой формы на фоне белого нормального шума. Тогда

$$\sigma_\tau^2 = \left\{ \frac{8\tau_{20}^2}{\pi\mu_0^2} \left[\frac{\pi^2\mu_0^2 (\operatorname{erfc}(\mu_0))^2 \exp(\mu_0^2)}{2} - \sqrt{\frac{\pi^3}{2}} \cdot \operatorname{erfc}(\mu_0) \exp\left(\frac{\mu_0^2}{2}\right) + 1 \right] \right\}, \quad (7)$$

где $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$, $\operatorname{erf}(x)$ — функция Крампа.

Результаты расчетов σ_τ по формуле (7) сведены в таблице.

μ_0	σ_τ , с, при $\tau_{20}=2 \cdot 10^{-8}$ с	σ_τ , с, при $\tau_{20}=5 \cdot 10^{-8}$ с	σ_τ , с, при $\tau_{20}=10^{-7}$ с
3	$1,06 \cdot 10^{-8}$	$2,649 \cdot 10^{-8}$	$5,299 \cdot 10^{-8}$
4	$0,789 \cdot 10^{-8}$	$1,995 \cdot 10^{-8}$	$3,989 \cdot 10^{-8}$
5	$0,638 \cdot 10^{-8}$	$1,596 \cdot 10^{-8}$	$3,192 \cdot 10^{-8}$
7	$0,456 \cdot 10^{-8}$	$1,14 \cdot 10^{-8}$	$2,28 \cdot 10^{-8}$

Как следует из приведенных рассуждений, не всегда можно пренебрегать аномальной погрешностью: необходимо ее учитывать при оценке временной протяженности облучаемой поверхности и искать пути ее снижения посредством повышения порогового уровня и временного стробирования.

Анализ случайных составляющих погрешности измерения радиальной протяженности облучаемой поверхности показал, что наиболее опасной следует считать погрешность, обусловленную уровнем отсчета при априорной неопределенности формы облучаемой поверхности и ее отражающих свойств. При этом даже при равновероятном появлении пространственной структуры облучаемой поверхности плотность вероятностей этой погрешности остается неизвестной и приходится рассматривать максимальное ее значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев Е. Г., Порфирьев Л. Ф., Хайтун Ф. И. Теория и расчет импульсных и цифровых оптико-электронных систем. Л.: Машиностроение, 1984.
2. Лебедев Е. Г., Нгуен Ву Тунг. Определение параметров отраженных сигналов в моноимпульсной лазерной системе анализа рельефа поверхности // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 5. С. 63—69.
3. Кузнецов П. И., Стратонович Р. Л., Тихонов В. И. О длительности выбросов случайной функции // ЖТФ. 1954. Т. 24, вып. 1
4. Стратонович Р. Л. Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике М.: Сов. радио, 1961.
5. Тихонов В. И. Выбросы случайных процессов. М.: Наука, 1970.

Сведения об авторах

- Евгений Георгиевич Лебедев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: eleb@rambler.ru
- Нгуен Ву Тунг** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: eleb@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
26.03.08 г.

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 681.3:536.2

Е. Н. МЕРКУХИН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОСТРАНСТВА ДОПУСТИМЫХ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Предлагаются графовые модели пространства допустимых решений для задачи размещения электронных элементов по совокупности монтажно-коммутационного и теплового критериев, что позволяет исключить из процесса оптимизации тепловые расчеты. Рассмотрены примеры моделей для различных условий теплоотвода, определяемых конструкцией модулей электронных устройств.

Ключевые слова: графовая модель, пространство поиска, размещение электронных элементов, тепловой критерий.

При проектировании электронных устройств особую актуальность приобретает разработка конструкций с высоким удельным тепловыделением и жесткими ограничениями по массогабаритным характеристикам.

Для отвода тепла применяют пассивные и активные методы. Пассивные методы предполагают обеспечение оптимального теплоотвода посредством выбора материалов с высокой теплопроводностью и рационального размещения тепловыделяющих элементов. При этом увеличение массы и габаритов электронных устройств сводится к минимуму.

Рациональное размещение тепловыделяющих элементов в электронном устройстве непосредственно связано с задачей обеспечения оптимальных монтажно-коммутационных характеристик. В этом случае задача размещения становится двухкритериальной, и возникают дополнительные трудности, обусловленные различной природой модели теплового расчета и моделей электрических схем, применяемых при автоматизированном проектировании. Модели теплового расчета представляют собой уравнения математической физики, а модели электрических схем — структурные модели, строящиеся на основе теории множеств и графов.

С помощью аналитической тепловой модели электронного устройства рассчитывается температура каждого электронного элемента, на основании чего выносится решение о работоспособности устройства. Для уменьшения трудоемкости задачи размещения по двум критериям предлагаются структурные тепловые модели в виде графов, позволяющие отказаться от расчетов температуры электронных элементов. Построение таких моделей основывается на исследованиях закономерностей формирования температурных полей электронных устройств различных классов. Задача размещения разбивается на две иерархические подзадачи: первая заключается в построении структурной тепловой модели (в виде графа), определяющей допустимые варианты размещения, а вторая является непосредственно задачей размещения.

В настоящей статье решается задача многокритериальной оптимизации. Предлагаемый метод может рассматриваться как метод перевода всех критериев, кроме одного, в разряд ограничений или метод последовательных уступок. Двойкая трактовка метода обусловлена тем, что исследуется задача с минимальным числом частных критериев. Первый вариант трактовки предусматривает осуществление оптимизации по монтажно-коммутационному критерию с учетом теплового критерия при ограничении пространства поиска решений, т.е. рассматриваются варианты из множества, представленного в виде графовой модели. Во втором варианте трактовки пространство поиска рассматривается как пространство, полученное после задания уступки по теплому критерию, и затем в этом пространстве осуществляется поиск решения, оптимального по монтажно-коммутационному критерию.

Использование структурной тепловой модели позволяет максимально упростить задачу адаптации существующего программного обеспечения к решению задачи размещения по совокупности монтажно-коммутационных и тепловых характеристик.

Метод построения графовой тепловой модели основывается на многоэкстремальности задачи оптимального размещения групп однотипных элементов (дискретных источников тепла) и симметрией схем теплоотвода. Однотипные электронные элементы присутствуют практически в любом модуле электронной аппаратуры. Симметрия схем теплоотвода означает, что для каждой точки области размещения элементов можно найти хотя бы еще одну точку в области, эквивалентной первой по условиям теплоотвода. Для некоторых классов электронных устройств можно вывести в виде аналитического выражения условие оптимальности, регламентирующее в неявном виде допустимые варианты размещения электронных элементов с учетом теплового режима. Для построения графовой тепловой модели достаточно одного из двух названных факторов.

В работах [1—3] выведены условия оптимальности для некоторых классов конструкций электронных модулей, а в работах [4—6] приводятся алгоритмы, позволяющие определить оптимальные варианты размещения элементов по теплому критерию.

Рассмотрим пример графовой тепловой модели, построенной на основе условия оптимальности, выведенного в работе [1]. В этом случае одинаковые электронные элементы размещены в линейке, которая допускает возможность использования принудительного воздушного охлаждения. Оптимальному теплому режиму соответствует расположение электронных элементов в направлении потока теплоносителя, для которого выполняется условие

$$\frac{P_1}{k_1} \leq \frac{P_2}{k_2} \leq \dots \leq \frac{P_i}{k_i} \leq \dots \leq \frac{P_n}{k_n},$$

где P_i , k_i — соответственно мощность рассеивания и коэффициент линеаризации в соотношении, которое аппроксимирует зависимость интенсивности отказов от температуры для i -го электронного элемента; n — число элементов в линейке.

Введем обозначение: $W_i = P_i/k_i$. Предположим, что $W_{i+1} \approx W_{i+2} \approx W_{i+3}$. Тогда тепловую модель для рассматриваемого случая можно представить в виде графа G (рис. 1), в котором вершины соответствуют электронным элементам, а ребра определяют возможные варианты порядка обхода вершин, соответствующие вариантам расположения электронных элементов в линейке. Любой не имеющий циклов путь из вершины W_1 в вершину W_n , включающий в себя все вершины, определяет последовательность расположения электронных элементов в линейке, которая соответствует теплому режиму.

В данном случае граф моделирует пространство поиска, включающее шесть вариантов размещения, которые эквивалентны и оптимальны по теплому критерию:

$$\begin{aligned} &(W_1, W_2, \dots, W_{i+1}, W_{i+2}, W_{i+3}, \dots, W_{n-1}, W_n); (W_1, W_2, \dots, W_{i+1}, W_{i+3}, W_{i+2}, \dots, W_{n-1}, W_n); \\ &(W_1, W_2, \dots, W_{i+2}, W_{i+1}, W_{i+3}, \dots, W_{n-1}, W_n); (W_1, W_2, \dots, W_{i+2}, W_{i+3}, W_{i+1}, \dots, W_{n-1}, W_n); \\ &(W_1, W_2, \dots, W_{i+3}, W_{i+1}, W_{i+2}, \dots, W_{n-1}, W_n); (W_1, W_2, \dots, W_{i+3}, W_{i+2}, W_{i+1}, \dots, W_{n-1}, W_n). \end{aligned}$$

Таким образом, графовая тепловая модель представляет собой модель пространства решений, оптимальных или близких к оптимальным по тепловому критерию.

Формализуем построение графовой тепловой модели для случая, когда известно оптимальное по тепловому критерию размещение электронных элементов в фиксированных позициях. Обозначим множество размещаемых электронных элементов как $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, а множество посадочных позиций — как $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$. При этом подразумевается, что $|A| = m \leq n = |S|$. Любая инъективная функция A в S отображает один вариант размещения электронных элементов. При отсутствии ограничений структурная тепловая модель включает в себя все множество $F^{\wedge}(S^A)$ инъективных функций A в S , которое может быть представлено полным двудольным графом $G = (A \cup S, V)$ с двумя типами вершин (рис. 2).

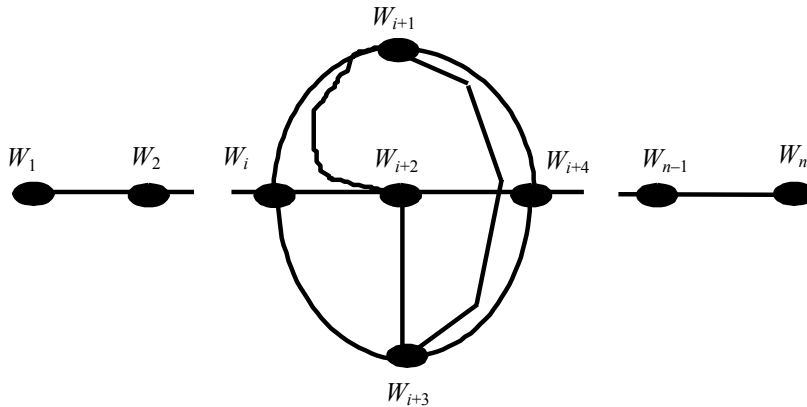


Рис. 1

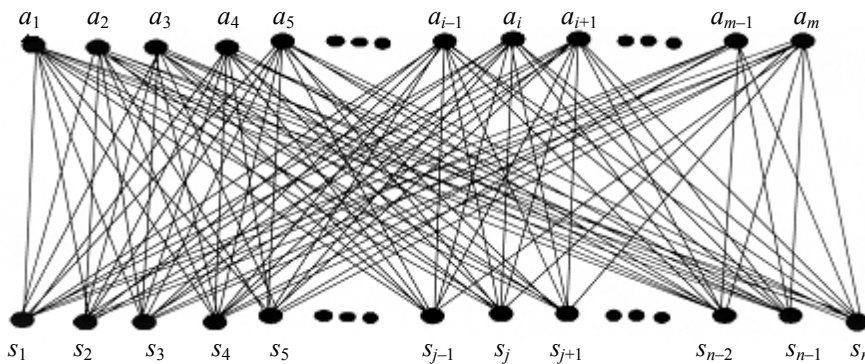


Рис. 2

Любой суграф графа G с числом ребер m и степенью не выше единицы моделирует одну из всего множества инъективных функций. Мощность множества, или число таких суграфов, определяется выражением

$$|F^{\wedge}(S^A)| = \frac{|S|!}{(|S| - |A|)!}.$$

Формально операцию построения структурной тепловой модели можно представить следующим образом. Множество A разбивается на q непересекающихся подмножеств $A = A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_h \cup \dots \cup A_q$, каждое из которых представляет собой класс эквивалентности, т.е. однотипные электронные элементы. Для каждого класса эквивалентности A_h указывается подмножество позиций S_h , куда могут размещаться элементы из A_h , причем в общем случае $S_i \cap S_j \neq \emptyset$, $i, j = 1, 2, \dots, q$; $i \neq j$.

Введем обозначения: $F(S^A)$ — инъективная функция множества A в множестве S ; $S^{F(A)}$ — отображение в множестве S множества A , порожденное инъективной функцией $F(S^A)$.

Назовем две функции $F_A(S_1^{A_1})$ и $F_B(S_2^{A_2})$ непересекающимися, если соблюдаются условия

$$\left. \begin{aligned} A_1 \cap A_2 &= \emptyset, \\ S_1^{F_A(A_1)} \cap S_2^{F_B(A_2)} &= \emptyset. \end{aligned} \right\}$$

Для непересекающихся функций определим операцию объединения. Результатом объединения двух непересекающихся функций будет также инъективная (или биективная, если $m=n$) функция $\hat{F}_1(S^{\bar{A}}) = F_a(S_1^{A_1}) \cup F_b(S_2^{A_2})$, для которой

$$\left. \begin{aligned} \bar{A} &= A_1 \cup A_2, \\ \hat{F}_1(\bar{A}) &= S_1^{F_a(A_1)} \cup S_2^{F_b(A_2)}. \end{aligned} \right\}$$

Зададим для каждого класса эквивалентности A_h , $h=1, 2, \dots, q$, множество инъективных функций $\hat{F}(S_h^{A_h})$. Тогда структурная тепловая модель будет представлять собой множество инъективных функций $F(S^A)$, каждая из которых является результатом объединения q непересекающихся инъективных функций, принадлежащих соответственно подмножествам $\hat{F}(S_h^{A_h})$, $h=1, 2, \dots, q$.

Таким образом, функция $F_i(S^A)$ моделирует допустимое по тепловому критерию размещение, если она может быть представлена в виде

$$F_i(S^A) = F_a(S_1^{A_1}) \cup F_b(S_2^{A_2}) \cup \dots \cup F_g(S_h^{A_h}) \cup \dots \cup F_r(S_q^{A_q}),$$

где $F_a(S_1^{A_1})$, $F_b(S_2^{A_2})$, $F_g(S_h^{A_h})$, $F_r(S_q^{A_q})$ — непересекающиеся инъективные (или биективные) функции.

На рис. 3 приведен граф G , моделирующий множество решений, допустимых по тепловому критерию (множество инъективных функций $F(S^A)$). Любой суграф графа G с m ребрами и степенью не выше единицы моделирует одно допустимое по тепловому критерию размещение.

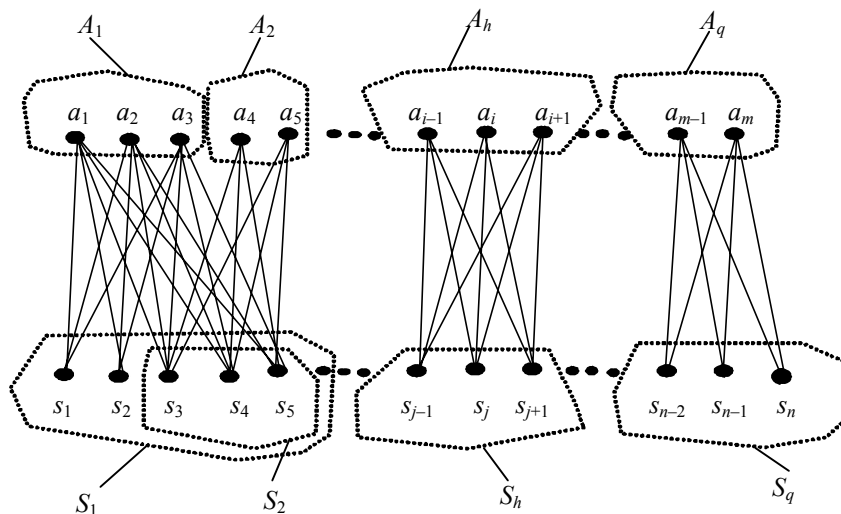


Рис. 3

Рассмотрим теперь вариант, когда позиции S не фиксированы. При этом множество позиций оказывается неопределенным, и структурную тепловую модель можно представить в виде гиперграфа $H=(A, E \cup V)$ с двумя типами ребер (рис. 4). Каждое ребро типа V содержит

вершины, которые соответствуют группе эквивалентных элементов. Ребра типа E могут включать в себя либо вершины, соответствующие эквивалентным группам электронных элементов, для которых определены координаты расположения на монтажном поле, либо вершины, соответствующие группам элементов, для которых определены явно или неявно зоны для размещения на монтажном поле. Возможно наличие нескольких типоразмеров эквивалентных групп. В этом случае гиперграф будет содержать соответствующее количество типов ребер. После получения оптимального по тепловому критерию начального варианта размещения элементов гиперграфовая модель определяет правила их перемещения в пространстве. Допустимыми являются варианты размещения, полученные из начального, при соблюдении следующих правил: разрешаются парные перестановки эквивалентных элементов, т.е. вершин внутри ребер типа V , а также парные перестановки эквивалентных групп элементов, т.е. перестановки индексов ребер типа E .

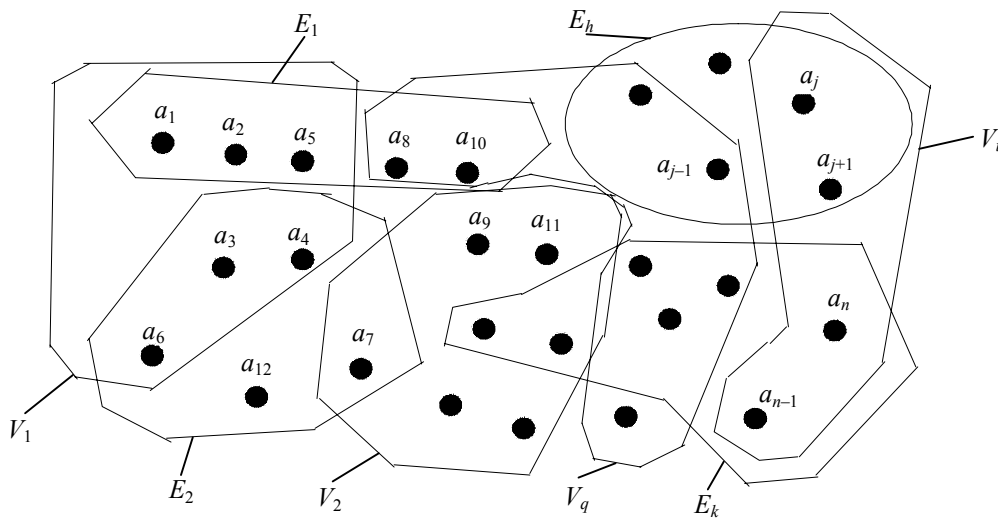


Рис. 4

Применение структурных тепловых моделей имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами решения задач размещения по совокупности монтажно-коммутационного и теплового критериев. Во-первых, исключаются трудоемкие расчеты температурных полей на каждом шаге оптимизации. Во-вторых, модель предусматривает ограничения, позволяющие сократить количество пробных шагов поиска пространства решений по тепловому критерию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Роткоп Л. Л., Гидаевич В. Б. Оптимальное размещение радиоэлектронной аппаратуры с принудительным охлаждением // *Вопр. радиоэлектроники. Сер. ТРТО.* 1970. Вып. 1. С. 69—82.
2. Лебедев Б. К., Меркухин Е. Н. Метод размещения с совместной оптимизацией теплового режима и монтажно-коммутационных характеристик // *Автоматизация проектирования электронной аппаратуры: Межвед. темат. науч. сб.* Таганрог: ТРТИ, 1985. Вып. 4. С. 110—115.
3. Меркухин Е. Н. Оптимальное по тепловому режиму размещение цифровых ИМС на плате с теплопроводами // *Проектирование электронной аппаратуры с применением САПР: Межвуз. науч.-темат. сб.* Махачкала: ДГУ, 1988. С. 46—49.
4. Меркухин Е. Н. Алгоритм квазиоптимального размещения элементов по тепловому режиму на плате с поверхностной схемой теплоотвода // *Проектирование электронной аппаратуры с применением САПР: Межвуз. науч.-темат. сб.* Махачкала: ДГУ, 1990. Т 1. С. 75—78.
5. Лебедев Б. К., Меркухин Е. Н. Оптимизация тепловых характеристик при размещении элементов // *Вопр. радиоэлектроники. Сер. ЭВТ.* 1988. Вып. 11. С. 186—194.

6. Меркухин Е. Н. Нечеткие критерии в задаче размещения электронных элементов с учетом теплового режима // Изв. вузов. Приборостроение. 1995. Т. 38, № 3—4. С. 32—34.

Сведения об авторе

Евгений Николаевич Меркухин

— канд. техн. наук, доцент; Дагестанский государственный технический университет, кафедра вычислительной техники, Махачкала;
E-mail: merkuhin@mail.ru

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
09.10.07 г.

УДК 621.362.1

О. И. МАРКОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ

Представлены результаты численного моделирования работы низкотемпературных термоэлементов в режиме максимального перепада температур. Численно решена граничная задача для стационарной теплопроводности ветвей термоэлемента с зависящими от температуры кинетическими коэффициентами. Сравниваются эффективности термоэлементов с *p*-ветвью из теллурида висмута и пассивной ветвью из высокотемпературного сверхпроводника. Учитывается влияние контактного сопротивления на эффективность термопары.

Ключевые слова: охлаждающий термоэлемент, сверхпроводник, составная ветвь, контактное сопротивление.

Развитие возможностей внеатмосферной астрономии, применение космических аппаратов для зондирования в ИК-диапазоне поверхности Земли, реализация космических программ исследования других планет создают потребность в низкотемпературных охлаждаемых приемниках излучения, особенностью которых является зависимость их пороговой чувствительности от температуры. Однако возможности низкотемпературных (ниже 120 К) термоэлектрических охлаждающих устройств ограничены тем, что эффективность большинства термоэлектриков со снижением температуры резко понижается. Исключение составляют лишь твердые растворы висмут-сурьма, известные как наиболее эффективные низкотемпературные термоэлектрики. В настоящей статье представлены результаты расчета максимального перепада температур в термоэлементе, позволяющие выявить возможности низкотемпературного охлаждения при температурах вблизи точки кипения азота с использованием в качестве *n*-ветви термоэлемента монокристаллов твердых растворов $\text{Bi}_{0,88}\text{Sb}_{0,12}$.

Известно, что высокой термоэлектрической эффективностью в низкотемпературной области обладают только сплавы висмут-сурьма *n*-типа. Однако поскольку не существует приемлемой по уровню эффективности низкотемпературной ветви *p*-типа, можно использовать в качестве второй ветви термоэлектрически пассивную, в частности из высокотемпературного сверхпроводника [1]. Экспериментально довольно трудно выбрать оптимальную длину пассивной ветви, поэтому необходимо рассчитать зависимость перепада температур от длины пассивной ветви. Необходимо также учесть влияние контактного сопротивления на эффективность термопары.

Согласно общепринятому подходу для характеристики эффективности термоэлемента используется параметр термоэлектрической добротности

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{\left[\sqrt{\chi_p \rho_p} + \sqrt{\chi_n \rho_n} \right]^2}, \quad (1)$$

где α_i, χ_i, ρ_i — термоЭДС, теплопроводность и удельное сопротивление материала n - и p -ветвей.

Однако для термопары с пассивной сверхпроводниковой ветвью параметр Z уже не является характеристикой добротности термоэлемента, так как при $\alpha = \rho = 0$ добротность термопары сводится к добротности только активной ветви.

В связи с этим для более точного описания тепловых процессов в ветви термоэлемента следует использовать подход, основанный на решении граничной задачи для стационарной теплопроводности ветвей термоэлемента [2, 3]. Температурное поле одномерной адиабатически изолированной ветви термоэлемента в установившемся режиме с учетом эффекта Томсона описывается стационарным уравнением теплопроводности

$$\frac{d}{d\xi} \left[\chi_n(T) \frac{dT}{d\xi} \right] + Y_n^2 \rho_n(T) - Y_n T \frac{d\alpha_n(T)}{dT} \frac{dT}{d\xi} = 0 \quad (2)$$

с граничными условиями

$$\chi_n(T) \frac{dT}{d\xi} \Big|_{\xi=0} = \alpha_n(T_0) Y_n T_0 - q_n, \quad T \Big|_{\xi=l_n} = T_\Gamma, \quad (3)$$

где $\alpha_n(T), \rho_n(T), \chi_n(T)$ — термоЭДС, удельное сопротивление и теплопроводность n -ветви термоэлемента как функции температуры; $\xi = x/l_n$ — безразмерная переменная, x — переменная величина ($0 < x < l_n$); T_0 и T_Γ — температуры холодного и горячего спаев ветви соответственно; $Y_n = J_n/S_n$ — „удельный“ ток; $q_n = Q/l_n/S_n$ — „удельный“ тепловой поток, подводимый из пассивной ветви, здесь J — ток, l_n — длина ветви, S_n — площадь сечения ветви, Q — теплота, поступающая через пассивную ветвь.

Экспериментальные зависимости термоЭДС, удельного сопротивления и теплопроводности от температуры для монокристаллов $\text{Bi}_{0,88}\text{Sb}_{0,12}$ в направлении тригональной оси аппроксимировались степенными многочленами.

В пассивной ветви из сверхпроводника отсутствует эффект Джоуля, и тогда, пренебрегая значением термоЭДС, граничную задачу можно записать в следующем виде:

$$\chi_s(T) \frac{dT}{d\xi} = q_n \frac{j_s l_s}{Y_n}; \quad (4)$$

$$T \Big|_{\xi=0} = T_0, \quad T \Big|_{\xi=1} = T_\Gamma, \quad (5)$$

где $\chi_s(T)$ — удельная теплопроводность сверхпроводника; $\xi = x/l_s$ — безразмерная переменная, x — переменная величина ($0 < x < l_s$); l_s — длина сверхпроводника; j_s — плотность критического тока сверхпроводника.

Температурная зависимость коэффициента теплопроводности сверхпроводника также была аппроксимирована степенным многочленом.

Граничная задача (2)—(5) решалась численными методами. Оптимизация максимального перепада температур термоэлемента проводилась по значению удельного тока Y_n . Так как максимальная площадь сечения сверхпроводниковой ветви определяется предельной плотностью тока ($j_s = 120 \text{ А/см}^2$), то тепловое сопротивление сверхпроводника определяется только длиной ветви l_s , и максимальный перепад температур зависит от значения l_s . Для сравнения

был проведен расчет зависимости максимального перепада температур (ΔT_{\max}) от температуры горячего спая (T_r) для термоэлемента с n -ветвью из монокристалла $\text{Bi}_{0,88}\text{Sb}_{0,12}$ и с низкотемпературной p -ветвью [4] (твердый раствор $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_{2,91}\text{Se}_{0,09}$). Результаты расчета приведены на рис. 1, где кривая 1 соответствует термоэлементу с n -ветвью $\text{Bi}_{0,88}\text{Sb}_{0,12}$ и с бесконечно длинной пассивной сверхпроводниковой ветвью, кривая 2 — сверхпроводниковой ветви длиной 1 см, кривая 3 — p -ветви из термоэлектрика $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_{2,91}\text{Se}_{0,09}$.

На рис. 2 представлен график зависимости максимального перепада температур термоэлемента от длины сверхпроводника: кривая 1 соответствует ветви из сверхпроводника, 2 — асимптота, соответствующая термоэлементу с бесконечно длинной сверхпроводниковой ветвью. Как показывают результаты расчета, в пассивной ветви длиной 1,2 см „теряется“ более 10 % от максимально возможного перепада температур. Для того чтобы эти потери составляли более 1 % , длина ветви должна быть не менее 6 см при данной критической плотности тока.

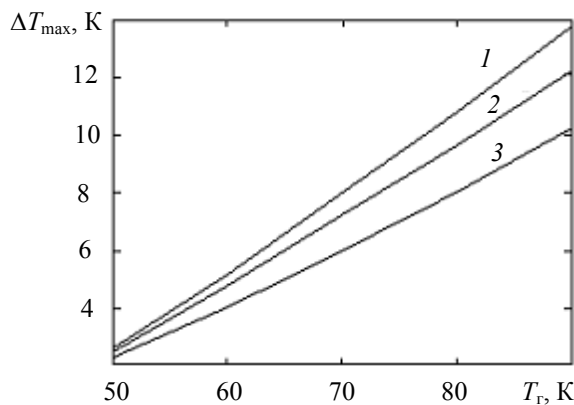


Рис. 1

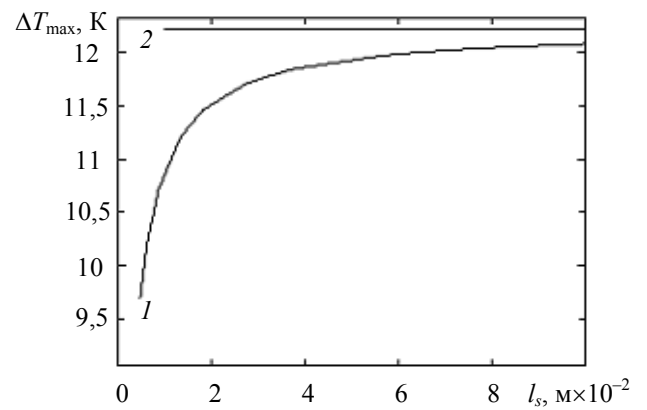


Рис. 2

Можно предложить еще один вариант термоэлемента, сделав пассивную ветвь составной: „низкотемпературную“ составляющую — из сверхпроводника, а „высокотемпературную“ — из термоэлектрика p -типа $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_{2,91}\text{Se}_{0,09}$. При этом решается следующая граничная задача:

для „низкотемпературной“ составляющей ($0 \leq x \leq l_s$) —

$$\chi_s(T) \frac{dT}{d\zeta} = q_n \frac{j_s l_s}{Y_n}; \quad (6)$$

$$T|_{\zeta=0} = T_0, \quad T|_{\zeta=1} = T'_0; \quad (7)$$

для „высокотемпературной“ составляющей ($l_s \leq x \leq l_p + l_s$) —

$$\frac{d}{d\eta} \left[\chi_p(T) \frac{dT}{d\eta} \right] + Y_p^2 \rho_p(T) - Y_p T \frac{d\alpha_p(T)}{dT} \frac{dT}{d\eta} = 0; \quad (8)$$

$$\chi_n(T) \frac{dT}{d\eta} \Big|_{\eta=0} = \alpha_p(T_0) Y_p T'_0 - q_n \frac{Y_p}{Y_n}, \quad T|_{\eta=1} = T_r, \quad (9)$$

где $\eta = (x - l_s) / l_p$ — безразмерная переменная; T'_0 — температура на границе между сверхпроводником и термоэлектриком p -типа; Y_p — „удельный“ ток p -ветви; l_p — длина активного участка p -ветви; S_p — площадь сечения активного участка p -ветви; $\alpha_p(T)$, $\rho_p(T)$, $\chi_p(T)$ — термоЭДС, удельное сопротивление и теплопроводность термоэлектрика p -типа.

Оптимизация термоэлемента с составной ветвью проводилась по параметрам Y_p , Y_n . Результаты численного решения граничных задач (2), (3), (6)—(9) для термоэлемента с составной ветвью представлены на рис. 2 (кривая 2). Как видно из графика, максимальный перепад температур термоэлемента с составной ветвью в зависимости от длины сверхпроводника возрастает быстрее, чем в случае сверхпроводниковой ветви. Это связано как с появлением дополнительного небольшого поглощения теплоты Пельтье на границе сверхпроводника и термоэлектрика p -типа, так и с тем, что последовательное включение теплового сопротивления из термоэлектрика p -типа позволяет уменьшить длину сверхпроводника. При длине сверхпроводящей вставки длиной 1,2 см потери от максимально возможного перепада температур составят в случае составной ветви лишь 4,3 %, перепад в 99 % от максимального будет достигнут при длине ветви 3 см.

Хорошо известно, что контактное сопротивление у холодного спая весьма заметно снижает эффективность термоэлемента [5]. Влияние контактных сопротивлений можно уменьшить, увеличивая площадь сечения ветви. В случае когда площадь сечения сверхпроводника равна площади контакта, на холодный конец ветви поступает теплота Джоуля, выделяющаяся в контактом сопротивлении, и тепловой поток через сверхпроводник определяется как

$$Q_0 = J^2 \rho_c \frac{\Delta l}{S_c} + \chi_s \Delta T \frac{S_c}{l_s}, \quad (10)$$

где Δl — толщина контактного слоя; S_c — площадь контакта; ρ_c — удельное сопротивление материала контактного припоя.

Из выражения (10) следует, что минимум подводимой теплоты соответствует определенной площади контактного сопротивления. Теплоту Джоуля в контактом сопротивлении необходимо учесть в граничном условии:

$$\chi_n(T) \left. \frac{dT}{d\xi} \right|_{\xi=0} = \alpha_n(T_0) Y_n T_0 - Y^2 \rho_c \frac{\Delta l}{l_n} \frac{S_n}{S_c} - q_n \frac{S_c}{S_n}. \quad (11)$$

На рис. 3 показаны результаты расчета максимального перепада температур с учетом контактного сопротивления в зависимости от отношения S_c/S_n . Как указано в работе [5],

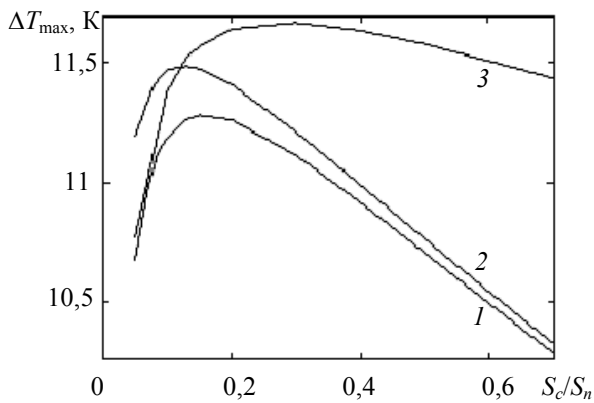


Рис. 3

толщина контактного слоя должна быть не менее 0,2 мм. Расчеты были проведены именно для этого значения Δl . Кривая 1 показывает зависимость значения ΔT_{\max} от отношения сечений при $l_s = 1$ см и $\rho_c = 5 \cdot 10^{-5}$ Ом·см; кривая 2 соответствует $\rho_c = 3 \cdot 10^{-5}$ Ом·см и $l_s = 1$ см, а кривая 3 — $l_s = 3$ см и $\rho_c = 5 \cdot 10^{-5}$ Ом·см. Увеличение длины сверхпроводника до 5 см приводит к исчезновению максимума на кривой максимального перепада температур.

Итак, представлены результаты численного моделирования работы низкотемпературного термоэлемента с n -ветвью на основе сплава висмут-сурьма в интервале температур 50—90 К. Как показали сравнительные исследования предельных возможностей низкотемпературных термоэлементов, использование пассивной ветви из сверхпроводника более эффективно, чем низкотемпературных термоэлектриков p -типа. Чтобы уменьшить потери от максимального перепада температур до 1 %, длина пассивной ветви должна быть не менее 6 см; необходимость учитывать контактное сопротивление холодного спая также накладывает ограничение на минимальную длину сверхпроводника (до 5 см).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В. Л., Ведерников М. В., Яндль П., Бирхгольц У. Исследование предельных возможностей термоэлектрического охлаждения при температуре жидкого азота // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20, вып. 18. С. 75—80.
2. Марков О. И. Моделирование нагрузочных характеристик низкотемпературных термоэлектрических модулей // Там же. 2004. Т. 30, вып.13. С. 7—11.
3. Марков О. И. Моделирование предельных возможностей низкотемпературного охлаждающего термоэлемента // Прикладная физика. 2008. № 4. С. 139—142.
4. Лукьянова Л. Н., Кутасов В. А., Попов В. В., Константинов П. П. Гальваномагнитные и термоэлектрические свойства твердых растворов $p\text{-Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ в низкотемпературной области ($<220\text{K}$) // ФТТ. 2004. Т. 46, вып. 8. С. 1366—1371.
5. Коленко Е. А. Термоэлектрические охлаждающие приборы. М. — Л.: Изд-во АН СССР, 1963.

Сведения об авторе**Олег Иванович Марков**

— канд. физ.-мат. наук, профессор; Орловский государственный университет, кафедра теоретической физики и математического моделирования; E-mail: O.I.Markov@mail.ru

Рекомендована кафедрой
теоретической физики
и математического моделированияПоступила в редакцию
05.08.08 г.

УДК 536

Е. С. ПЛАТУНОВ, И. В. БАРАНОВ, А. Е. ПЛАТУНОВ

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Представлено описание научно-исследовательской теплофизической лаборатории низких температур, в состав которой входят 14 стендов. Рассмотрен состав стендов, содержащих тепловые ячейки, контроллер и разнотипные термодатчики.

Ключевые слова: техника и физика низких температур, температурный датчик, тепловая ячейка.

В Санкт-Петербургском государственном университете низкотемпературных и пищевых технологий (СПбГУ НИПТ) создана многоцелевая научно-исследовательская теплофизическая лаборатория низких температур. Лаборатория предназначена в основном для проведения научных исследований в области экспериментальной низкотемпературной теплофизики, а также может использоваться и в учебном процессе.

В лаборатории могут быть исследованы:

- процессы теплоотдачи и конвекции в жидкостях (жидкий азот, вода);
- энтальпия, теплоемкость и теплопроводность различных групп материалов и веществ;
- теплота и кинетика фазовых и структурных превращений во влагосодержащих материалах (грунтовые породы, пищевые продукты и др.);
- электропроводность и термоэлектрические свойства металлов и полупроводников;
- инерционность температурных датчиков и т. п.

Основу лаборатории составляют 14 однотипных учебных стендов, которые являются настольными и переносными (один стенд занимает на лабораторном столе площадь около $0,2\text{ м}^2$).

Каждый стенд оснащен многофункциональным управляющим электронно-вычислительным контроллером, двумя унифицированными пассивными термостатами и набором тепловых ячеек.

Общий вид лабораторного стенда показан на рис. 1. Корпус стенда выполнен в виде открытого каркаса, состоящего из основания 1 и полки 2, которые жестко связаны между собой четырьмя стержнями-стойками 3. На основании 1 расположен многофункциональный электронный контроллер 4. В гнездах полки 2 размещены два внешне одинаковых термостата 5 и 6. На лицевой панели полки, с внутренней ее стороны, укреплен блок „холодных спаев“ 7, связанный многожильным электрическим кабелем с контроллером 4. Гнезда блока „холодных спаев“ выведены на лицевую панель полки. Через них и блок „холодных спаев“ к контроллеру могут быть одновременно подключены восемь различных температурных датчиков 8, каждый из которых выполнен в виде гибкого двухжильного электрического шнура (на схеме показан один датчик). Это позволяет до начала эксперимента монтировать с помощью электрических шнуров чувствительные элементы датчиков и затем переносить их в соответствующий сосуд-термостат.

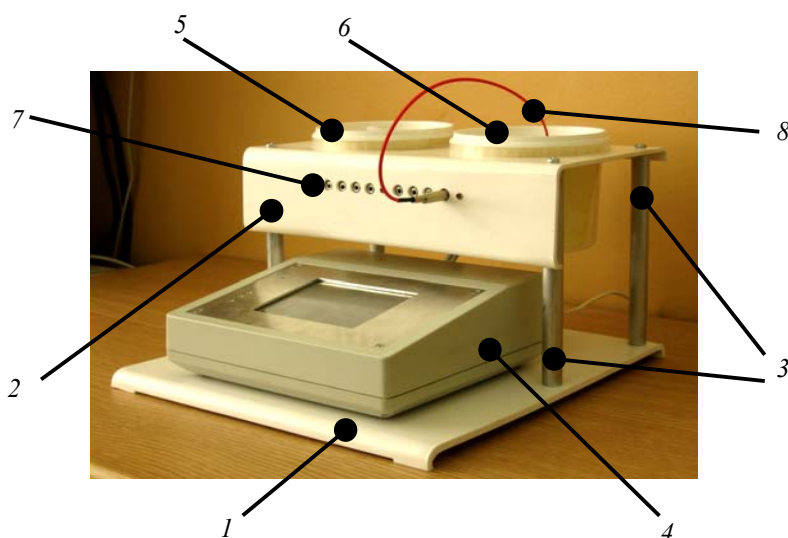


Рис. 1

Тепловые ячейки предназначены для проведения наиболее распространенных теплофизических измерений. Каждая тепловая ячейка позволяет проводить исследование отдельного теплового процесса. В частности, среди набора имеющихся ячеек достаточной универсальностью обладают ячейки, предназначенные для градуировки температурных датчиков и изучения их тепловой инерционности. Сюда можно причислить и те ячейки, в которых исследуются процессы теплоотдачи в жидкостях либо изучается теплоемкость или теплопроводность отдельных групп материалов. В качестве примера на рис. 2 представлена схема тепловой ячейки, предназначенной для измерений теплопроводности твердых неметаллических материалов в режиме бикалориметра. В схеме приведены следующие обозначения: 1 — тепловая изоляция; 2 — термостат; 3 — пластмассовая ампула; 4, 5 — температурные датчики; 6 — образец.

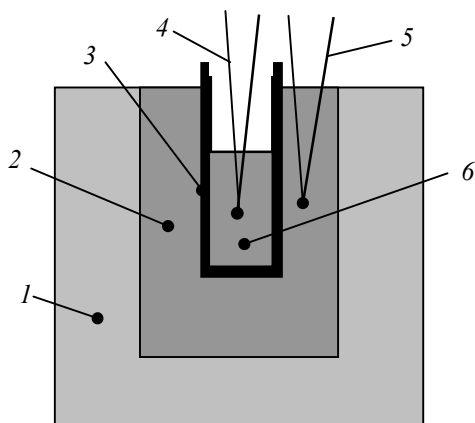


Рис. 2

Пассивные термостаты используются для обеспечения заданного температурного уровня. Оба сосуда являются съемными и конструктивно оформлены одинаково. Каждый из них имеет съемную крышку и тонкостенный металлический стакан. Полость между стаканом и

стенкой сосуда заполнена высокоэффективным теплоизоляционным материалом, защищающим стакан от теплообмена с окружающей средой. Один из термостатов обычно воспроизводит в опытах изотермическую среду с низкой температурой, а второй — среду с комнатной или более высокой температурой. В качестве источников „холода“ для низкотемпературного пассивного термостата служат жидкий азот (воздух), „сухой лед“ (сублимированный диоксид углерода) или смесь „вода — лед“. Во втором сосуде внутри стакана, как правило, размещен массивный металлический цилиндр, играющий в опытах роль активной в тепловом отношении изотермической среды с комнатной температурой. В этот сосуд можно также заливать горячую или даже кипящую воду. Таким образом, оба сосуда в совокупности позволяют исследовать тепловые процессы в широком интервале температур: от температуры кипящего азота (воздуха) до комнатной температуры, а при необходимости — и до температуры кипящей воды.

Встроенный в стенд многофункциональный контроллер решает обширный комплекс разноплановых задач, в частности:

- обеспечивает заданный оператором режим проведения опыта;
- одновременно и дискретно регистрирует изменяющиеся во времени показания восьми разнородных термоэлектрических датчиков (четырёх термопар, двух металлических термометров сопротивления, двух полупроводниковых микротермисторов);
- реализует запрограммированный оператором режим считывания показаний датчиков;
- преобразует электрические сигналы датчиков в измеряемые ими физические параметры (температуру, электрическое сопротивление и т. д.);
- выводит на жидкокристаллический дисплей графики изменения показаний датчиков (в милливольтгах);
- сохраняет в своей памяти массив экспериментальных данных, полученных в процессе одного или нескольких опытов;
- передает экспериментальные данные в базовый компьютер;
- обеспечивает обратную связь с базовым компьютером и подчиняется его командам;
- при необходимости может управлять работой внешнего электрического нагревателя (установленного в тепловую ячейку или в один из термостатов).

В контроллере использован 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь с дополнительным усилителем, что обеспечивает чувствительность измерительного канала до 10 мкВ, а по температуре — до десятых и даже сотых долей кельвина. Временной интервал между за мерами показаний температурных датчиков (шаг дискретности) может изменяться оператором в пределах от 1 с до нескольких минут.

Контроллер лабораторного стенда обычно работает автономно, но связан по локальной компьютерной сети с базовым компьютером. Экспериментальные измерения производятся непосредственно контроллером и передаются после завершения опыта в компьютер. Обработка первичных экспериментальных данных производится с помощью персональных компьютеров.

В заключение уместно обратить внимание читателя на то, что для проведения исследований в созданной лаборатории удобно использовать далеко не все известные в литературе методы теплофизических измерений. Стенды приспособлены в основном для изучения теплофизических свойств и процессов в динамическом или регулярном тепловом режиме. Исследуемый образец в процессе опыта обычно монотонно охлаждается или нагревается, находясь внутри одного из сосудов-термостатов, и температура образца в течение опыта плавно изменяется в интервале 90...350 К. Выбор динамического режима нагрева-охлаждения образцов объясняется простотой его реализации и высокой информативностью при малой длительности опыта. Подробное описание использованных в созданной лаборатории методов измерения теплофизических свойств можно найти в специальной литературе [1—4].

В создании лаборатории на разных этапах принимали участие заведующий кафедрой физики СПбГУ НИПТ С. Е. Буравой, а также сотрудники кафедры В. В. Курепин, В. А. Самолетов, С. С. Прошкин и А. А. Котов. Авторы выражают им свою глубокую признательность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Платунов Е. С. Физика низких температур: Учеб. пособие. СПб.: СПбГУ НИПТ, 2005. 258 с.
2. Теплофизические измерения и приборы / Е. С. Платунов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин, Г. С. Петров / Под общ. ред. Е. С. Платунова. Л.: Машиностроение, 1986. 256 с.
3. Кондратьев Г. М., Дульнев Г. Н., Платунов Е. С., Ярышев Н. А. Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2003. 560 с.
4. Температурные измерения. Справочник / О. А. Геращенко, А. Н. Гордов, А. К. Еремина и др. Киев: Наук. думка, 1989. 704 с.

Сведения об авторах

- Евгений Степанович Платунов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, кафедра физики
- Игорь Владимирович Баранов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, кафедра физики; E-mail: barigor@mail.ru
- Алексей Евгеньевич Платунов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра вычислительной техники; E-mail: platunov@lmt.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
физики СПбГУ НИПТ

Поступила в редакцию
18.01.08 г.

А. М. СКВОРЦОВ, В. А. ЧУЙКО, ЛЕ ЗУЙ ТУАН, ФАМ КУАНГ ТУНГ

ФОРМИРОВАНИЕ РЕГУЛЯРНОГО МАССИВА НАНОКЛАСТЕРОВ КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ПРОЕКЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Представлена лазерно-дифракционная методика формирования регулярного массива (решетки) кластеров кремния в системе кремний — диоксид кремния, основанная на процессе локального лазерного испарения вещества. Показано, что плотность кластеров кремния в массиве зависит от шага ячеек в металлической микросетке, которая использовалась для деления лазерного пучка. Определена пороговая мощность лазера, превышение которой сопровождается возникновением на окисленной поверхности кремния нанокластеров кремния в виде регулярной решетки. Показано, что при увеличении мощности лазера размер кластеров увеличивается, а вокруг кластеров появляются деформированные области; дальнейшее увеличение мощности приводит к увеличению размеров кластеров и площадей деформированных областей вплоть до их смыкания.

Ключевые слова: нанокластер, нанокристалл, наноэлектроника, лазерный способ кластеризации.

Введение. Достоинства кремния как одного из самых широко используемых материалов в современной полупроводниковой микроэлектронике и интегральной оптике хорошо известны и достаточно полно описаны в литературе. Поэтому исследования по созданию нанокластерных материалов на основе кремния, а также по формированию и модификации свойств наноструктур кремния наиболее актуальны. При этом особое внимание уделяется созданию больших массивов нанокристаллов кремния, расположенных в пленках SiO_2 с требуемой периодичностью, так как именно такие нанокластерные структуры могут быть эффективно использованы для создания устройств опто- и наноэлектроники.

Для формирования упорядоченных массивов квантовых точек в структурах соединений типа A_3B_5 используются методы, основой которых является самоорганизация на кристаллических поверхностях, и метод фасетования, в котором плоская кристаллическая поверхность перестраивается в периодическую структуру „холмов и долин“ [1].

При формировании упорядоченных массивов нанокластеров кремния в системе Si/SiO_2 применяются различные методы, в том числе наноструктурирование поверхности кремния с помощью литографии и лазерное микроstructuring. В работе [2] предложен способ формирования решетки нанокластеров кремния на структурированной поверхности подложки из монокристаллического кремния. Структурирование поверхности производится с помощью нанолитографии. В результате на поверхности подложки образуется регулярная сетка столбиков. Для завершения формирования структуры, представляющей собой решетку нанокластеров кремния в слое SiO_2 , производится термическое окисление подложки до образования замкнутых оболочек SiO_2 вокруг кластеров кремния и окончательный отжиг в инертной

атмосфере. Краткий обзор методов микроstructuring поверхности кремния с помощью лазера приведен в работе [3].

В настоящей статье предложен дифракционно-проеекционный метод получения регулярного массива кластеров кремния в термической пленке SiO_2 с помощью оптической схемы проекционного лазерного облучения.

Микроstructuring поверхности кремния методом лазерного облучения. Благодаря интенсивному развитию лазерных технологий, за последние годы созданы лазеры с излучением, лежащим в глубоком УФ-диапазоне, и с длительностью импульсов вплоть до ультракоротких фемтосекундных. Применение таких лазеров позволяет создавать четкие структуры любого размера и формы в различных материалах. Изменяя энергию лазерного импульса и время воздействия, можно реализовать широкий диапазон режимов — от локального нагрева до строго дозированного удаления материала.

Метод структурирования поверхностей, основанный на процессе испарения вещества под воздействием лазерного излучения, отличается универсальностью, управляемостью и высокой производительностью. Для реализации этого метода могут быть использованы лазеры, создающие при фокусировке излучения плотность мощности, Вт/см^2 , достаточную для испарения материала [4]:

$$\bar{P} = \frac{2KT\sqrt{\pi}}{A\sqrt{\alpha\tau}} \approx 10^7 \dots 10^8,$$

где T — температура испарения материала, K — теплопроводность, α — температуропроводность, τ — длительность воздействия, A — поглощательная способность материала.

Толщина h испаренного слоя при импульсном воздействии с заданной плотностью мощности \bar{P} зависит от длительности воздействия τ . Величину h легко определить, считая, что вся подводимая к подложке мощность расходуется на испарение вещества:

$$h = V\tau = \frac{\bar{P}}{L}\tau,$$

где V — скорость испарения вещества (скорость движения границы раздела твердое тело — газ), L — удельная теплота испарения вещества.

Для микроstructuring поверхности кремния и формирования кластеров целесообразно использовать лазерное локальное испарение. Как следует из работы [5], процесс микроstructuring подложки сопровождается испарением атомов кремния и образованием твердых конических структур. В образовании кластеров кремния наряду с испаренными атомами участвуют и так называемые „лишние“ атомы кремния (рис. 1), которые образуются на границе Si/SiO_2 при термическом окислении кремния.

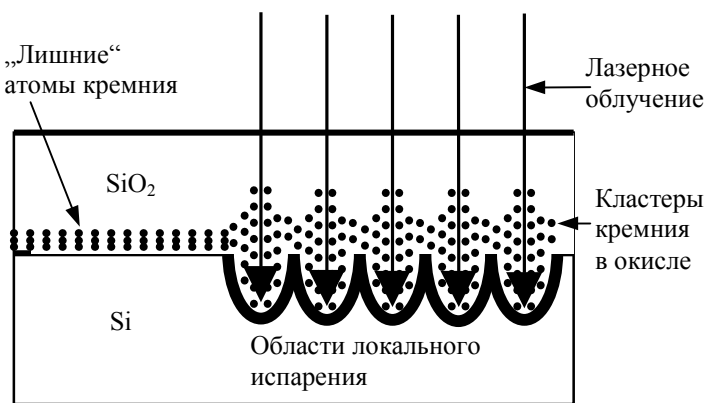


Рис. 1

Это связано с тем, что при сохранении неизменной площади межфазной границы (необходимое условие сопряжения двух твердых фаз) сопрягаются

решетки кремния и диоксида (постоянные решеток соответственно 0,54 и 0,712 нм). В результате трансформация решетки кремния в решетку диоксида кремния вызывает появление „лишних“ атомов кремния, которые перераспределяются между кремнием и диоксидом, образуя в них соответствующие дефекты [6].

Дифракционно-проеекционный метод. Мощность лазерного излучения, требуемая для испарения кремния на малой площади (пятне) подложки диаметром в доли микрометра или несколько нанометров, невелика. При характерном пространственном размере микроструктуры с радиусом r_0 порядка 100 нм потребуется мощность $P \geq \bar{P}S = 0,01 \dots 0,1$ Вт (где $S \approx \pi r_0^2$ — площадь светового пятна). По сравнению с мощностью лазеров, имеющих в настоящее время, эта мощность является очень малой. Поэтому можно разделить пучок лазера на несколько равных параллельных частей, чтобы одновременно можно было облучить большие площади. Для разделения пучка лазера использовалась микросетка, однако ее применение связано с проблемой, обусловленной дифракцией луча лазера. Поэтому после деления пучка необходимо применять фокусирующий объектив.

Схема формирования решетки кластеров кремния в диоксиде кремния приведена на рис. 2, где *a* — оптическая схема проекционного лазерного облучения; *b* — микросетка; *в* — распределение мощности излучения по площади объектива; *г* — решетка кластеров; l_1 — расстояние между сеткой и объективом, l_2 — расстояние между объективом и образцом, $D_{\text{л}}$ — диаметр лазерного пучка, $D_{\text{об}}$ — диаметр объектива, d_0 — сторона квадрата ячейки в сетке, d_g — диаметр пятна в решетке, h_1 — шаг микросетки, h_2 — шаг решетки.

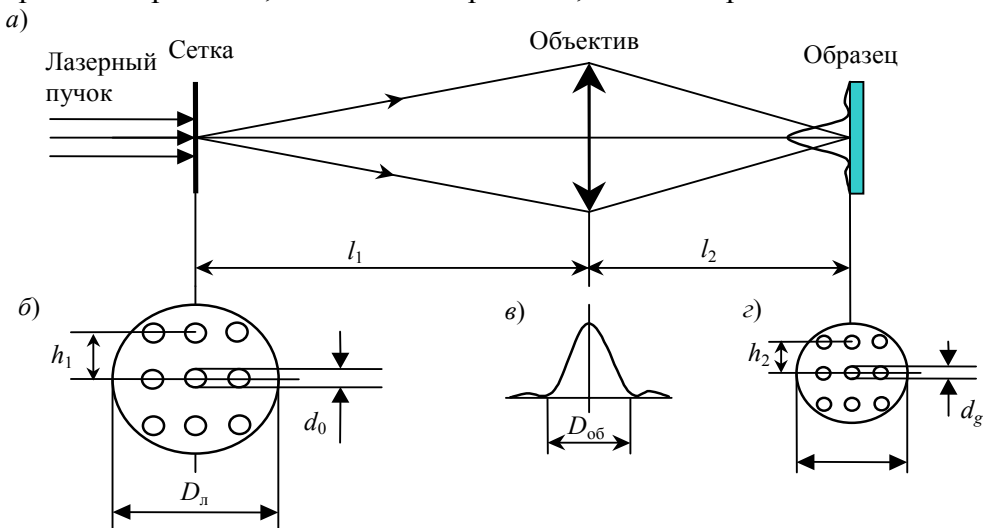


Рис. 2

Принцип работы оптической схемы проекционного лазерного облучения следующий: лазерный пучок мощностью P_0 и диаметром $D_{\text{л}}$ проходит через микросетку со стороной квадратной ячейки d_0 и разделяется на отдельные пучки. Количество пучков зависит от соотношения $D_{\text{л}}$ и d_g . Мощность пучка лазера, прошедшего через одно отверстие микросетки, вычисляется по формуле

$$P_1 = \frac{S_2}{S_1} P_0 = \frac{d_g^2}{D_{\text{л}}^2} P_0, \quad (1)$$

где S_1 — площадь сечения лазерного пучка; S_2 — площадь пятна в зависимости от размера отверстия микросетки.

Здесь в формуле (1) вместо площади ячейки сетки приводится площадь пятна. Это объясняется следующим образом. После прохождения через микросетку разделенные лазерные пучки расходятся за счет дифракции, фокусируются объективом и проецируются на подложку. Если увеличение объектива большое и размеры отверстий на микросетке малые, то изображение отверстия микросетки можно считать точечным пятном. Диаметр объектива должен быть достаточным, чтобы „поймать“ все пучки, расположенные в центральной части исходного лазерного пучка. По теории дифракции [7] максимальная мощность лазерного пучка в его центральной части составляет $0,83 P_0$. Тогда мощность излучения, формирующего пятно на подложке,

$$P_2 = 0,83P_1 = 0,83 \frac{d_g^2}{D_{\text{л}}^2} P_0. \quad (2)$$

Распределение энергии в пятне на подложке считается гауссовым. Эта мощность P_2 может быть использована для локального плавления и локального испарения кремния.

Например, для лазера с длиной волны излучения $\lambda=157$ нм, при относительном отверстии объектива $A = 1:1$ график распределения энергии (E) на поверхности пятна представлен на рис. 3, а, а график зависимости диаметра пятна от долей энергии облучения (E'), рассчитываемой с использованием программы ZEMAX, — на рис. 3, б. Анализ графика (см. рис. 3, б) показывает, что при доле энергии облучения, составляющей 50 % от полной энергии, диаметр пятна $d_g \approx 100$ нм. Тогда мощность облучения этого пятна

$$P_3 = 0,5P_2 = 0,5 \cdot 0,83 \frac{d_g^2}{D_{\text{л}}^2} P_0 = 0,415 \frac{d_g^2}{D_{\text{л}}^2} P_0.$$

Следовательно, плотность мощности лазерного излучения, Вт/мм², формирующего это пятно, можно вычислить по формуле

$$\tilde{P} = \frac{P_3}{S_3} = 0,415 \frac{d_g^2}{D_{\text{л}}^2} P_0 / \pi r^2 = 0,415 \frac{d_g^2}{D_{\text{л}}^2} P_0 / \pi (5,10^{-5})^2 = 5,29 \cdot 10^7 \frac{d_g^2}{D_{\text{л}}^2} P_0, \quad (3)$$

где S_3 — площадь пятна на поверхности подложки.

По формулам (2) и (3) при заданных значениях диаметров $D_{\text{л}}$ и d_g (шаг сетки) можно вычислить мощность лазера, необходимую для формирования на поверхности кремния наноструктуры в виде массива пятен, в центре каждого из которых находится область испарения. Диаметр этой области выбирается исходя из распределения энергии (см. рис. 3, б).

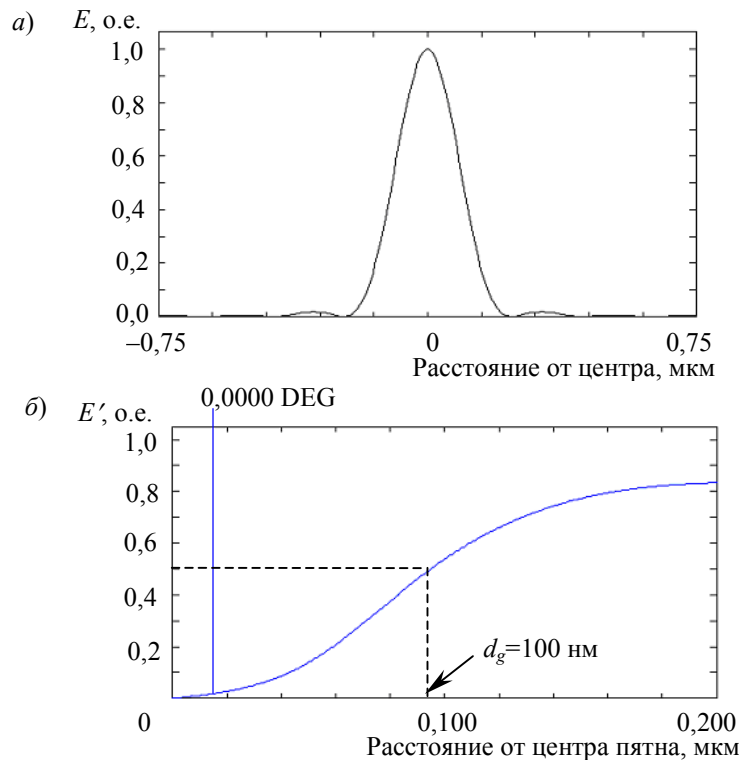


Рис. 3

Расстояние между пятнами зависит от коэффициента увеличения оптической системы, так как массив пятен представляет собой изображение микросетки, полученное проекционным способом. При достаточной мощности лазера размер пятен и расстояние между ними могут регулироваться шагом сетки и коэффициентом увеличения оптической системы.

Эксперимент. Обсуждение результатов. В качестве источника излучения был использован импульсный волоконный лазер типа YLP с длиной волны $\lambda=1,06$ мкм и частотой импульсов $f=200$ Гц. Образцы представляли собой пластины монокристаллического кремния КЭФ-4,5 (100) с толщиной слоя окисла SiO_2 , равной 100 нм. Оптическая проекционная схема включала в себя объектив и микросетку, в качестве которой использовалась медная сетка с шагом 270 мкм (зазор 170 мкм, толщина нити 100 мкм). Коэффициент увеличения оптической системы составлял 24. Образцы облучались сканирующим лазерным пучком. Мощность лазера изменялась. Область сканирования составляла 3×3 мм².

Полученные образцы были исследованы оптическим методом. Для наблюдений и получения микрофотографий использовался оптический интерференционный микроскоп МИИ-4. Фотографирование производилось на цифровую камеру с высоким разрешением.

При облучении кремниевых подложек пучком лазера через микросетку была определена пороговая мощность $P_{\text{п}} = 122$ мВт, превышение которой сопровождалось возникновением на окисленной поверхности кремния нанокластеров кремния в виде регулярного массива.

На рис. 4 приведены фотоизображения структур областей облучения лазером с применением интерференционно-проекционной оптической системы при разных значениях мощности. На микрофотографиях в областях сканирования видны регулярные нанокластерные структуры, представляющие собой нанокластеры кремния в диоксиде кремния. Видно также, что размер кластеров зависит от значения мощности лазера. Когда мощность достигает значения, достаточного для испарения, в области облучения появляется „матрица кластеров“ (см. рис. 4, а), в которой расположение кластеров определяется расположением центров ячеек микросетки. При возрастании мощности лазера размер кластеров вначале просто увеличивается, затем увеличение сопровождается появлением деформированного слоя вокруг кластера. Дальнейшее увеличение мощности приводит к увеличению размеров кластеров и площади деформированных областей вокруг них (см. рис. 4, б, в). Наконец, деформированные области вокруг растущих кластеров смыкаются (см. рис. 4, г, д). Изображение области облучения, полученное без использования оптической проекционной системы, приведено на рис. 4, е.

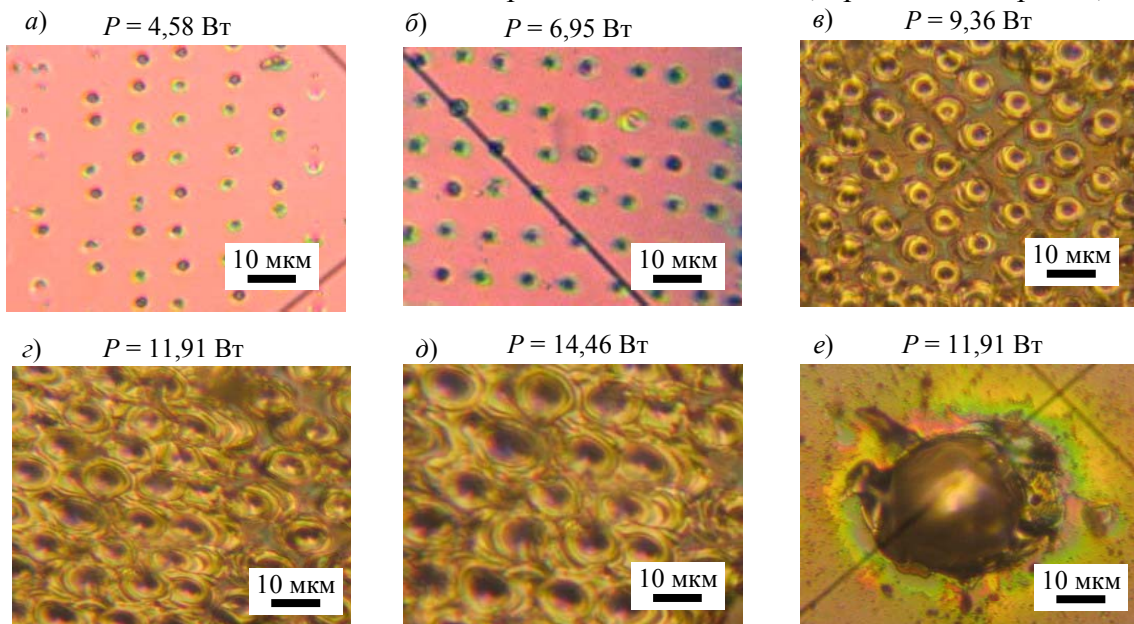


Рис. 4

Заключение. Использование рассмотренного в настоящей статье метода проекционного лазерного облучения позволило получить следующие основные результаты и сделать конкретные выводы:

— разработана лазерно-дифракционная методика формирования матрицы кластеров кремния в системе кремний — диоксид кремния;

— для деления лазерного пучка использована микросетка; показано, что плотность кластеров кремния в матрице зависит от шага ячеек в микросетке или от разрешающей способности дифракционной решетки;

— определена пороговая мощность лазера, превышение которой сопровождается возникновением на окисленной поверхности кремния нанокластеров кремния в виде регулярного массива;

— показано, что при увеличении мощности лазера размер кластеров увеличивается, затем вокруг кластеров появляются деформированные области; дальнейшее увеличение мощности приводит к увеличению размеров кластеров и площадей деформированных областей вплоть до их смыкания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. 1998. Т. 32, № 1. С. 3—18.
2. Пат. № 2214359 РФ. Способ формирования решетки нанокластеров кремния на структурированной подложке / А. М. Скворцов, В. И. Соколов, Р. А. Халецкий, Е. Г. Фролова. Рег. 20.10.2003 г. Приор. от 05.09.2002 г.
3. Вейко В. П., Дышловенко С. С., Скворцов А. М. Лазерное микроструктурирование поверхности кремния // Диагностика и функциональный контроль качества оптических материалов: науч.-техн. сб. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. Ч. 2. С. 138—153.
4. Veiko V. P. Laser microshaping: Fundamentals, practical application, and future prospects // RIKEN Rev. 2001. N 32. P. 11—18.
5. Dolgaev S. I., Lavrishev S. V., Lyalin A. A. et al. Formation of conical microstructures upon laser evaporation of solids // Appl. Phys. 2001. Vol. 73. P. 177—181.
6. Соколов В. И., Плотников В. В., Скворцов А. М. и др. Особенности термического окисления кремния, обусловленные несоответствием на межфазной границе // Изв. вузов. Электроника. 2002. № 5. С. 17—21.
7. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 4. Оптика. М.: Наука — Физмалит, 1998.

Сведения об авторах

- Альберт Матвеевич Скворцов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: a-skvortsov@yandex.ru
- Владимир Анатольевич Чуйко** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий; ст. преподаватель
- Ле Зуи Туан** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики
- Фам Куанг Тунг** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: quang_tung@yahoo.com

Рекомендована кафедрой
проектирования компьютерных
систем

Поступила в редакцию
27.11.08 г.

В. Е. МАХОВ, А. Г. ПАЛАЕВ, А. И. ПОТАПОВ

АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ШВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Рассматривается задача автоматизации контроля качества сварных швов с использованием компьютерных технологий на основе контрольно-измерительной системы технического зрения с элементами робототехники. Приводится описание комплексного виртуального прибора, предназначенного для управления микроконтроллером и обработки изображения.

Ключевые слова: ультразвуковые технологии, компьютерные технологии, контроль качества сварных швов.

Использование ультразвуковых технологий позволяет получать высокое качество обработки различных полимерных материалов и изделий на их основе. Так, например, по сравнению с традиционными методами сварки ультразвуковая сварка полимеров [1] обладает такими преимуществами, как высокая прочность соединения свариваемых материалов и отсутствие внутренних напряжений сварного шва; кроме того, не требуется предварительная подготовка поверхности изделия и зачистка поверхности шва после сварки.

Технология с применением ультразвука для изготовления различных изделий требует решения ряда проблем, связанных с выбором оптимальных режимов обработки, влияющих на качество получаемого изделия. Так, на качество сварки влияют амплитудно-частотная характеристика ультразвукового инструмента; акустическая мощность, вводимая в зону сварки; усилие прижима ультразвукового инструмента к свариваемому изделию; скорость перемещения ультразвукового инструмента. Объективный контроль качества получаемого изделия (в частности, прочности и дефектности сварного шва) непосредственно связан с выбором оптимальных режимов обработки и является самой трудоемкой операцией в технологическом процессе. Даже после отработки технологических режимов ультразвуковой сварки в большинстве случаев требуется хотя бы выборочный контроль получаемых изделий. Существующие в настоящее время методы контроля качества изделий [2], получаемых по ультразвуковой технологии, довольно трудоемки. В связи с этим задача автоматизации контроля качества таких изделий весьма актуальна.

Одним из эффективных методов неразрушающего контроля является оптический метод. Сварные изделия из полимерных материалов имеют различную толщину и разные оптические свойства, что затрудняет автоматизацию процесса контроля. Этим обуславливается необходимость разработки схемы (и методики) контроля, которая может быть встроена в технологический цикл производства таких изделий. Кроме того, система контроля должна предусматривать возможность использования различного технологического оборудования для ультразвуковой сварки. Типичные примеры сварочного оборудования представлены на рис. 1, где 1 — ультразвуковой генератор УЗГ-200 со сварочным пистолетом; 2 — ультразвуковой станок для прошивки камня; 3 — ультразвуковой диспергатор; 4 — ультразвуковая сварочная машина; 5 — генератор УЗДН-1.

Для экспериментальных исследований контроля качества были выбраны образцы сварных изделий, в частности: две части полотна толщиной 340+340 мкм и крепежный кант, а также две части прозрачного полотна толщиной 180+180 мкм.

Исследования проводились с использованием метода оптической микроскопии „на просвет“ [3]. Основной трудностью при проведении контроля этим методом является распределение дефектов сварки по объему шва материала (к дефектам сварки относятся, например,

непрояр, присутствие воздушных пузырей, расслоение). При использовании микрообъективов невозможно получить резкое изображение внутренней структуры материала по всей толщине с требуемым оптическим увеличением.

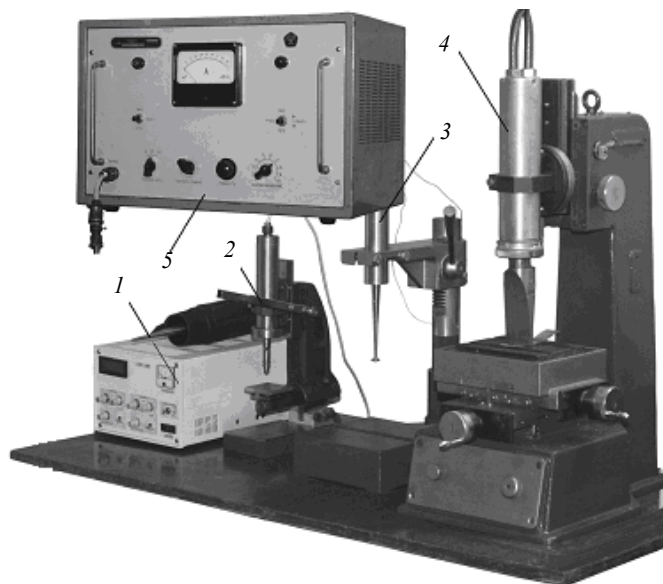


Рис. 1

Существующие в настоящее время автоматизированные системы получения и обработки объемного изображения имеют высокую стоимость. Например, универсальный цифровой видеомикроскоп высокого разрешения HIROX KH-7700 (производства Японии) позволяет производить запись 3D-изображений дефектов и измерение размеров элементов структуры, а также сохранять изображения объектов и результаты измерений с возможностью документирования и передачи по компьютерной сети, однако он не допускает требуемой модернизации алгоритмов контроля при обработке изображения.

Для проведения экспериментов по контролю качества сварных швов были использованы компьютерные технологии фирмы “National Instruments” (NI — США), включающие контрольно-измерительную систему технического зрения на базе оптического микроскопа с элементами робототехники [4]. Эти технологии позволяют обеспечить программно управляемое пошаговое изменение плоскости фокусировки.

Внешний вид макета автоматизированной системы контроля качества сварного шва представлен на рис. 2. Система контроля состоит из универсального оптического микроскопа 1 (ОРТИТЕСН XSP-128-102) с тремя ахроматическими объективами: $4\times$, $10\times$ и $40\times$. Вместо окуляра использована универсальная электронно-оптическая система регистрации изображения 2 (окулярная цифровая камера “MYscope 130 M”) с функцией улучшения частотно-контрастной характеристики изображения при съемке микрообъектов. Цифровая камера имеет чувствительный элемент — матрицу КМОП размером $1/2''$. Максимальное разрешение одиночного кадра — 1280×1024 .

Пошаговая фокусировка на объект контроля 6 осуществляется с помощью электропривода 3, связанного с механизмом тонкой фокусировки. Управление электроприводом осуществляется микроконтроллером NXT 4, управляемым, в свою очередь, виртуальным прибором (ВП). Для контроля сварного шва необходимо получить серию изображений с пределами плоскости фокусировки микроскопа от нижней поверхности образца до верхней поверхности. Предварительным сканированием плоскости фокусировки определяется верхняя поверхность контролируемого изделия. Во время сканирования определяется также толщина контролируемого изделия; изображение с цифровой камеры передается в компьютер 5. Захват кадров изображения и его обработка осуществляются виртуальным прибором, созданным в прило-

жении NI “Vision Assistant” с драйвером видеокamеры USB (webcam 1.4.1). Прямое механическое управление микроскопом (через микроконтроллер NXT) реализуется с использованием компьютера при помощи ВП управления.

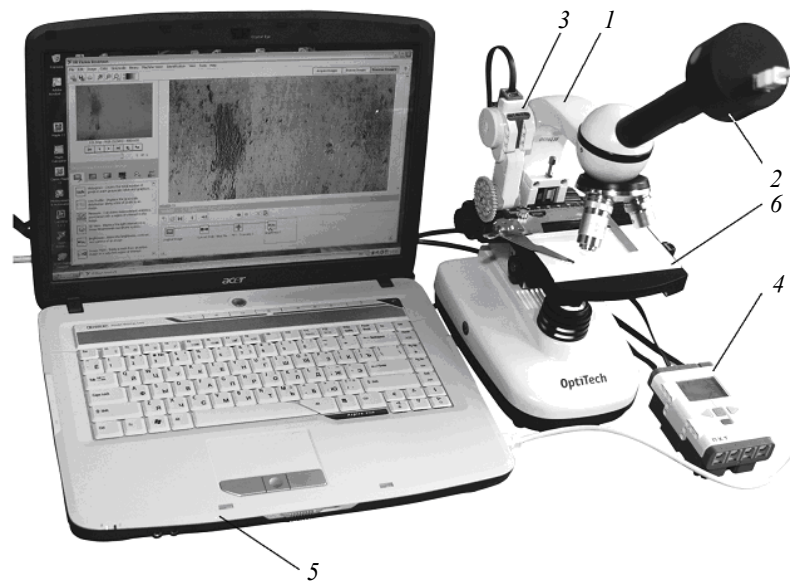


Рис. 2

Для механического привода столика микроскопа по вертикали в данном макете системы контроля использован электропривод 3 со встроенным редуктором от конструктора “LEGO MINDTORMS”. Электропривод с зубчатым колесом (диаметром $D = 41,5$ мм и числом зубьев $n = 40$) закреплен с левой части станины микроскопа. На левой рукоятке микроскопа, осуществляющей вертикальный подъем предметного столика, закреплен венец зубчатого колеса (с вырезанной центральной частью), наружный диаметр зубчатого венца $D = 37$ мм, $n = 36$. Один шаг двигателя (1°) обеспечивает перемещение предметного столика на $\Delta h = \beta / 360$, где $\beta = 40 / 36$ — коэффициент редукции. Аналогичным образом может быть реализовано автоматическое горизонтальное перемещение предметного столика по двум другим координатам. Возможности микроконтроллера позволяют использовать контактные датчики для фиксации перемещения предметного столика в верхнем и нижнем положении, а световой датчик — для контроля освещенности. Управление микроконтроллером может осуществляться как по кабелю (USB), так и по беспроводному каналу связи (Bluetooth).

Для автоматизации контроля был разработан комплексный виртуальный прибор, на лицевой панели которого отображены элементы изображений и элементы управления микроскопом (группы „калибровка“, „толщина“ и „контроль“). ВП первоначально отображает полученные оптические изображения контролируемого изделия, а после обработки — окончательное изображение. На основе выбора критерия дефектности сварного шва (пузыри, расслоения, непровар) задается алгоритм анализа фрагмента изображения. В состав ВП входит ряд виртуальных приборов нижнего уровня, обеспечивающих управление микроконтроллером и обработку изображения [5, 6]:


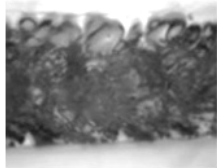



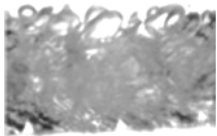

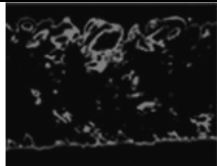


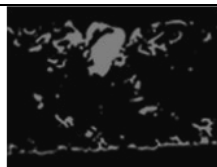
- ВП₁ — приведение столика в крайнее нижнее положение;
- ВП₂ — приведение столика в крайнее верхнее положение;
- ВП₃ — определение толщины слоя образца;
- ВП₄ — фокусировка на верхнюю поверхность образца;
- ВП₅ — получение серии фотоснимков с пошаговым изменением плоскости фокусировки;
- ВП₆ — обработка изображений;
- ВП₇ — измерение параметров дефектности слоя материалов.

Виртуальные приборы ВП₆ (анализ) и ВП₇ (измерение) осуществляют контроль исследуемого образца по полученной серии изображений $\{Im_k\}_{k=1}^M$ при различном положении плоскости оптической фокусировки микроскопа: изображение Im_1 получено с верхней поверхности образца, изображение Im_M — с нижней поверхности, а изображение $Im_k, 1 < k < M$, получено при плоскости фокусировки внутри слоя образца. Шаг перемещения плоскости фокусировки определяется толщиной H слоя образца и дискретностью шага: $h = H / (M - 1)$. Таким образом, координата плоскости фокусировки от верхней поверхности образца равна $z = (i - 1)h$. Для различных образцов использовались различные ВП обработки и анализа полученных изображений.

Для выявления параметров дефектности сварных швов необходимы различные алгоритмы обработки. Поэтому на стадии исследования создавался скрипт (последовательность действий) алгоритма обработки в программе “Vision Assistant”, версия 8.2.1 [6, 7]. Так, например, основой алгоритма обработки сварного шва, имеющего некоторое количество пузырей, является обработка нескольких изображений, полученных путем последовательного изменения плоскости фокусировки.


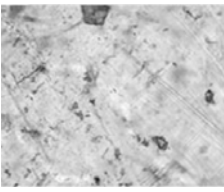


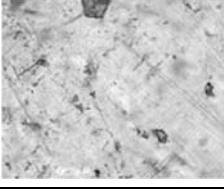

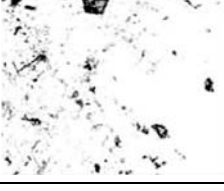






Технология построения алгоритма обработки изображения (в программе “Vision Assistant”) и результат ее применения для определения дефектности сварных швов при наличии пузырей представлены в табл. 1.

Таблица 1






№ п/п	Иконка функции	Функция	Параметры настройки функции	Результат (изображение сварного шва)
1		Получение изображения (<i>Get Image 1</i>)	—	
2		Запись изображения в буфер (<i>Add Buffer</i>)	Операция: запоминание в буфере	То же
3		Получение следующего изображения (<i>Get Image 2</i>)	—	Промежуточное изображение
4		Арифметические и логические операции с изображениями	Сложение полученного изображения с изображением, записанным в буфере	
5		Пороговая обработка — преобразование цветного изображения в битовое (<i>Color Threshold</i>)	Ручная настройка минимальных и максимальных значений компаратора для RGB-канала	
6		Фильтрация с использованием быстрого преобразования Фурье — отсечение низких частот (<i>FFT Filter ⇒ Truncate</i>)	Режим — прохождение низких частот	Промежуточное изображение
7		Дополнительные морфологические функции (<i>Advanced Morphology</i>)	Заполнение замкнутых полос в изображении	

При исследовании другого образца — двух частей прозрачного полотна — для определения дефектности сварного шва с непроваром использовалось изображение, полученное положением плоскости фокусировки в середину слоя шва. Основной проблемой является получение такого изображения в процессе автоматического сканирования плоскости фокусировки. Если свариваемые пленки имеют равную толщину (как в исследуемом образце), то эта плоскость находится посередине между верхней и нижней поверхностью изделия. Критерием фокусировки на поверхность сварного шва служит появление высокочастотных составляющих сигнала в непрерывной серии получаемых изображений. Алгоритм обработки изображения для сварных швов с непроваром реализуется функциями [6,7], представленными в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Иконка функции	Функция	Параметры настройки функции	Результат (изображение сварного шва)
1		Получение исходного изображения, извлечение цветовой составляющей (RGB, HSV или HSL) (<i>Color Plane Extraction</i>)	Составляющая "green"	
2		Фильтрация — медианное сглаживание (<i>Filters ⇒ Smoothing — Median</i>)	Настройка зависит от полученного изображения	Промежуточное изображение
3		Фильтрация — „свертывание с ядром“ в целях детализации изображения в ярких зонах (<i>Filters ⇒ Convolution — Highlight Details</i>)	Размер матрицы ядра — 3×3: $\begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 10 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$	
4		Пороговая обработка — преобразование изображения градаций серого в битовое; ручная настройка (<i>Threshold</i>)	Выбор порогового диапазона зависит от полученного изображения	
5		Дополнительные морфологические функции — удаление (1) малых фрагментов структуры изображения (<i>Advanced Morphology ⇒ Remove Small Objects 1</i>)	Число итераций — 6	Промежуточное изображение
6		Дополнительные морфологические функции — разделение фрагментов (<i>Advanced Morphology ⇒ Separate Objects</i>)	Размер матрицы — 3×3, число итераций — 1	Промежуточное изображение
7		Фильтрация с использованием быстрого преобразования Фурье — отсеечение низких частот (<i>FFT Filter ⇒ Truncate</i>)	Режим — прохождение низких частот	
8		Инверсия бинарного изображения (<i>Binary Image Inversion</i>)	—	

Продолжение табл. 2

№ п/п	Иконка функции	Функция	Параметры настройки функции	Результат (изображение сварного шва)
9		Дополнительные морфологические функции — удаление (2) малых фрагментов структуры изображения (<i>Advanced Morphology</i> ⇒ <i>Remove Small Objects 2</i>)	Число итераций — 12	 Число элементов — 6
10		Анализ частиц изображения (<i>Particle Analysis</i>)	Определение параметров частиц	 Число найденных окружностей — 8
11		Нахождение в частицах изображения вписанных окружностей (<i>Circle Detection</i>)	Диапазон радиусов: $R_{\min} = 3 \text{ пкс} \div R_{\max} = 200 \text{ пкс}$	 Число найденных окружностей — 8

Некоторые функции представленного в табл. 2 алгоритма обработки (например, разделение фрагментов) являются избыточными для отдельных типов образцов, т.е. мало влияют на конечный результат обработки изображения. Однако введение таких избыточных функций позволяет сделать алгоритм более универсальным и использовать его для широкого круга изделий. В итоге это позволяет сократить количество типов изделий и критериев контроля и, как следствие, количество виртуальных приборов обработки изображений.

Использование алгоритма, приведенного в табл. 2, для обработки изображения сварного шва с пузырями не дает удовлетворительного результата (выявляются центры крупных пузырей, появляются темные кластеры). И наоборот, применение алгоритма обработки „пузырных“ швов не совсем эффективно для контроля расслоений. Поэтому для каждого типа изделий оценка качества должна производиться по собственному алгоритму.

Алгоритмы, аналогичные рассмотренным, были разработаны и для других типов образцов, что позволило адекватно определять и численно оценивать дефектность сварных швов. Практическим критерием дефектности является прочность шва. В основе всех алгоритмов лежат функции пороговой обработки цветного изображения, а также функции фильтрации и измерения параметров бинарного изображения. Функция пороговой обработки при различном положении плоскости фокусировки дает достаточно хорошее представление о бездефектности сварного шва. При фокусировке в середину слоя сварного шва, после пороговой обработки изображения, можно достаточно точно оценить его качество.

Анализ различных сварных швов показал возможность быстрого и надежного определения дефектности контролируемого шва по целому ряду параметров изображения. Система контроля обучаемая и позволяет на основе визуального сравнения дефектов в изображении шва изделия и результатов обработки контролировать работу алгоритма. В дальнейшем планируется создание автоматизированного технологического процесса ультразвуковой обработки изделий со встроенной контрольно-измерительной системой (АСУ) на базе единой технологической платформы фирмы “National Instruments” (с использованием пакета “Control Design Toolkit”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков С. С., Орлов Я. Н., Черняк Б. Я. Сварка пластмасс ультразвуком. М.: Энергия, 1974.
2. Гурвич А. К., Ермолов И. Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. Киев: Техника, 1972.
3. Скворцов Г. Е., Панов В. А., Поляков Н. И., Федин Л. А. Микроскопы. Л.: Мишиностроение, 1969.
4. Махов В. Е., Палаев А. Г., Потапов А. И. Автоматизация контроля сварных швов на базе технологий фирмы “National Instruments”. Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии “National Instruments” // Сб. тр. VI Междунар. науч.-практ. конф. М.: РУДН, 2007. С. 384—393.
5. Getting Started with the LabVIEW Toolkit for LEGO® MINDSTORMS® NXT [Электронный ресурс]: <www://ni.com>.
6. NI Vision Assistant Tutorial USA: National Instruments Corporation, 2005.
7. Визальтер Ю. В., Желтов С. Ю., Князь В. А. и др. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision. М.: ДМК Пресс, 2007.

Сведения об авторах

- Владимир Евгеньевич Махов** — канд. техн. наук, доцент; Северо-Западный государственный заочный технический университет, кафедра приборов контроля и систем экологической безопасности, Санкт-Петербург; E-mail: mahov@nwpi.ru
- Александр Григорьевич Палаев** — Северо-Западный государственный заочный технический университет, Санкт-Петербург; директор научно-исследовательского центра; E-mail: alexpalaev@yandex.ru
- Анатолий Иванович Потапов** — д-р техн. наук, профессор; Северо-Западный государственный заочный технический университет, кафедра приборов контроля и систем экологической безопасности, Санкт-Петербург; E-mail: potapov@nwpi.ru

Рекомендована кафедрой
приборов контроля
и систем экологической безопасности

Поступила в редакцию
03.12.07 г.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 378.14.015.62:658.52+5308+681.2

С. А. БОЯШОВА

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Рассматривается метрологический подход к построению автоматизированной системы тестирования, разработанной в целях оценки уровня подготовки специалистов высшей школы.

Ключевые слова: профессиональная компетентность, автоматизированная система тестирования, система сертификации, системный подход, метрологический подход.

Известно, что всякое научное понятие имеет смысл, если его связывают с конкретными приемами наблюдения и определения. Объективное оценивание уровня подготовки специалистов возможно лишь тогда, когда существуют методы объективного измерения этого уровня [1]. Для проведения таких измерений необходимы надежные средства и методы, позволяющие обеспечить управление подготовкой специалиста и последующий контроль. В связи с этим основой построения автоматизированных систем тестирования (АСТ), которые в настоящее время широко используются при аттестации специалистов в различных областях профессиональной деятельности, в том числе и в области приборостроения, является метрологический подход.

В основу метрологического подхода положена система определения показателей уровня подготовки специалиста — грамотности, способности к профессиональной деятельности и профессиональной компетентности. Перечисленные критерии являются основными сертификационными показателями, которые могут быть формализованы и измерены.

Независимо от природы исследуемого процесса измерения должны проводиться в строгом соответствии с общим метрологическим стандартом [2]. Совокупность операций и правил, выполнение которых обеспечивает получение необходимых результатов измерений в соответствии с принятым методом, называется методикой измерений.

Общую методику измерений в АСТ можно представить шестью следующими основными действиями.

1. Определение объекта исследования (перечня исследуемых компетенций и их структурных элементов).
2. Уточнение совокупности исследуемых показателей, характеризующих данный объект.
3. Определение принципов и методов измерения, выбор средств измерений и необходимого оборудования.
4. Вычисление значений искомых величин, абсолютной и относительной погрешностей результата измерений.

5. Проведение повторных контрольных измерений при отсутствии сходимости результатов.

6. Статистический и экспертный анализ результатов измерения, формирование экспертного заключения.

В соответствии с приведенной методикой формируется основанная на метрологическом подходе структура системы измерения уровня профессиональной грамотности, способности к профессиональной деятельности и профессиональной компетентности специалистов. Применение этой системы позволяет решить главные задачи любого измерения — обеспечить единство измерений, при котором их результаты выражаются в единой системе единиц, а погрешность результатов известна с заданной вероятностью.

Основным принципом измерения показателей является их зависимость от уровня подготовки специалиста. Чем выше уровень способностей специалиста в когнитивной и аффективной областях развития, тем выше уровень его профессиональной подготовки и выше результаты тестирования. Чем больше значения измеренных показателей, тем выше вероятность того, что испытуемый может эффективно осуществлять профессиональную деятельность в рамках компетенций, исследованных в процессе тестирования.

Основным методом измерений в автоматизированной системе тестирования является сравнение исследуемых показателей с мерой. Мера — это средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения измеряемого показателя, характеризуемого одним или несколькими заданными размерами, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью. Меры создаются на основе Федерального стандарта или квалификационных требований и служат эталонами для разработки тестов.

Тестирование (сравнение исследуемых показателей с мерой) предполагает одновременное измерение тестового балла и времени, затрачиваемого испытуемым на выполнение всех тестовых заданий (совместное измерение). Величина тестового балла испытуемого и время, затраченное им на выполнение заданий, не имеют явной взаимозависимости. Слабо подготовленный испытуемый может затрачивать меньшее время на выполнение теста, чем хорошо подготовленный испытуемый, и наоборот. На рис. 1 приведен пример графика прохождения теста тремя (1—3) испытуемыми (здесь N — число тестовых заданий).

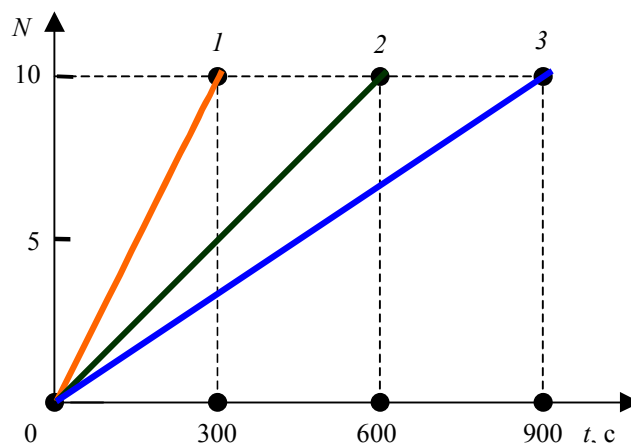


Рис. 1

Анализ графика показывает, что десять заданий теста первый испытуемый выполнил быстрее, чем второй и третий. Вместе с тем нельзя утверждать, что первый испытуемый обладает наибольшей скоростью мышления, чем двое других: результат мыслительных операций, производимых испытуемым, достигается быстро, но может быть неверным.

Для определения различий между уровнями подготовки испытуемых необходимо оценить качество выполнения тестовых заданий, например измерить такой показатель, как уровень грамотности. В итоге может оказаться, что первый испытуемый за 300 с правильно

выполнил только два задания из 10 предложенных, второй за 600 с — 5 заданий из 10, третий за 900 с — 9 заданий из 10. Отсюда следует, что скорость выполнения мыслительных операций, производимых правильно третьим испытуемым, выше, чем у первого и второго, и, следовательно, он обладает более высоким уровнем грамотности (рис. 2).

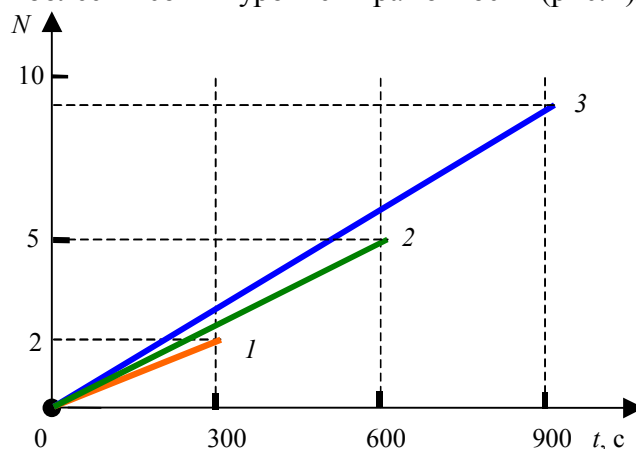


Рис. 2

При обработке данных и анализе результатов в АСТ используются методы математической статистики: выборочный метод, корреляционный анализ, дисперсионный анализ. Основными характеристиками качества результата измерения являются точность и достоверность. Достоверность результатов определяется качеством выбранных средств и методов измерения, погрешности которых не превышают заданных границ с необходимой достоверностью. На практике далеко не всегда удается разграничить систематические и случайные погрешности, хотя их природа различна. Особенно трудно выявить систематические погрешности; в связи с этим выделенные группы погрешностей в практике измерений исследуются отдельно.

Рассмотренный метрологический подход к тестированию как в процессе подготовки специалистов, так и при их аттестации может служить основой создания автоматизированной системы оценки уровня подготовки специалистов, что позволит обеспечить объективность измерений в педагогической практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюрин Н. И. Введение в метрологию. М.: Изд-во стандартов, 1976.
2. ГС. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. МИ 2247-93, СПб.: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1994.

Сведения об авторе

Светлана Анатольевна Бояшова — канд. пед. наук; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики; нач. отд. мониторинга; E-mail: boyashova@mail.ru

SUMMARY

P. 5—10.

ON ESTIMATION OF EFFICIENCY OF OBJECT-DETECTING FACILITIES

The problem of efficiency estimation for an object-detecting facility is discussed on the base of detection theory. Consideration is given to detection probability as the major characteristic of the detecting instrument in question, and contact probability accounting for the effect of noise on location procedure. Equations are derived for the detection probability and for a quantitative characteristic of the detection productivity.

Keywords: object detection, efficiency of detecting facility, detection probability, contact probability, detection productivity.

Data on authors

- Igor F. Shishkin** — Dr. Techn. Sci., Professor; North-West State Correspondence Technical University, Department of Metrology, St. Petersburg; E-mail: kaf_metro@nwpi.ru
- Aleksey G. Sergushev** — Post-Graduate Student; North-West State Correspondence Technical University, Department of Metrology, St. Petersburg; E-mail: atel@fromru.com

P. 10—15.

ACTION PARAMETERS OF ENERGY SPECTRUM OF WAVELET TRANSFORM

The new method is proposed for estimation of spectral density of signal energy and detailed components obtained with the use of discrete wavelet-decomposition of the signal. Efficiency of the method is checked upon investigations of surface profiles of metallic samples and temporal series corresponding to kinetic tremor of human hand arising in keeping isometric force of the human hand.

Keywords: wavelet transform, spectral energy density, cumulate, action parameters.

Data on authors

- Victor M. Musalimov** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Peterburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mekhatronics; E-mail: musVM@yandex.ru
- Olga E. Dick** — Cand. Phys.-Math. Sci.; Pavlov Institute of Physiology, St. Peterburg; E-mail: glazov.holo@mail.ioffe.ru
- Andrey E. Tyurin** — Magistrate; St. Peterburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mekhatronics; E-mail: andrey4t5@rambler.ru

P. 16—20.

PRINCIPLES OF CONSTRUCTION AND STRUCTURE OF AUTOMATED HARD- AND SOFTWARE COMPLEX FOR ESTIMATION OF STATE OF HEALTH

A portable complex of instruments operated under a unified program shell for express-diagnostics of state of human health is developed and affords a quasi-continuous monitoring of cardiovascular, digesting, endocrine, urinogenital, respiratory, and nervous systems. Schematics of hardware and flowcharts of software are presented. Classification of states of health and algorithm of diagnostic decision are described.

Keywords: diagnostics, diagnostic complex, noninvasive method, express-diagnostics, functional systems, psychophysiological state.

Data on authors

- Elena N. Petrova* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Designing;
E-mail: heleonores@mail.ru
- Konstantin G. Korotkov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Scientific Research Institute of Physical Culture, St. Petersburg; Deputy Director; E-mail: gdv@korotkov.org
- Dmitry V. Orlov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Designing;
E-mail: mitya-9@mail.ru
- Anna K. Korotkova* — Cand. Psycholog. Sci.; Scientific Research Institute of Physical Culture, St. Petersburg

P. 21—26.

ADAPTIVE CONTROL OF LINEAR SYSTEMS WITH UNKNOWN SIGN OF HIGH-FREQUENCY GAIN

The problem of adaptive optimization of linear systems under parametric and functional uncertainty, and lack of information on the sign of high-frequency gain is considered. A solution to the problem is obtained on the base of modified adaptation algorithm of a high order with the use of a function allowing for compensation of the sign uncertainty. Results of numerical modeling are presented.

Keywords: adaptive control, modified algorithm of adaptation of the high order, high-frequency gain, observer.

Data on authors

- Igor B. Furtat* — Cand. Techn. Sci.; Astrakhan State Technical University, Department of Mathematics in Engineering Education;
E-mail: cainenash@mail.ru
- Aleksander M. Tsykunov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Astrakhan State Technical University, Department of Mathematics in Engineering Education;
E-mail: tsykunov_al@mail.ru

P. 27—30.

OPTIMAL CONTROL OVER NUCLEAR REACTOR WITH THE ACCOUNT FOR RANDOM DISTURBANCES

The problem of optimal control over nuclear reactor on the base of incomplete data is considered. The proposed solution to the problem exploits the separation principle with linearized Kalman filter and the minimax control algorithm. Numerical modeling is used to derive initial parameters of the boundary-value problem affording convergence of iterative procedure when random perturbations occur.

Keywords: optimum filtering, minimax control principle, Newton method.

Data on author

- Dmitry S. Kabanov* — GNPP „Region“, Moscow; Engineer; E-mail: kabanovds@mail.ru

P. 31—34.

IMPROVEMENT OF NETWORK SECURITY ON THE BASE OF DATA STREAM ANALYSIS

Application of data stream analysis in broadcast storms detecting methods and in dynamic construction of a network topology is considered. A technique for broadcast storm detection in a network, location of the storm source and invaded area is proposed. Comparison is presented of criteria used for detection of identical sequences of network traffic patterns. A software developed for processing of statistical data on network performance is described.

Keywords: network security, broadcast storm, network topology.

Data on author

Mikhail Yu. Budko

— Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Emergency Situations Monitoring and Forecasting; E-mail: bmu@mail.ru

P. 34—37.

APPLICATION OF MULTICRITERIA PREDICTION METHODS IN SYSTEMS FOR DETECTION OF NETWORK INTRUSIONS

Mathematical modeling of detection systems for network intrusion is considered. A method is proposed for network anomalies detection based on multicriteria prediction of security indices. Problem of computation of weighting coefficients accounting for time-dependent significance of prediction model is formulated and solved. The proposed approach is characterized by low enough computational complexity and does not depend on the type of criterion used for optimal prediction choice.

Keywords: intrusion detection, network anomalies detection, network security, multicriteria prediction.

Data on author

Alexey V. Guirik

— Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Emergency Situations Monitoring and Forecasting; E-mail: alexei.guirik@gmail.com

P. 38—41.

ESTIMATION OF NONLINEAR DISTORTION OF SIGNAL CAUSED BY ELECTRON AMPLIFIER

Nonlinear distortion of signal introduced by electron amplifier is investigated theoretically. Nonlinear distortion factor is calculated for a harmonic input signal. For a specified volt-ampere characteristic, the effect of operation point position on the nonlinear distortion level is analyzed.

Keywords: signal amplification, operation point, nonlinear distortion.

Data on author

Sergey I. Ziatdinov

— Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Space Instrument Making, Department of Information-Network Technologies; E-mail: kaf53@GUAP.ru

P. 42—46.

AUTOMATION OF MEDICAL SUPERVISION IN POLAR ZONE

Class of problems related to automation of health services provided by physicians in extreme conditions of polar zones is considered. Requirements on medical electronic instruments and other equipment used in Arctic and Antarctic expeditions are formulated. Approaches and solutions are described that have been applied in development of hardware and software components of automated working place of a polar doctor. The results are introduced into medical information system for polar expeditions.

Keywords: telemedical system, automated workplace, remote monitoring.

Data on author

Yury I. Senkevich — Dr. Techn. Sci.; St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Biomedical Informatics;
E-mail: senkevich@spiiras.nw.ru

P. 47—49.

SENSITIVITY OF OPTO-ELECTRONIC DEVICES AT LOW CONTRAST BETWEEN OBJECT AND BACKGROUND

The problem of affording potential noise stability of opto-electronic equipment at low contrast between registered object and background is discussed. Formulas are derived for potential sensitivity of opto-electronic devices for the case when the sensitivity is limited by photon noise of background current.

Keywords: system of primary processing of the information, receiver of optical radiation, threshold characteristic, input pupil, sensitivity.

Data on authors

Vsevolod D. Smirnov — Dr. Techn. Sci., Professor; Scientific Research Institute of TV, St. Petersburg;
E-mail: niit@infos.ru
Irina V. Knoroz — Post-Graduate Student; Scientific Research Institute of TV, St. Petersburg
Svetlana E. Gersanova — Post-Graduate Student; Scientific Research Institute of TV, St. Petersburg

P. 50—55.

ERROR IN MEASUREMENT OF RADIAL EXTENT OF A SURFACE AT MONOPULSE IRRADIATION

Analysis is presented of basic components of random error in measurement of radial expansion of an irradiated surface; the components in question include error caused by noise-induced shift of reading point, error determined by the signal level at a priori uncertain shape of irradiated surface and its reflectance, anomalous error occasioned by acceptance of noise excess for signal.

Keywords: detection and ranging, dispersion of estimates, pulse response, radial expansion.

Data on authors

Evgeny G. Lebedko — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Opto-Electronic Devices and Systems;
E-mail: eleb@rambler.ru
Nguyen Vu Tung — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Opto-Electronic Devices and Systems;
E-mail: eleb@rambler.ru

P. 56—61.

APPLICATION OF GRAPH MODELS FOR THE SPACE OF ALLOWABLE SOLUTIONS TO THE PROBLEM OF ARRANGEMENT OF ELECTRONIC ELEMENTS

Graph models are proposed for the space of allowable solutions to the problem of arrangement of electronic elements with the account for both communication and thermal criteria. Examples of suggested models are presented for various conditions of heat removal determined by module design of electronic devices.

Keywords: graph model, space of search, arrangement of electronic elements, thermal criterion.

Data on author

Evgeny N. Merkuhin — Cand. Techn. Sci.; Dagestan State Technical University, Department of Computing Technique, Makhachkala; E-mail: merkuhin@mail.ru

P. 61—65.

MATHEMATICAL MODELING OF OPERATION OF LOW-TEMPERATURE COOLING THERMOELEMENTS

Results of numerical modeling of operation of low-temperature thermoelements in maximal temperature difference mode are presented. The boundary value problem is solved for stationary thermal conductivity of thermoelement branches with temperature-dependent kinetic factors. Comparison is performed for efficiency of a *p*-branch thermoelement from bismuth telluride with that of a passive branch thermoelement from a high-temperature superconductor. Influence of contact resistance on thermocouple efficiency is taken into account.

Keywords: cooling thermoelement, superconductor, compound branch, contact resistance.

Data on author

Oleg I. Markov — Cand. Phys.-Math. Sci., Professor; Oryol State University, Department of Theoretical Physics and Mathematical Modelling; E-mail: O.I.Markov@mail.ru

P. 65—68.

THERMOPHYSICS LABORATORY OF LOW-TEMPERATURE

Description is presented of laboratory of low-temperature physics opened up at St. Petersburg State University of Low-Temperature and Food Technologies. The laboratory incorporates 14 test benches including thermal cells, controller, and various thermal data units. The laboratory is intended for scientific research but may also be used in education.

Keywords: physics and technique of low temperatures, thermal data unit, thermal cell.

Data on authors

Eugeny S. Platonov — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Low-Temperature and Food Technologies, Department of Physics

Igor V. Baranov — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Low-Temperature and Food Technologies, Department of Physics; E-mail: barigor@mail.ru

Alexey E. Platonov — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computing Technique; E-mail: platonov@lmt.ifmo.ru

P. 69—74.

FORMATION OF REGULAR ARRAY OF SILICON NANOCCLUSERS BY METHOD OF PROJECTION LASER IRRADIATION

Projection laser irradiation method is applied for formation of regular array of silicon nanoclusters within SiO₂ layer on silicon substrate. Pulsed fiber YLP laser with the wavelength of 1.06 μm is used as radiation source. Metal micro grid was introduced for laser beam splitting, and the resulting elementary beams are focused at oxidized silicon substrate with oxide thickness of 100 nm by objective lens. Density of silicon clusters in the array is shown to depend on the micro grid cells size. Threshold laser power is determined, and excess of the threshold is found to result in formation of a regular array of silicon nanocluster within the oxidized layer of silicon substrate. The clusters size increases and deformed areas arise around the clusters with further increase in laser power.

Keywords: nanocluster, nanocrystal, nanoelectronics, laser clusterization.

Data on authors

- Albert M. Skvortsov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Designing;
E-mail: a-skvortsov@yandex.ru
- Vladimir A. Chujko* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Lazer Technologies
- Le Duy Tuan* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics
- Pham Quang Tung* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Designing;
E-mail: quang_tung@yahoo.com

P. 75—81.

AUTOMATION OF WELDED SEAMS QUALITY ASSURANCE WITH THE USE OF ULTRASONIC TECHNOLOGY

The problem of automatic quality assurance for welded seams is addressed to on the base of computer technologies with the use of measuring technical vision and elements of a robotics. A complex virtual device is described which is intended for control over measuring / imaging instrument and for processing of obtained images.

Keywords: ultrasonic technologies, computer technologies, quality assurance of welded seams.

Data on authors

- Vladimir E. Mahov* — Cand. Techn. Sci.; North-West State Correspondence Technical University, Department of Monitoring Devices and Safety Systems, St. Petersburg;
E-mail: mahov@nwpi.ru
- Aleksander G. Palaev* — North-West State Correspondence Technical University, St. Petersburg; Director of Scientific-Research Center; E-mail: alexpalaev@yandex.ru
- Anatoly I. Potapov* — Dr. Techn. Sci., Professor; North-West State Correspondence Technical University, Department of Monitoring Devices and Safety Systems, St. Petersburg;
E-mail: potapov@nwpi.ru

P. 82—84.

METROLOGICAL BASIS FOR DEVELOPMENT OF AUTOMATED TESTING SYSTEM

Metrological approach is elaborated to the problem of automated testing of professional training level in the high school.

Keywords: professional competence, automated testing system, certification system, metrological approach.

Data on author

Svetlana A. Boyashova

— Cand. Pedag. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of Monitoring Department; E-mail: boyashova@mail.ru