

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН  
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

№ 2 (38)

2016

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

- Антипов А. Г., Гурин Е. И., Терентьев А. В.* Специализированный процессор предварительной обработки информации на основе ПЛИС ..... 5
- Дубинин В. Н., Будаговский Д. А., Дроздов Д. Н., Артамонов Д. В.* Проектирование и реализация систем управления дискретными событийными системами на основе иерархических модульных недетерминированных автоматов (Ч. 2. Методы и средства)..... 18
- Федюнин Р. Н.* Временной анализ и реализация аппаратно-программных модулей арифметического логического устройства ..... 33
- Финогеев А. А., Финогеев А. Г., Нефедова И. С.* Оценка информационных рисков в распределенных системах обработки данных на основе беспроводных сенсорных сетей ..... 49
- Балахонова С. А., Бодин О. Н., Иванчуков А. Г., Полосин В. Г., Убиенных А. Г.* Повышение достоверности оценки состояния сердца в компьютерной диагностической системе «Кардиовид»..... 61
- Фионова Л. Р., Коровина Л. В.* Использование статистических методов оценки документов для управления качеством продукции ..... 72

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И РАДИОТЕХНИКА**

- Попов Д. И.* Анализ цифровых систем обработки сигналов ..... 83
- Кондрашин В. И.* Определение толщины тонких оптически прозрачных пленок SnO<sub>2</sub> конвертным методом ..... 93
- Гришко А. К.* Оптимальное управление параметрами системы радиоэлектронных средств на основе анализа динамики состояний в условиях конфликта ..... 102
- Паришуков М. Ю., Сапунов Е. В., Светлов А. В.* Обработка результатов измерений частотных и временных параметров операционных усилителей ..... 112

## **МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

---

- Будимирова Т. С., Савицкий В. Я., Муйземнек А. Ю., Зиновьев Р. С.**  
Исследование взаимосвязи технологии изготовления полимерных  
подшипников скольжения с эксплуатационными режимами нагружения..... 124
- Зык Е. Н., Плешаков В. В.** Аналитическая оценка распределения  
эпюры остаточных напряжений по глубине поверхностного  
слоя деталей из высокопрочных сталей при поверхностном  
пластическом деформировании..... 136
- Глебов М. В., Киреев С. Ю.** Влияние нестационарных режимов  
электролиза на свойства покрытия сплавом медь-олово ..... 148

**UNIVERSITY PROCEEDINGS  
VOLGA REGION  
ENGINEERING SCIENCES**

№ 2 (38)

2016

**CONTENT**

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER  
ENGINEERING AND CONTROL**

---

<i>Antipov A. G., Gurin E. I., Terent'ev A. V.</i> A special-purpose processor of information preprocessing on FPGA .....	5
<i>Dubin V. N., Budagovskiy D. A., Drozdov D. N., Artamonov D. V.</i> Design and implementation of discrete event dynamic systems' control based on hierarchical modular nondeterministic automata (Part 2. Methods and tools).....	18
<i>Fedyunin R. N.</i> Time analysis and implementation of hardware and software modules of ALU .....	33
<i>Finogeev A. A., Finogeev A. G., Nefedova I. S.</i> Information risks assessment in distributed systems of data processing on the basis of wireless sensor networks.....	49
<i>Balakhonova S. A., Bodin O. N., Ivanchukov A. G., Polosin V. G., Ubiennykh A. G.</i> Increase of heart condition assessment reliability in the "Cardiovid" computer diagnostic system.....	61
<i>Fionova L. R., Korovina L. V.</i> Application of statistical methods of document assessment for quality control.....	72

**ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT  
AND RADIO ENGINEERING**

---

<i>Popov D. I.</i> Analysis of digital signal processing systems .....	83
<i>Kondrashin V. I.</i> Determination of SnO <sub>2</sub> thin optically transparent films' thickness by the envelope method .....	93
<i>Grishko A. K.</i> Optimal parameter control in radio-electronic systems on the basis of the analysis of state dynamics in conflict conditions .....	102
<i>Parshukov M. Yu., Sapunov E. V., Svetlov A. V.</i> Processing the results of measurements of frequency and time parameters of operational amplifiers.....	112

## MACHINE SCIENCE AND BUILDING

---

<i>Budimirova T. S., Savitskiy V. Ya., Muyzemnek A. Yu., Zinov'ev R. S.</i> Studying the interrelation between the technology for manufacturing polymer sliding bearings and operational loading conditions .....	124
<i>Zyk E. N., Pleshakov V. V.</i> Analytical estimation of residual stress distribution in depth of the facial layer of details made of high-strength steels at surface plastic deformation .....	136
<i>Glebov M. V., Kireev S. Yu.</i> Influence of non-stationary electrolysis modes on copper-tin alloy coatings' properties.....	148

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

---

УДК 681.32

DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-1

*А. Г. Антипов, Е. И. Гурин, А. В. Терентьев*

## СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ПРОЦЕССОР ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ПЛИС

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* В настоящее время в различных областях науки и техники широко применяются цифровые методы обработки непрерывно поступающей информации на высокой частоте. Во многих случаях быстродействие сигнальных процессоров недостаточно, единственным возможным вариантом является реализация специализированных процессоров на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). В то же время в научно-технической литературе достаточно редко встречаются публикации по этой тематике, поэтому тема статьи представляется актуальной. Цель исследования – разработка специализированных процессоров на основе ПЛИС, позволяющих выполнять предварительные вычисления характеристик непрерывно поступающей информации на высоких частотах и передачу результатов для окончательной обработки центральному процессору.

*Материалы и методы.* Для обеспечения высокого быстродействия при обработке непрерывно поступающей информации используются конвейерные методы вычислений и методы цифровой обработки сигналов.

*Результаты.* Разработана структура специализированного конвейерного процессора цифровой обработки сигналов на основе ПЛИС предварительных вычислений и передачи результатов для окончательной обработки центральному процессору. Исследованы характеристики разработанного процессора. Проведено экспериментальное исследование узлов разработанного процессора.

*Выводы.* Рассмотренный в статье способ выбора параметров узлов процессора позволяет сократить аппаратные затраты. Предложенная методика расчета частотных характеристик позволяет определить характеристики внутренних сигналов и узлов процессора внутри ПЛИС, что упрощает настройку реальных схем.

**Ключевые слова:** специализированный процессор, ПЛИС, цифровая обработка сигналов, квадратурное преобразование, программа обработки.

*А. G. Antipov, E. I. Gurin, A. V. Terent'ev*

## A SPECIAL-PURPOSE PROCESSOR OF INFORMATION PREPROCESSING ON FPGA

**Abstract.**

*Background.* Nowadays, methods of digital processing of continuously incoming information at a high frequency are widely used in various fields of science and technology. In many cases the performance of signal processors is not enough, the only option is to implement specialized processors on FPGAs. In scientific literature publications on the subject matter are quite rare, so the subject of the article seems to be quite relevant. The purpose of the study is to develop specialized processors based on FPGA allowing to perform preliminary calculations of characteristics of continuously incoming information at high frequencies and transmission of the results for the final processing to the CPU.

*Materials and methods.* To ensure high performance of continuously incoming information processing the authors used conveyor calculation methods and methods of digital signal processing

*Results.* The authors developed a structure of the specialized pipelined processor of FPGA-based digital signal processing for preprocessing and transmission of the results for the final processing to the CPU and experimentally studied the units of the developed processor.

*Conclusions.* The method for selection of processor nodes parameters, described in the paper, can reduce hardware costs. The methods for calculating frequency characteristics allow to determine the characteristics of internal signals and nodes of the processor inside the FPGA, which simplifies the setup of real circuits.

**Key words:** special-purpose processor, FPGA, digital signal processing, quadrature conversion, software application.

## Введение

В настоящее время в радиолокационных системах, в системах передачи данных и других областях науки и техники широко применяются цифровые методы обработки сигналов и другой информации [1–5]. Применение цифровых методов требует значительных вычислительных затрат, при этом часто системы обработки информации проектируются в виде распределенных вычислительных систем и создаются двухуровневыми. Основная обработка выполняется в центральном процессорном блоке, к которому подключаются блоки первичной обработки информации. Блок предварительной обработки информации представляет собой специализированный процессор, в котором с высокой скоростью выполняются относительно простые арифметические операции. Это позволяет разгрузить центральный процессорный блок.

### 1. Структура процессора

На рис. 1 приведена структура типового процессора предварительной обработки информации. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) выполняет преобразование входного аналогового сигнала в цифровую последовательность. Следующей операцией обычно является перенос частот и переход к комплексному представлению сигналов [1]. Данные операции выполняются в блоках квадратурного преобразования КП1 и КП2.

В общем случае квадратурное преобразование для дискретного сигнала представляет умножение на  $e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$  ( $\omega = 2\pi f_o$ ,  $f_o$  – опорная частота) при переносе сигнала в область более высоких частот и умножение на  $e^{-j\omega t} = \cos \omega t - j \sin \omega t$  при переносе в область низких частот [1]. Аналого-

цифровое преобразование и квадратурное преобразование выполняется на высоких частотах с частотой дискретизации  $f_s$ , обычно  $f_s \geq 100$  МГц. Последующие операции могут выполняться на более низкой частоте  $f_d$ . Понижение частоты (децимация) выполняется в блоках Д1 и Д2, при этом перед децимацией должна выполняться фильтрация в фильтрах нижних частот Ф1 и Ф2. Одним из требований в таких схемах является использование фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ) вследствие линейности их фазо-частотной характеристики.

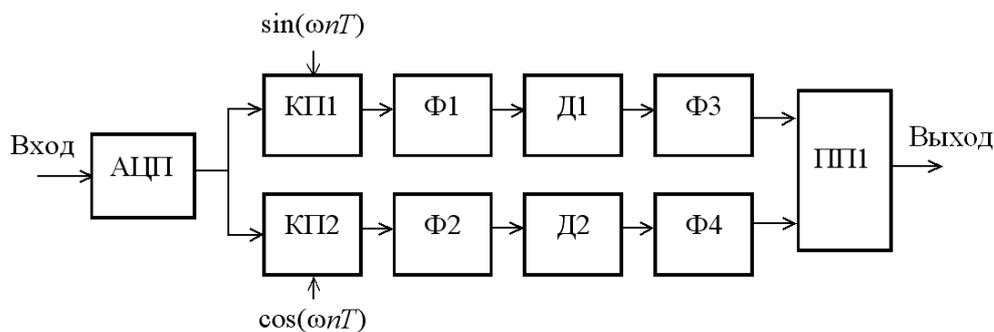


Рис. 1. Структура типового процессора предварительной обработки информации

Таким образом, в данном процессоре необходимо выполнять большое количество вычислений: вычисление тригонометрических функций, операции умножения и сложения в блоках квадратурного преобразования и КИХ-фильтрах. Все эти операции выполняются на частотах более 100 МГц. Быстродействие современных сигнальных процессоров не позволяет использовать их в данной разработке, единственным возможным вариантом на данный момент является реализация на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС), которые позволяют получить быстродействие на один-два порядка выше по сравнению с сигнальными процессорами [6]. Высокое быстродействие достигается использованием конвейерных методов вычислений с большим количеством ступеней конвейера и высоким уровнем параллелизма [7-9].

## 2. Параметры фильтров

Согласно [1] перед децимацией, выполняемой в блоках Д1 и Д2, необходимо подавить в сигнале все гармоники с частотой выше  $f_d / 2$ . Заключительная фильтрация для подавления гармоник выше  $f_p$  выполняется в фильтрах Ф3 и Ф4. Следует отметить, что попытка исключить фильтры Ф3 и Ф4 и получить требуемые амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) в фильтрах Ф1 и Ф2 приводит к необходимости создания КИХ-фильтров высокого порядка (более 150), что приводит к недопустимому увеличению аппаратных затрат. Поэтому используется двухступенчатая схема на разных частотах, так как известно [1], что реализация фильтров на низких частотах более выгодна.

В соответствии с известными методами узлы разрабатываемой схемы имеют следующие характеристики. Фильтры  $\Phi 1$  и  $\Phi 2$  имеют полосу пропускания от нуля до верхней границы рабочих частот  $f_g$  и полосу подавления от  $f_d/2$  и выше (кривая 1 на рис. 2). Окончательное подавление сигналов в диапазоне  $f_p \dots f_d/2$  производится на частоте  $f_d$  в фильтрах  $\Phi 3$  и  $\Phi 4$ , которые имеют АЧХ в соответствии с кривой 2 на рис. 2. Такое распределение более эффективно, чем получение необходимых характеристик только в  $\Phi 1$  и  $\Phi 2$ , но также требует значительных аппаратных затрат. В настоящей работе предлагается снизить требования к фильтрам  $\Phi 1$  и  $\Phi 2$ , увеличив нижнюю границу полосы подавления до  $f_d - f_p$  (кривая 3 на рис. 2), где  $f_g < f_p < f_d/2$ . Это является нарушением известных требований и приводит к наложению частот, однако в данном случае это не вызывает негативных последствий по следующим причинам. Частоты в области  $f_d/2 \dots f_d - f_p$ , которые в соответствии с известными правилами должны исключаться из сигнала, после децимации преобразуются в частоты в диапазоне  $f_p \dots f_d/2$ . Эти частоты не накладываются на полезный сигнал и будут подавлены в фильтрах  $\Phi 3$  и  $\Phi 4$ . Такой подход позволяет снизить требования к фильтрам  $\Phi 1$  и  $\Phi 2$  и, как следствие, уменьшить аппаратные затраты.

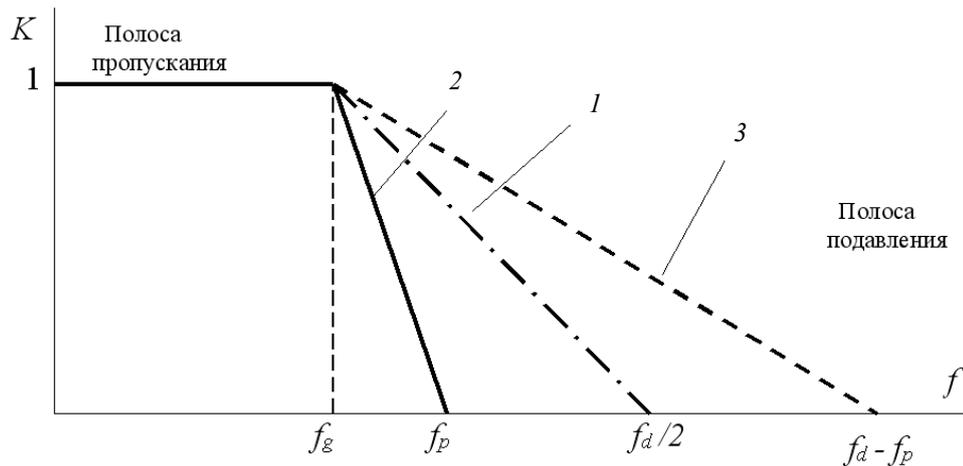


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики фильтров нижних частот

Рассмотрим конкретный пример. Входной сигнал имеет диапазон частот от 1 до 29 МГц, квантуется по уровню 16 бит, частота дискретизации  $f_s = z$  120 МГц. Квадратурное преобразование выполняется с опорной частотой  $f_o = 15$  МГц. После квадратурного преобразования вырабатывается комплексный сигнал с основной частотой в диапазоне  $(-14 \dots +14)$  МГц ( $f_g = 14$  МГц) и дополнительный сигнал вне этого диапазона. Для подготовки к децимации выполняется фильтрация в фильтрах  $\Phi 1$  и  $\Phi 2$  на частоте 120 МГц. После фильтрации выполняется децимация (прореживание) с переходом на частоту  $f_d = 40$  МГц, на которой выполняется фильтрация в  $\Phi 3$  и

Ф4, а затем передача в центр окончательной обработки через приемопередатчик ПП1. Передаваемый для окончательной обработки сигнал должен содержать частоты до 14 МГц с минимальными искажениями и не иметь частот выше  $f_p = 16$  МГц.

Для реализации спецпроцессора использовалась ПЛИС EP4CGX30BF14C8 фирмы Altera. Согласно [1] перед децимацией необходимо подавить в сигнале все гармоники с частотой выше 20 МГц. Попытка получить амплитудно-частотную характеристику вида 2 на рис. 2 в фильтрах Ф1 и Ф2 приводит к необходимости создания фильтра с конечной импульсной характеристикой 185 порядка. Ресурсы используемой ПЛИС не позволяют реализовать фильтры с требуемыми характеристиками. При использовании двухступенчатой фильтрации на фильтрах Ф1–Ф4 в соответствии с известными методами фильтры Ф1 и Ф2 могут иметь полосу пропускания 0–14 МГц и полосу подавления 20 МГц и выше, так как в соответствии с [1] при децимации до 40 МГц из сигнала в соответствии с теоремой Котельникова необходимо убрать сигналы с частотой выше 20 МГц. Окончательное подавление сигналов выше 16 МГц производится в фильтрах Ф3 и Ф4 на частоте 40 МГц. Такое распределение позволяет использовать фильтры Ф1–Ф4 примерно 60 порядка.

Если снизить требования к фильтрам Ф1 и Ф2, увеличив границу полосы подавления до  $f_d - f_p = 24$  МГц, то порядок этих фильтров снижается с 60 до 36. В данном случае это не приводит к негативным последствиям, так как частоты из области  $f_d / 2 \dots f_d - f_p$  (20–24 МГц), которые должны исключаться из сигнала, после децимации преобразуются в частоты в диапазоне  $f_p \dots f_d / 2 = 16$ –20 МГц и будут подавлены в фильтрах Ф3 и Ф4.

### 3. Модель дециматора

Для проверки последнего утверждения была составлена простейшая модель дециматора, на вход которого подавался сигнал

$$x_n = a_1 \sin(2\pi f_1 n) + a_2 \sin(2\pi f_2 n) + a_3 \sin(2\pi f_3 n) + a_4 \sin(2\pi f_4 n),$$

где  $f_i = (20+i)$  МГц,  $a_1 = 0,9$  В,  $a_2 = 0,6$  В,  $a_3 = 0,3$  В,  $a_4 = 0,1$  В.

Как и следовало ожидать, модуль дискретного преобразования Фурье этого сигнала имеет вид, приведенный на рис. 3.

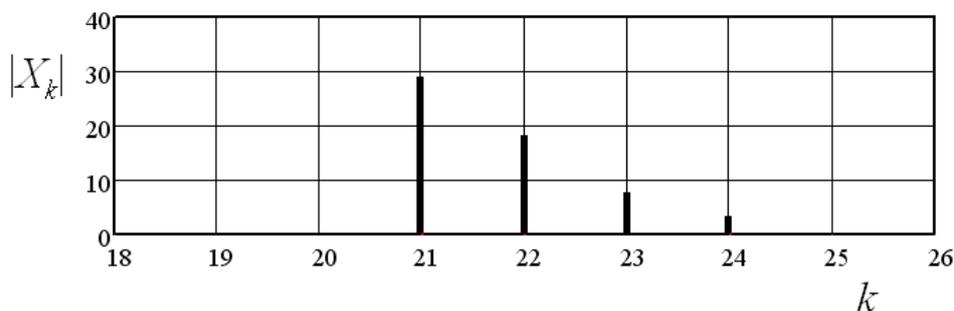


Рис. 3. Спектр сигнала на входе дециматора

Дискретное преобразование Фурье здесь и далее выполняется по классической формуле [1]:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j \frac{2kn}{N} \pi},$$

где  $N$  – длина входной последовательности;  $k$  – номер гармоники.

После децимации модуль спектра сигнала показан на рис. 4.

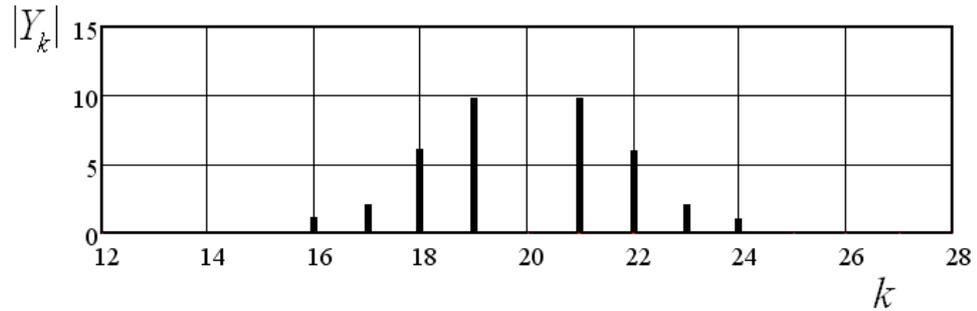


Рис. 4. Спектр сигнала на выходе дециматора

Из рис. 4 видно, что имеет место эффект наложения частот (aliasing), но частоты не выходят за границы диапазона  $f_p \dots f_d / 2 = 16 \dots 20$  МГц и могут быть подавлены в фильтрах Ф3 и Ф4. Данный подход позволяет снизить требования к фильтрам Ф1 и Ф2, в частности, увеличение границы полосы подавления с 20 до 24 МГц позволяет снизить порядок фильтров с 60 до 36, т.е. снизить аппаратные затраты на эти фильтры примерно на 40 %.

#### 4. Особенности вычисления результата в фильтрах

В общем случае нерекурсивный фильтр вычисляет результат  $y_n$  по следующей формуле:

$$y_n = \sum_{i=0}^{M-1} b_i x_{n-i},$$

где  $b_i$  – коэффициенты фильтра;  $x_{n-i}$  – значения входного сигнала;  $(M-1)$  – порядок фильтра.

При симметричных коэффициентах фильтра и четном  $M$  последняя формула будет иметь следующий вид:

$$y_n = \sum_{i=0}^{\frac{M}{2}-1} b_i (x_{n-i} + x_{n-M+i+1}). \quad (1)$$

Таким образом, последовательность вычисления по формуле (1) будет следующей. Сначала в  $M/2$  сумматорах одновременно вычисляются суммы

$x_{n-i}$  и  $x_{n-M+i+1}$ , затем в  $M/2$  умножителях вычисляются произведения этих сумм на коэффициенты. После этого необходимо вычислить сумму  $M/2$  произведений. Последняя операция выполняется в конвейерном сумматоре. На рис. 5 приведен фрагмент возможного варианта сумматора на 8 входов, содержащего двухвходовые комбинационные сумматоры СМ и регистры РГ. При увеличении числа слагаемых увеличивается количество сумматоров, а также несколько увеличивается время вычисления за счет увеличения ступеней конвейера. Если число слагаемых не равно  $2^p$  ( $p$  – целое), то ряд комбинационных сумматоров СМ может отсутствовать, однако регистры РГ исключать нельзя: каждое слагаемое должно проходить одинаковое количество регистров, чтобы в одном цикле не допускать сложений для разных отсчетов.

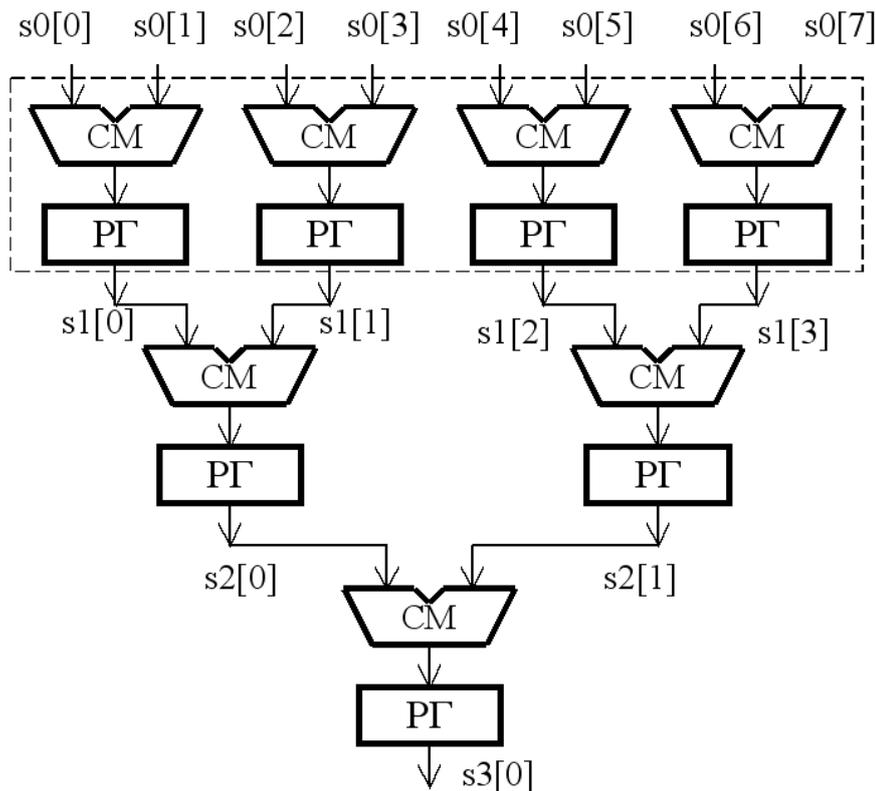


Рис. 5. Многовходовой конвейерный сумматор

Разрядность произведений и слагаемых определяется требуемой точностью. Чтобы уменьшить погрешность вычислений, можно на каждом этапе увеличивать разрядность промежуточных результатов. Разрядность сумматоров на каждом этапе увеличивается на 1, разрядность произведения равна сумме разрядностей сомножителей.

Рассмотрим конкретный пример. Пусть разрядность входных данных составляет 17. После сложения на первом этапе разрядность суммы составит 18. В ПЛИС EP4CGX30BF14C8 имеется 80 18-разрядных умножителей.

Наиболее эффективно эти множители будут использоваться при 18-разрядных сомножителях. Поэтому коэффициенты должны иметь 18 двоичных разрядов, а результат произведения будет иметь 36 двоичных разрядов. Пусть  $M = 62$ , два коэффициента замещаются нулями, тогда получим  $2^6$  коэффициентов. В этом случае на первом этапе получим  $2^5$  18-разрядных значений, после умножений их на коэффициенты получим  $2^5$  36-разрядных произведений. Далее в течение пяти тактов в конвейерном сумматоре вычисляется конечный результат, при этом разрядность данных увеличивается до 41.

При таком подходе упрощается ввод схемы и ее отладка. Например, для верхнего уровня часть схемы, обведенная пунктиром на рис. 5, на языке Verilog будет задаваться следующим образом:

```
always @ (posedge clk)
begin
    for (i = 0; i < 4; i = i + 8'd1)
        s1[i] <= s0[2*i] + s0[2*i+1];
```

....

В зависимости от значений коэффициентов и других факторов от двух до четырех старших разрядов  $y_n$  в большинстве случаев оказываются нулевыми. И если нам нужно получить  $N$ -разрядный результат, то в качестве результата следует брать не старшие разряды с 40-го по  $(40 - N + 1)$ -й, а разряды с  $(40 - m)$ -го по  $(40 - N - m + 1)$ -й. Величину  $m$  можно определить по результатам моделирования или экспериментально. При таком формировании результата необходимо использовать арифметику с насыщением, в которой при переполнении в качестве результата подставляется максимально возможное по абсолютной величине значение.

## 5. Оценка частотных характеристик

Важным этапом является настройка процессора. Поскольку в данном процессоре выполняется обработка частотных характеристик, то необходимо иметь средства экспериментальной оценки частотных характеристик внутренних сигналов. Для этого использовалась следующая методика. С помощью логического анализатора Signal Tap, входящего в состав системы проектирования Quartus II, фиксируются и записываются в файл последовательности сигналов в нужной точке схемы. Затем эти последовательности считываются из файла программой Mathcad или MATLAB, где по известным методам выполняется дискретное преобразование Фурье. В данной работе использовалась программа Mathcad.

Рассмотрим примеры применения этой методики. С помощью системы проектирования Quartus II был создан блок, генерирующий последовательность

$$x_n = a_1 \sin(2\pi f_1 n) + a_2 \sin(2\pi f_2 n), \quad (2)$$

где  $f_1 = 7$  МГц,  $f_2 = 21,5$  МГц,  $a_1 = a_2 = 0,5$ , частота дискретизации  $f_s = 120$  МГц. Этот сигнал подается на дециматор с частотой  $f_d = 40$  МГц, а затем на фильтр Ф3. Схема была составлена на языке Verilog и введена с помощью системы проектирования Quartus II в ПЛИС. Затем с помощью

Signal Tap были зафиксированы и записаны в файл последовательности на входе дециматора и выходе фильтра ФЗ. Информация из файла была считана программой Mathcad и выполнено дискретное преобразование Фурье. Спектр сигнала  $x_n$  показан на рис. 6 и соответствует формуле (2).

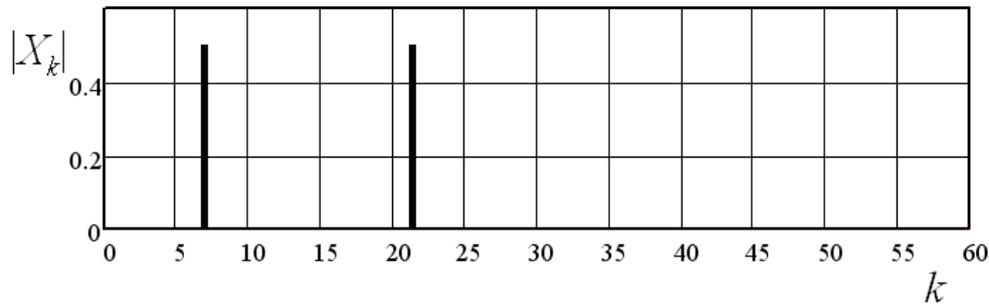


Рис. 6. Спектр сигнала  $x_n$

В этом сигнале гармоника  $f_1 = 7$  МГц лежит в полосе рабочих частот и она должна быть пропущена на выход. Гармоника  $f_2 = 21,5$  МГц лежит за пределами полосы рабочих частот, она должна быть подавлена. На рис. 7 показан спектр сигнала на выходе фильтра. Как следует из рисунка, указанные выше требования выполняются. В данном примере гармоника  $f_2 = 21,5$  МГц находится в диапазоне  $f_d / 2 \dots f_d - f_p$  (20–24 МГц), во время децимации она трансформируется в гармонику с частотой 18,5 МГц, а затем подавляется фильтром ФЗ. На рис. 7 ее не видно, так как фильтр АЗ подавляет частоты в этом диапазоне.

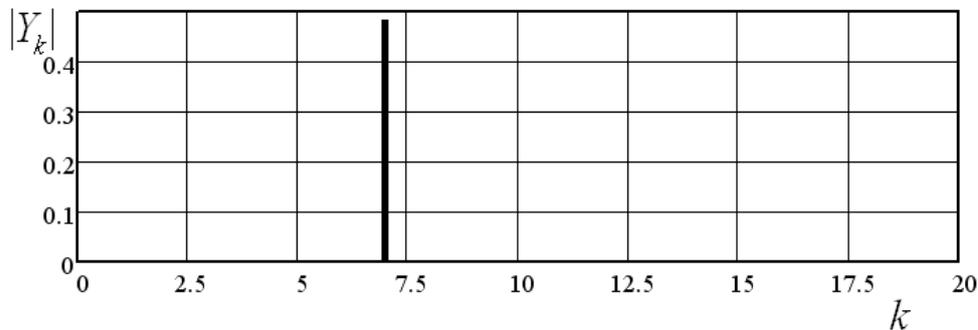


Рис. 7. Спектр сигнала на выходе фильтра ФЗ

Рассмотрим другой пример. Пусть в формуле (2)  $f_2 = 27,5$  МГц,  $f_1$  – без изменений. Спектр сигнала  $x_n$  показан на рис. 8.

В данном примере гармоника  $f_2$  находится вне диапазона  $f_d / 2 \dots f_d - f_p$  (20–24 МГц), после децимации из-за эффекта наложения эта гармоника проявляется на частоте 12,5 МГц, она накладывается на полезный сигнал и уже не подавляется фильтрами (рис. 9).

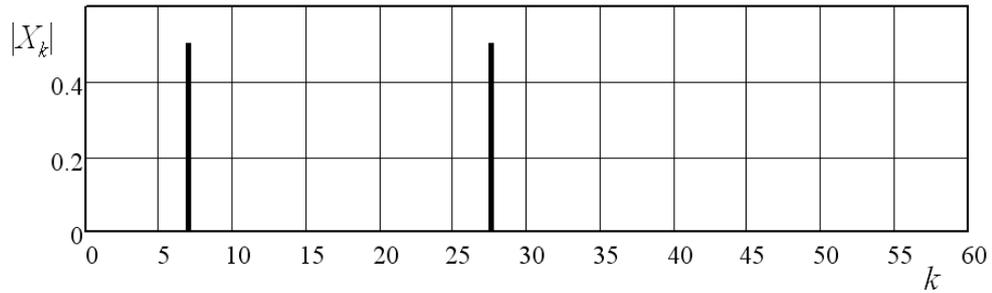


Рис. 8. Спектр сигнала на входе дециматора

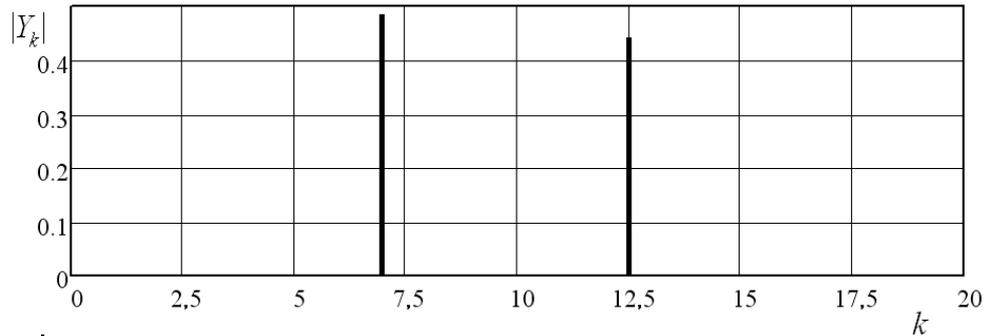


Рис. 9. Спектр сигнала на выходе фильтра

Более эффективную проверку можно осуществить с помощью сигналов, содержащих большое количество гармоник. На ресурсах ПЛИС был создан генератор, вырабатывающий последовательность:

$$x_n = \sum_{m=1}^M a_m \sin(2\pi f_m n),$$

где  $M$  – количество гармоник в сигнале.

На рис. 10 приведен спектр одного из таких сигналов для  $M=8$ ,  $f_1 = 10$  МГц,  $f_m = f_1 + (m-1) \cdot 2$  МГц,  $a_m = 0,125$ .

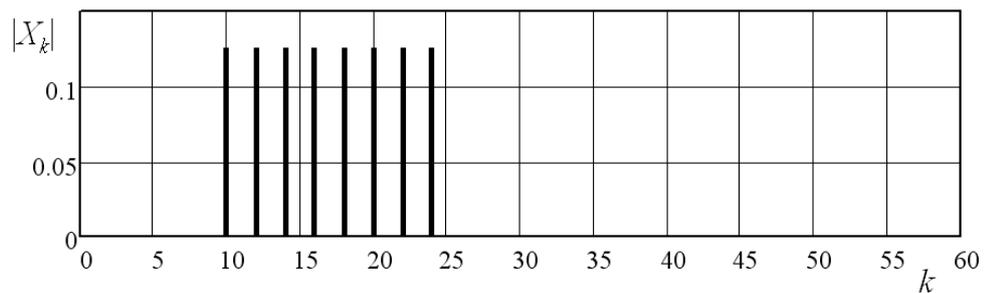


Рис. 10. Спектр сигнала  $x_n$

Сигнал содержит гармоники, находящиеся в рабочей области (10, 12 и 14 МГц), в области  $f_p \dots f_d / 2$  (16, 18 и 20 МГц) и в области

$f_d / 2 \dots f_d - f_p$  (22 и 24 МГц). Как и в предыдущих примерах, все узлы, включая генераторы последовательностей  $x_n$ , были реализованы на ресурсах ПЛИС, внутренние сигналы контролировались с помощью Signal Tap, дискретное преобразование Фурье было выполнено в Mathcad. Результаты вычислений приведены на рис. 11.

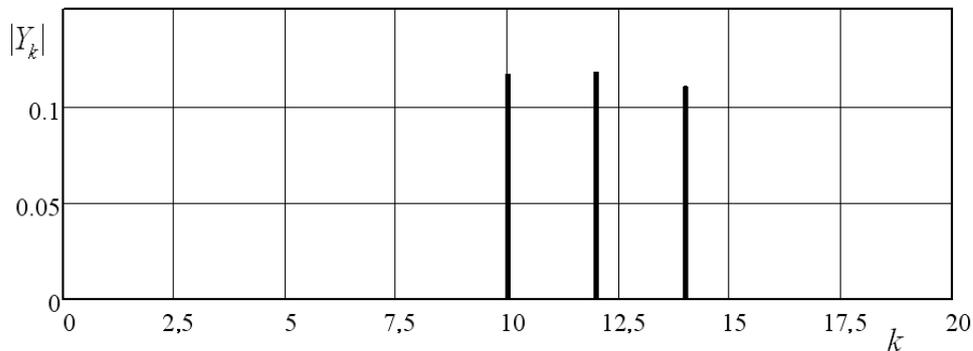


Рис. 11. Спектр сигнала на выходе фильтра Ф3

Спектр сигнала на выходе фильтра свидетельствует о нормальной работе фильтра. Сигналы, находящиеся в рабочей области, практически не изменились. В то же время сигналы, находящиеся за пределами рабочего диапазона, в том числе в области частот выше  $f_d / 2$ , подавлены.

### Заключение

Разработана структура специализированного конвейерного процессора цифровой обработки сигналов на основе ПЛИС для предварительных вычислений и передачи результатов для окончательной обработки центральному процессору. Исследованы характеристики разработанного процессора. Проведено экспериментальное исследование узлов разработанного процессора.

Рассмотренный в статье способ выбора параметров узлов процессора позволяет сократить аппаратные затраты. Предложенная методика расчета частотных характеристик позволяет определить характеристики внутренних сигналов и узлов процессора внутри ПЛИС, что упрощает настройку реальных схем.

### Список литературы

1. **Лайонс, Р.** Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс. – М. : Бином-Пресс, 2006. – 656 с.
2. **Pasko, R.** High-Performance Flexible All-Digital Quadrature Up and Down Converter Chip / R. Pasko, L. Rijnders, P. Schaumont, S. Vernalde, D. Durackova // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2001. – Vol. 36, № 3. – P. 408–416.
3. **Ветров, Ю. В.** Повышение точности пространственного позиционирования объектов за счет использования сигналов спутниковых навигационных систем / Ю. В. Ветров, А. С. Давыденко, О. В. Царик // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2009. – Т. 2, № 76. – С. 14–20.

4. Патент № 2450422 Российская Федерация, МКИ H03D 9/00. Многоканальное адаптивное радиоприемное устройство / Колесников В. В., Смирнов П. Л., Соломатин А. А., Терентьев А. В., Царик О. В., Шепилов А. М., Шишков А. Я. – № 2011119466/08 ; заявл. 13.05.2011 ; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 13.
5. Патент № 2458360 Российская Федерация, МКИ G03S 13/46. Способ и устройство определения координат источника радиоизлучения / Наливаев А. В., Наумов А. С., Смирнов П. Л., Соломатин А. И., Терентьев А. В., Царик О. В., Шепилов А. М. – № 2010151734/07 ; заявл. 16.12.2010 ; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 22.
6. **Максфилд, К.** Проектирование на ПЛИС. Курс молодого бойца / К. Максфилд. – М. : ДОДЭКА, 2007. – 408 с.
7. **Тарасов, И. Е.** Разработка систем цифровой обработки сигналов на базе ПЛИС / И. Е. Тарасов, Д. С. Потехин. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 250 с.
8. **Воеводин, В. В.** Параллельные вычисления / В. В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
9. **Graham, P.** Reconfigurable Computing Accelerating Computation with Field-Programmable Gate Arrays / P. Graham, M. Gokhale. – Springer, The Netherlands, 2005. – 238 с.

#### **References**

1. Layons R. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital Signal Processing]. Moscow: Binom-Press, 2006, 656 p.
2. Pasko R., Rijnders L., Schaumont P., Vernalde S., Durackova D. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2001, vol. 36, no. 3, pp. 408–416.
3. Vetrov Yu. V., Davydenko A. S., Tsarik O. V. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [Scientific and technical bulletin of Saint-Petersburg State Polytechnic University. Informatics. Telecommunication. Control]. 2009, vol. 2, no. 76, pp. 14–20.
4. Patent № 2450422 Russian Federation, MКИ H03D 9/00. *Mnogokanal'noe adaptivnoe radiopriemnoe ustroystvo* [A multichannel adaptive radio receiver]. Kolesnikov V. V., Smirnov P. L., Solomatin A. A., Terent'ev A. V., Tsarik O. V., Shepilov A. M., Shishkov A. Ya. № 2011119466/08; appl. 13.05.2011; publ. 10.05.2012, Bull. № 13.
5. Patent № 2458360 Russian Federation, MКИ G03S 13/46. *Sposob i ustroystvo opredeleniya koordinat istochnika radioizlucheniya* [A method and a device for radio radiation source coordinates determination]. Nalivaev A. V., Naumov A. S., Smirnov P. L., Solomatin A. I., Terent'ev A. V., Tsarik O. V., Shepilov A. M. № 2010151734/07; appl. 16.12.2010; publ. 10.08.2012, Bull. № 22.
6. Maksfild K. *Proektirovanie na PLIS. Kurs molodogo boytsa* [FPGA design. A crash course]. Moscow: DODEKA, 2007, 408 p.
7. Tarasov I. E., Potekhin D. S. *Razrabotka sistem tsifrovoy obrabotki signalov na baze PLIS* [Development of FPGA-based digital signal processing systems]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2007, 250 p.
8. Voevodin V. V., Voevodin Vl. V. *Parallel'nye vychisleniya* [Parallel computation]. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2002, 608 p.
9. Graham P., Gokhale M. *Reconfigurable Computing Accelerating Computation with Field-Programmable Gate Arrays*. Springer, The Netherlands, 2005, 238 p.

---

**Антипов Алексей Геннадьевич**  
инженер-конструктор, ООО «Пеленг»,  
(Россия, г. Пенза, ул. Дружбы, 6)

**Antipov Aleksey Gennad'evich**  
Design engineer, "Peleng" LLC  
(6 Druzhby street, Penza, Russia)

E-mail: peleng.su@gmail.com

**Гурин Евгений Иванович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра вычислительной техники,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: gurin2@yandex.ru

**Gurin Evgeniy Ivanovich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of computer engineering,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

**Терентьев Андрей Викторович**

заместитель начальника отдела,  
ОАО «СТЦ Технологии Радиоконтроля»  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Софьи  
Ковалевской, д.20, корп. 1)

E-mail: gurin2@yandex.ru

**Terent'ev Andrey Viktorovich**

Deputy department manager,  
«JSC Radiomonitoring Technology»  
(building 1, 20 Sofyi Kovalevskoy street,  
Saint-Petersburg, Russia)

---

УДК 681.32

**Антипов, А. Г.**

**Специализированный процессор предварительной обработки информации на основе ПЛИС / А. Г. Антипов, Е. И. Гурин, А. В. Терентьев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 5–17. DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-1**

УДК 681.5

DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-2

*В. Н. Дубинин, Д. А. Будаговский, Д. Н. Дроздов, Д. В. Артамонов*

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ ДИСКРЕТНЫМИ СОБЫТИЙНЫМИ  
СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИЧЕСКИХ  
МОДУЛЬНЫХ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ АВТОМАТОВ  
(Ч. 2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА)<sup>1</sup>**

**Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Объектом исследования являются системы управления для дискретных событийных систем (ДСС). Предмет исследования – методы и средства проектирования систем управления ДСС на основе автоматных моделей. Цель – разработка методов и средств проектирования и реализации систем управления ДСС на основе программируемых логических контроллеров с использованием иерархических модульных недетерминированных автоматов (ИМНДА), являющихся развитием концепции недетерминированных автоматов, предложенных Н. П. Вашкевичем.

*Материалы и методы.* Для решения поставленных задач использовались методы теории множеств, конечных автоматов, сетей Петри, сетевых систем «условие – событие» (NCES-сетей), а также методы разработки программного обеспечения управляющих систем на основе программируемых логических контроллеров.

*Результаты.* Разработаны методики реализации базисного модуля ИМНДА на основе релейно-контактной логики (LD) и составного модуля ИМНДА на основе функционально-блоковых диаграмм (FBD). Предложена структура инструментальных средств для поддержки проектирования и реализации систем управления ДСС на основе ИМНДА. Показана применимость предложенных методов на примере разработки простой системы управления.

*Выводы.* Предложенные методы и средства позволяют: уменьшить затраты на разработку, модификацию и сопровождение систем управления ДСС; увеличить степень повторного использования разработанных артефактов проектирования (например, автоматных модулей); автоматизировать разработку систем управления ДСС, что, в конечном счете, приводит к сокращению сроков проектирования систем управления ДСС.

**Ключевые слова:** дискретные событийные системы, недетерминированные автоматы, управление, модуль, проектирование, реализация, инструментальная система, программируемый логический контроллер, релейно-контактная логика, функционально-блоковые диаграммы.

*V. N. Dubinin, D. A. Budagovskiy, D. N. Drozdov, D. V. Artamonov*

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF DISCRETE EVENT  
DYNAMIC SYSTEMS' CONTROL BASED ON HIERARCHICAL  
MODULAR NONDETERMINISTIC AUTOMATA  
(PART 2. METHODS AND TOOLS)**

---

<sup>1</sup> Исследование выполнено в Пензенском государственном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №151110010).

**Abstract.**

*Background.* The object of the research is control of discrete event dynamic systems (DEDS). The subject of the research is methods and tools for design of DEDS control on the basis of automata models. The goal of this work is to develop methods and tools for design and implementation of DEDS control based on programmable logical controllers (PLC) using hierarchical modular nondeterministic automata (HMNA) which are an extension of the Vashkevich's nondeterministic automata concept.

*Materials and methods.* To achieve the above-mentioned objectives, the methods of set theory, automata theory, Petri nets, net condition-event systems (NCES) as well as methods of PLC software development were used.

*Results.* The paper proposes an approach to basic HMNA modules implementation using IEC 61131-3 ladder diagrams (LD) and an approach to composite HMNA modules implementation using function block diagrams (FBD). The structure of tools to support design and implementation of HMNA-based DEDS control is suggested. And finally, the paper gives an example to demonstrate the proposed approaches.

*Conclusions.* The proposed methods and tools allow to: 1) reduce the cost of development, modification and maintenance of DEDS control; 2) increase the degree of re-using of design artifacts (e.g., automata modules); 3) to automate the development of DEDS control that in turn eventually leads to shortening of a period of DEDS control design.

**Key words:** discrete event dynamic systems, nondeterministic automata, control, module, design, implementation, tools, programmable logic controller, ladder diagram, function block diagram.

**Введение**

Наиболее часто в качестве аппаратной платформы для реализации управления дискретными событийными системами (ДСС) [1], к которым, в частности, относятся многие объекты из сферы промышленной автоматизации, используются программируемые логические контроллеры (ПЛК) [2]. Их особенностью является циклический характер функционирования. Стандарт IEC 61131-3 определяет пять языков программирования ПЛК (*LD, FBD, SFC, ST, IL*), первые три из которых являются графическими [3]. Хороший обзор и анализ использования формальных методов в программировании ПЛК дан в работе [4].

Автоматный подход к проектированию систем управления ДСС с ориентацией на разработку программ ПЛК является одним из основных и постоянно совершенствуется, что видно по публикационной активности в данной области. Одной из первых в 1991 г. появилась *SWITCH*-технология [5]. В работе [6] введен новый класс автоматов (*PLC-Automata*), специально предназначенный для моделирования ПЛК с учетом временных свойств. В статье [7] представлена и проиллюстрирована методология проектирования логических контроллеров на основе модульных автоматов. Работа [8] предлагает методологию моделирования, верификации и генерации кода для ПЛК на основе использования расширенной модели конечного автомата (*Timed-MPSG*), включающей сообщения. При этом для верификации используется метод *Model checking* и язык *SMV*. В статье [9] описывается синтаксис и формальная семантика нового класса временных автоматов, которые предназначены для моделирования поведения систем реального времени. Разработан формаль-

ный метод для автоматической генерации программ ПЛК на основе предложенной модели. Исследование [10] представляет методологию моделирования и валидации управляющих программ промышленных систем с последовательными, параллельными и временными операторами с использованием формализма, основанного на диаграмме состояний – «базисные диаграммы состояний (BSC)». В статье [11] конечные автоматы использовались для перепроектирования программ ПЛК. В работе [12] была определена модель иерархических модульных недетерминированных автоматов (ИМНДА), являющихся расширением недетерминированных автоматов (НДА), предложенных Н. П. Вашкевичем [13], которая ориентирована на формальное описание параллельных систем управления ДСС. Кроме того, существует ряд работ [11, 14], посвященных использованию языка *UML* (включая диаграммы *UML state chart*) в проектировании систем управления на базе ПЛК. В настоящее время ряд коммерческих программных продуктов поддерживает автоматный подход к проектированию программ ПЛК. Например, программный пакет *Simulink PLC Coder* фирмы *MathWorks* позволяет преобразовывать автоматную модель (*Stateflow*) в программу ПЛК на языке *ST* [15].

Несмотря на значительный прогресс в области проектирования управляющих систем на основе автоматной модели и ПЛК, ряду вопросов в литературе было уделено мало внимания. В частности, недостаточно рассмотрены вопросы реализации на ПЛК автоматных моделей, допускающих как параллелизм, так и модульное (структурное) проектирование. Модель ИМНДА покрывает эти аспекты в полном объеме. Кроме того, в большинстве рассмотренных случаев отсутствует комплексная инструментальная поддержка автоматной методологии проектирования. Все перечисленные аспекты определяют актуальность настоящей работы, нацеленной на развитие автоматного подхода к проектированию и реализации параллельных управляющих систем. Для реализации ИМНДА выбраны два графических языка ПЛК: язык релейно-контактных схем (язык *LD*) и язык функционально-блоковых диаграмм (язык *FBD*).

### **1. Реализация базисного модуля ИМНДА на языках *LD* и *FBD***

Недетерминированные автоматы (НДА), определенные в [13], нашли практическое применение в проектировании аппаратных средств вычислительной техники и систем управления. Одной из основных особенностей НДА является то, что все разрешенные переходы в НДА совершаются параллельно и без конфликтов. Для целей реализации с каждым состоянием НДА будем связывать битовый элемент памяти, хранящий его статус. Для простоты считаем, что состояние и реализующий его элемент памяти имеют одинаковые имена. Если  $S_i = 1$ , то НДА находится в состоянии  $S_i$ , если  $S_i = 0$ , то нет. Назовем *входо-выходным* состоянием НДА состояние, в которое входит хотя одна дуга и одновременно выходит хотя бы одна дуга. Основная проблема при реализации НДА заключается в том, что возможны конфликты в элементах памяти при одновременном выполнении над ними нескольких параллельных операций (операций чтения и записи). Для решения этой проблемы предлагается двухтактная схема выполнения НДА. Вводится понятие «двухкомпонентного» состояния. На первой фазе выполнения НДА синхронно производятся разрешенные (обычные) переходы состояний НДА, при этом уста-

навливаются первые компоненты состояний на основе вторых компонентов состояний. Таким образом, вторые компоненты состояний являются действующими, а первые – буферными. Первая фаза является основной. Суть второй фазы связана с актуализацией вторых (основных) компонентов состояний на основе первых (буферных). Вторая фаза является вспомогательной.

На рис. 1 представлено правило расщепления состояния  $S$  на два компонента –  $S'$  и  $S''$ . На данном рисунке сплошными дугами показаны переходы, выполняемые на первой фазе. Пунктирной линией между подсостояниями отмечен переход, выполняемый на второй фазе.

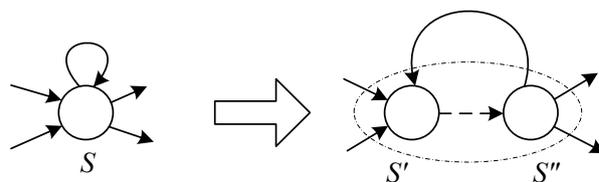


Рис. 1. Правило расщепления состояния

На фазе 1 формула для определения активности первых компонентов состояний следующая:

$$S'_j = \bigvee_{S_i'' \in pre(S'_j)} (S_i'' \wedge C_{i,j}), \quad (1)$$

где  $C_{i,j}$  – условия разрешенности перехода из  $i$ -го состояния в  $j$ -е состояние. Функция  $pre$  используется для определения множества предшествующих состояний. Вторая фаза описывается выражением

$$S''_j = S'_j. \quad (2)$$

В соответствии с данной формулой активность второго компонента состояния полагается равной активности соответствующего первого компонента.

При реализации НДА на языке  $LD$  используется концепция реле для моделирования элементов памяти, представляющих состояния. В соответствии с двухкомпонентным строением состояния реализационной формы НДА будем выделять реле первой ступени для реализации первых компонентов состояний и реле второй ступени соответственно для реализации вторых компонентов.

На рис. 2 приведена общая схема реализации базисного модуля ИМНДА на основе комбинирования языков  $LD$  и  $FBD$ .

Как видно из рис. 2, автоматный модуль реализуется в виде двух функциональных блоков (ФБ):  $F_{main}$  и  $F_{out}$ . Первый ФБ реализует основную логику автоматного модуля, в то время как второй ФБ выполняет формирование выходных информационных («уровневых») сигналов. Выделение выходной логики автоматного модуля в отдельный ФБ (выполняемый после всех ФБ типа  $F_{main}$  в системе) связано с тем, что формирование актуальных информационных сигналов (автомата Мура) необходимо выполнять не на уровне отдельного модуля, а в рамках специальной единой фазы на уровне

всей подсистемы. Это связано с требованиями правильной проводки как событийных («мгновенных»), так информационных («уровневых») сигналов между модулями. Следует заметить, что информационные связи между модулями могут образовывать циклы, в то время как топология сети из событийных связей в общем случае есть ациклический граф.

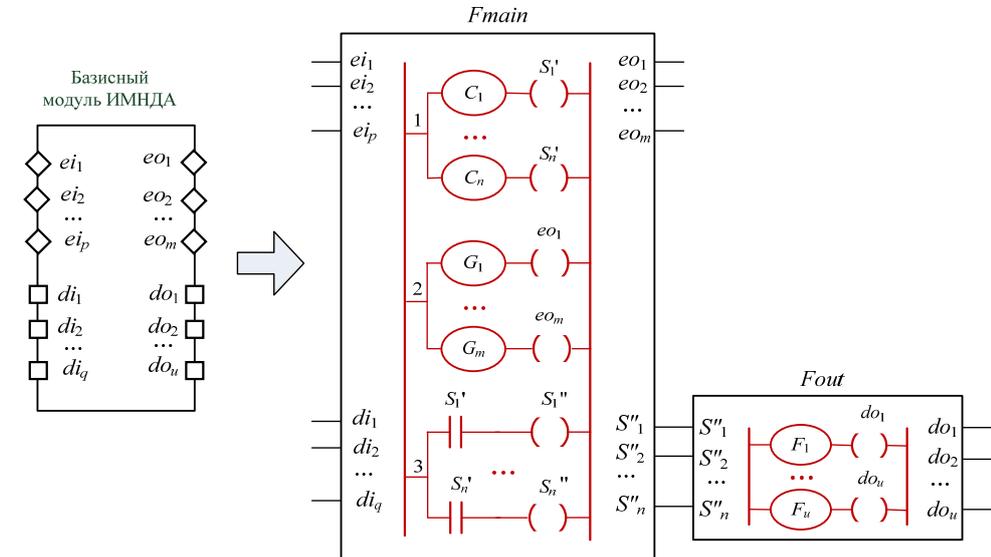


Рис. 2. Общая схема реализации базисного модуля ИМНДА

Лестничная диаграмма, инкапсулированная в ФБ  $F_{main}$ , содержит три группы цепей. Первая группа цепей реализует первую фазу выполнения НДА. Макроцепи, вычисляющие условия возбуждения реле  $C_i (i = \overline{1, n})$ , обозначены на рис. 2 овалами. Вычисление этих условий выполняется в соответствии с формулой (1). Вторая группа цепей реализует вычисление выходных значений событийных («импульсных») сигналов. Условия  $G_k (k = \overline{1, m})$  вычисляются следующим образом:

$$G_k = \bigvee_{(S_i, S_j) \in E_k} (S_i \wedge C_{i,j}),$$

где  $E_k$  – множество переходов автомата, маркированных событийным сигналом  $eo_k$ .

Третья группа цепей предназначена для реализации второй фазы выполнения НДА (2). Условие разрешенности перехода из одного состояния НДА в другое определяется в виде конъюнкции входных сигналов и состояний, взятых с отрицанием и без [13]. Пример кодирования условия  $ei_1 \wedge \sim di_2 \wedge di_3 \wedge S_1 \wedge \sim S_2$  на языке  $LD$  приведен на рис. 3.

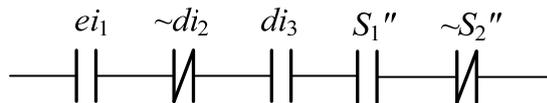


Рис. 3. Пример условия разрешенности перехода на языке  $LD$

Лестничная диаграмма, инкапсулированная в ФБ *Fout*, вычисляет значения информационных выходных сигналов на основе вторых компонентов состояний. Используемые макроцепи  $F_k (k = \overline{1, u})$  в виде параллельно соединенных контактов вычисляют функции

$$F_k = \bigvee_{S_i \in Z_k} S_i'',$$

где  $Z_k$  – множество состояний, при активных значениях которых выдается информационный сигнал  $do_k$ .

Следует заметить, что в определенных случаях базисный модуль ИМНДА может быть реализован в виде одного ФБ. При этом диаграммы *LD* модулей *Fmain* и *Fout* сливаются. Условием такого объединения является возможность комбинированной проводки как событийных, так и информационных сигналов (с использованием алгоритма, представленного в разд. 2).

## 2. Реализация составного модуля ИМНДА на языке *FBD*

В данном разделе приводится метод реализации составных модулей ИМНДА в виде функционально-блоковых диаграмм (*FBD*). Каждый (внутренний) модуль составного модуля ИМНДА реализуется одним ФБ. Основной трудностью является преодоление семантического разрыва между параллельным функционированием модели ИМНДА и последовательным (слева направо и сверху вниз) выполнением диаграмм *FBD*. Иным способом данную задачу можно сформулировать как моделирование работы ИМНДА с использованием *FBD*.

Основным принципом, положенным в основу метода, является возможность выполнения модуля только после выполнения всех «предшествующих» ему (по событийным связям) модулей. Это гарантирует правильное распространение мгновенных сигналов по сети из событийных связей, определенное в формальной модели ИМНДА [12]. Данный принцип является избыточным в том плане, что учитывает все возможные варианты прохождения мгновенных сигналов по сети из событийных связей.

Для реализации указанного выше принципа предлагается алгоритм, осуществляющий проводку мгновенных сигналов в ИМНДА с одновременным отображением модулей по *FBD*-цепям. С каждым модулем связывается пороговая константа, равная числу входящих событийных связей из других модулей, а также счетчик числа принятых мгновенных сигналов. Источником мгновенных сигналов в составном ФБ являются импульсные входы интерфейса. Внутренние модули, связанные с ними, должны выполняться первыми. После выполнения модуля производится рассылка мгновенных сигналов соседним модулям-последователям, значение счетчиков последних инкрементируется. При достижении значения счетчика пороговой величины модуль считается выполненным и включается в текущую *FBD*-цепь. Полное описание алгоритма имеет следующий вид:

```

1:   foreach  $m \in M$  do
2:        $c(m) = 0$  ;
3:        $r(m) = n(m) - n_F(m)$  ;
4:   end foreach;
```

```

5:  select   $m_L$  from  $\{m \in M \mid r(m) = 0\}$ ; //произвольный выбор
                                     //первого модуля цепи
6:       $k = 1$ ;
7:       $Q_k = \{m_L\}$ ;
8:       $M = M - \{m_L\}$ ;
9:      while  $M \neq \emptyset$  do
10:         found = false;
11:          $M_C = succ(m_L)$ 
12:         foreach  $m \in M_C$  do  $c(m) = c(m) + 1$  end foreach;
13:         foreach  $m \in M_C$  do // поиск модуля
//с достигнутым максимальным значением счетчика на  $M_C$ .
14:            if  $c(m) == r(m)$  then
15:                $Q_k = Q_k \cup \{m\}$ ;
16:                $m_L = m$ ;
17:               found = true;
18:               break;
19:            end if;
20:         end foreach;
21:         if found == false then //построение новой цепи
22:            foreach  $m \in M - M_C$  do // поиск модуля
// с достигнутым максимальным значением
// счетчика на множестве «остальных» модулей
23:               if  $c(m) == r(m)$  then
24:                   $k = k + 1$ ;
25:                   $Q_k = \{m\}$ ;
26:                   $m_L = m$ ;
27:                  break;
28:               end if;
29:            end foreach;
30:         end if;
31:          $M = M - \{m_L\}$ ;
32:      end while;

```

В приведенном алгоритме приняты следующие обозначения:  $c(m)$  – значение счетчика модуля  $m$ ;  $r(m)$  – пороговая константа модуля  $m$ ;  $n(m)$  – общее количество импульсных входов модуля  $m$ ;  $n_F(m)$  – количество импульсных входов модуля  $m$ , непосредственно связанных с интерфейсом;  $k$  – номер текущей *FBD*-цепи;  $M$  – множество еще не распределенных по цепям модулей (первоначально включает все модули);  $m_L$  – последний добавленный в цепь модуль;  $M_C$  – множество модулей-последователей, связанных событийными связями с последним добавленным в цепь модулем;  $Q_k$  – формируемые цепи модулей; *found* – флаг, устанавливающийся, если очередной модуль был выбран из  $M_C$ ;  $succ(m)$  – множество модулей-последователей, принимающих сигналы с модуля  $m$ .

На рис. 4 приведен пример составного модуля ИМНДА. В табл. 1 представлены реализующие его *FBD*-цепи, полученные в результате работы вышеприведенного алгоритма.

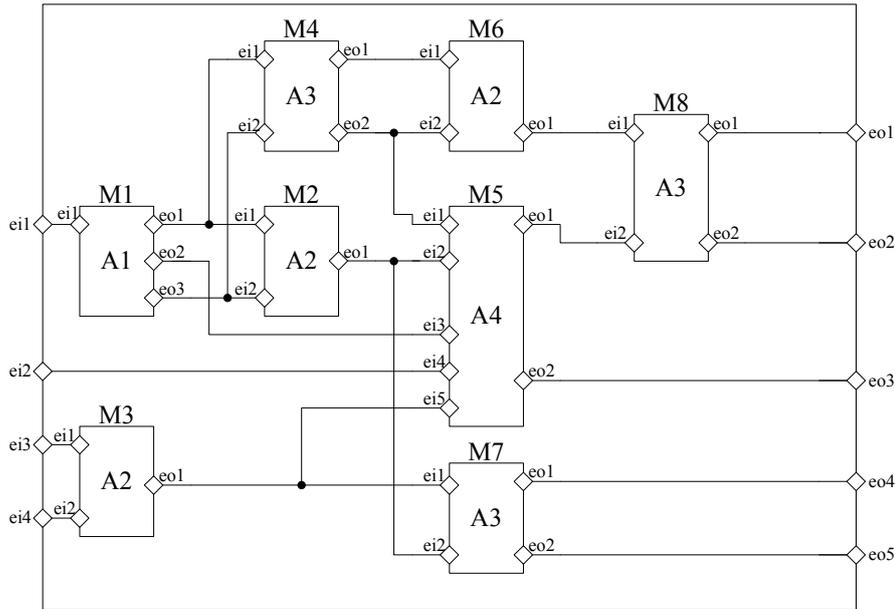


Рис. 4. Пример составного модуля ИМНДА

Таблица 1

Результирующие FBD-цепи

Цепь 1	
Цепь 2	
Цепь 3	
Цепь 4	

### 3. Инструментальные средства для поддержки проектирования и реализации систем управления ДСС на основе ИМНДА

Для проектирования систем управления ДСС на основе ИМНДА предлагается соответствующая инструментальная система поддержки проектирования. Ее структура, включающая также взаимосвязи с внешними программами (которые отмечены пунктирными прямоугольниками), приведена на рис. 5. Для формирования базисного модуля ИМНДА используется специально разработанный графический редактор *ACAD*, а для формирования составного модуля ИМНДА – графический редактор системы *ViVe* [16]. Несмотря на то, что система *ViVe* ориентирована на моделирование *NCES*-сетей (*Net Condition/Event Systems*), схожесть составных модулей ИМНДА и *NCES*-сетей позволяет использовать графический редактор этой системы.

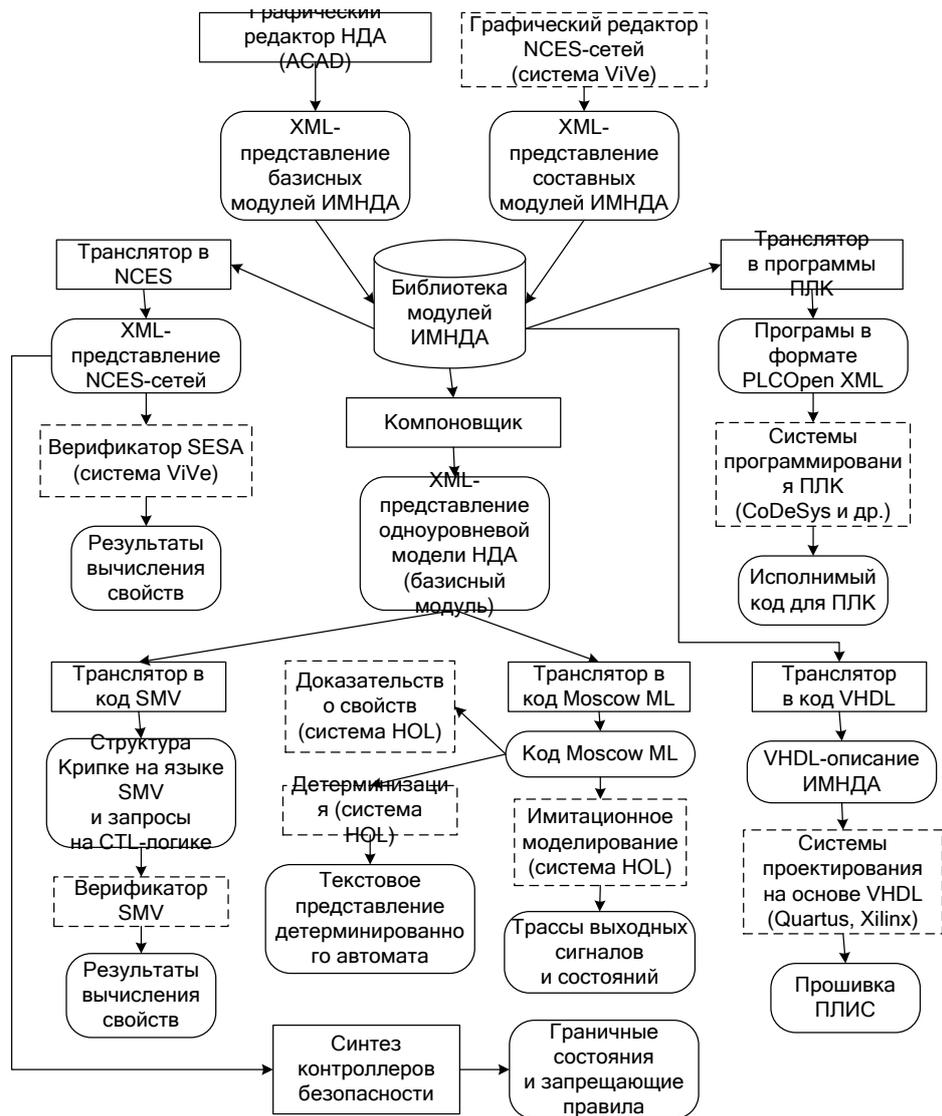


Рис. 5. Структура системы поддержки проектирования и реализации управления ДСС на основе ИМНДА

*Компоновщик* предназначен для генерации одноуровневой модели НДА из иерархической модели, включающей множество базисных и составных модулей. Иерархическая модель строится на основе типизации модулей. При этом каждый модуль в модели характеризуется именем типа и именем экземпляра. *Верификация* ИМНДА в системе ориентируется на метод *Model Checking*, причем реализовано два способа для осуществления этого типа верификации – с использованием верификаторов *SMV* и *SESA*. Первый способ основан на преобразовании ИМНДА в код *SMV*. В верификаторе *SMV* свойства ИМНДА формулируются в виде формул временной логики *CTL*. Второй способ основан на преобразовании ИМНДА в *NCES*-сети и использовании верификатора *SESA*, входящего в систему *ViVe*. Для детерминизации [13] и имитационного моделирования ИМНДА используется система доказательства теорем *HOL* (вернее, подсистема функционального программирования на языке *MoscowML*). *XML*-описание базисного модуля ИМНДА транслируется в данные для программы детерминизации НДА, а также в программы на языке *MoscowML* для тестирования. Транслятор *XML*-описаний ИМНДА в код *VHDL* предназначен для автоматического преобразования базисных и составных модулей ИМНДА в соответствующие описания на языке *VHDL*. Транслятор *XML*-описаний ИМНДА в программы для ПЛК предназначен для автоматического преобразования ИМНДА в программы ПЛК, представленные в соответствии со стандартом *PLCOpen XML*. Транслятор работает в соответствии с методами и алгоритмами, представленными в данной работе. Подсистема синтеза контроллеров безопасности предназначена для генерации запрещающих правил, предотвращающих переход системы в опасное состояние.

Следует также отметить, что пять компонентов предложенной инструментальной системы зарегистрированы в фондах алгоритмов и программ (Роспатент, ОФЭРНиО).

#### 4. Демонстрационный пример

Схематично покажем применимость предложенных методов на простом примере проектирования системы управления для технологической установки, предназначенной для приготовления раствора (рис. 6). В аппарат 1 объемом 100 л подается 20 л компонента А, затем 80 л компонента В, после чего вся смесь перемешивается в течение 20 мин. В аппараты 2 и 3 объемом 100 л каждый подается приготовленная в аппарате 1 смесь (А+В), которая в дальнейшем подогревается до температуры 50 °С в аппарате 2 и до 80 °С в аппарате 3. Приготовленные растворы выгружаются для дальнейшего использования.

Входные сигналы системы управления приведены в табл. 2.

ИМНДА для управления технологической установкой на рис. 5 представлен на рис. 7.

Реализация составного модуля ИМНДА на языке *FBD* (в системе *CoDeSys*) представлена в табл. 3, а реализация базисного модуля А2 в виде диаграммы *LD* – на рис. 7. Следует заметить, что в данном примере использовалась одноблочная реализация базисных модулей ИМНДА, что объясняется тем, что удалось найти такой порядок выполнения ФБ, который обеспечивает правильную проводку событийных и информационных сигналов при данном виде реализации.

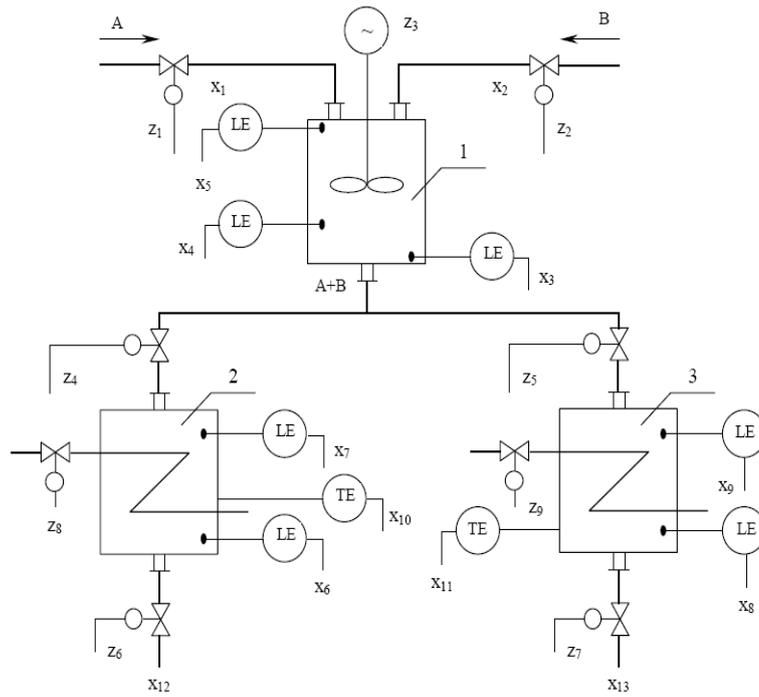


Рис. 6. Технологическая установка для приготовления раствора

Таблица 2

Входные сигналы управляющего автомата

Сигнал	Описание
x1	Подача команды на открытие клапана z1 (налив компонента А)
x2	Подача команды на открытие клапана z2 (налив компонента В)
x3	Аппарат 1 пуст
x4	В аппарат 1 налито 20 л компонента А
x5	В аппарат 2 налито 80 л компонента В
x6	Аппарат 2 пуст
x7	В аппарат 2 налито 100 л смеси (А+В)
x8	Аппарат 3 пуст
x9	В аппарат 3 налито 100 л смеси (А+В)
x10	В аппарате 2 температура достигла 50 °С
x11	В аппарате 3 температура достигла 80 °С

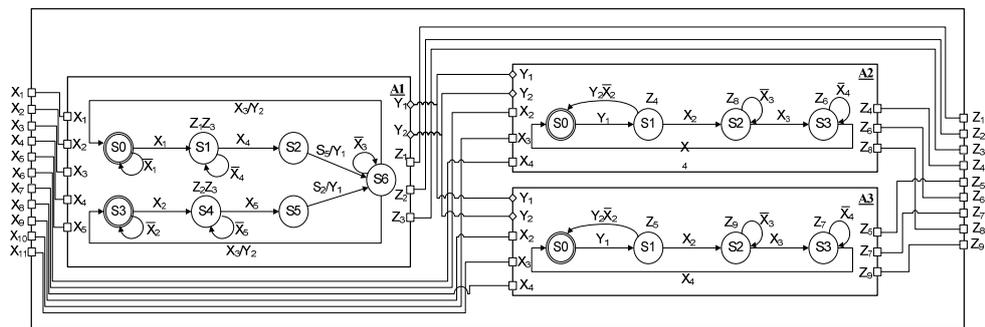


Рис. 7. ИМНДА для управления технологической установкой

Реализация составного модуля на языке FBD

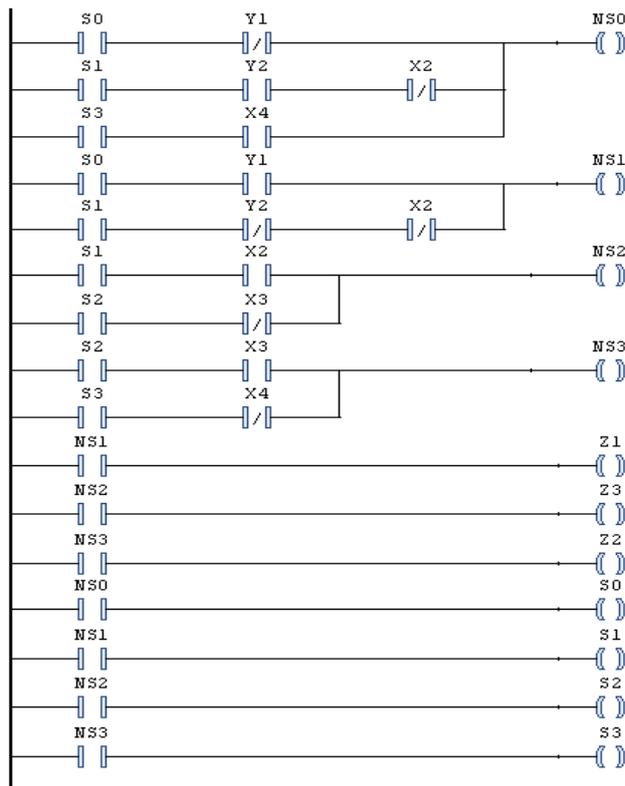
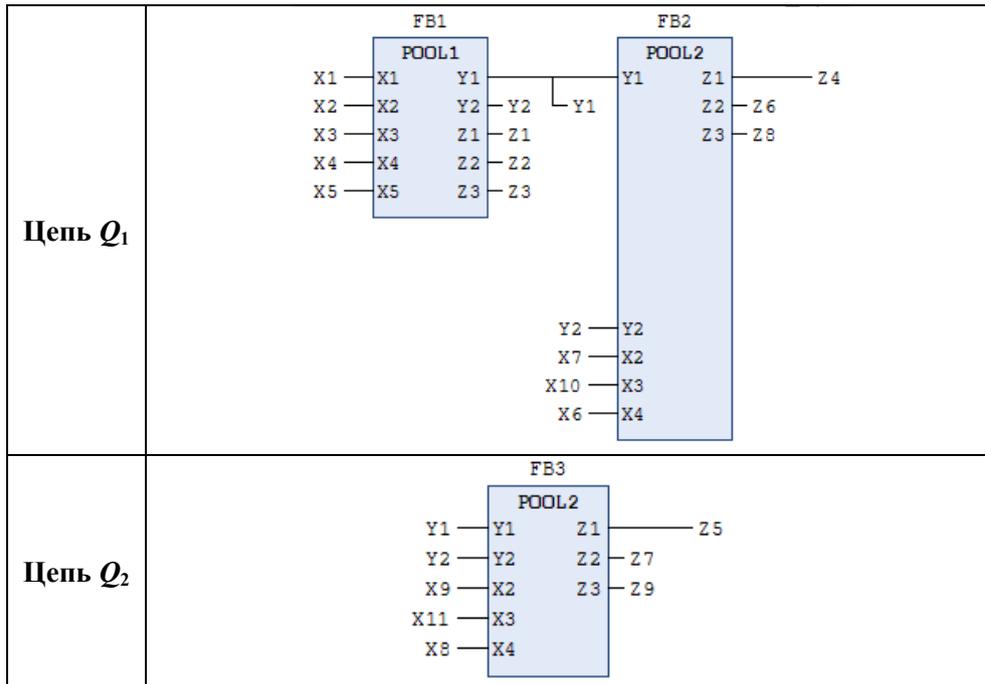


Рис. 8. Реализация модуля A2 на языке LD в CoDeSys

### **Заключение**

В работе предложен и проиллюстрирован подход к реализации ПЛК-ориентированных систем управления для ДСС с использованием модели ИМНДА. Рассмотрена структура инструментальных средств поддержки методологии проектирования и реализации систем управления на основе ИМНДА. Направлением дальнейших исследований является развитие и усовершенствование инструментальных средств, а также их использование в конкретных предметных областях.

### **Список литературы**

1. **Cassandras, C. G.** Introduction to Discrete Event Systems / C. G. Cassandras, S. Lafortune. – Springer, 2008. – 772 p.
2. **Петров, И. В.** Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного программирования / И. В. Петров ; под ред. В. П. Дьяконова. – М. : СОЛОН-Пресс, 2004. – 256 с.
3. International Standard IEC 61131-3 (edition 2.0) : Programmable Controllers / International Electrotechnical Commission. – Geneva, 2003. – 230 p.
4. **Frey, G.** Formal methods in PLC programming / L. Litz // Proc. IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2000). – Nashville, USA, 2000, Oct. – P. 2431–2436.
5. **Шалыто, А. А.** SWITCH-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления / А. А. Шалыто. – СПб. : Наука, 1998. – 628 с.
6. **Dierks, H.** PLC-Automata: A New Class of Implementable Real-Time Automata / H. Dierks // Transformation-Based Reactive Systems Development (ARTS'97). – Springer LNCS, 1997. – Vol. 1231. – P. 111–125.
7. **Shah, S. S.** Reconfigurable logic control using modular FSMs: Design, verification, implementation, and integrated error handling / S. S. Shah, E. W. Endsley, M. R. Lucas, D. M. Tilbury // Proceedings of the 2002 American Control Conference. – 2002. – Vol. 5. – pp. 4153–4158.
8. **Thapa, D.** Modeling, Verification, and Implementation of PLC program using Timed-MPSG / D. Thapa, S. C. Park, C. M. Park, G.-N. Wang // Proceedings of the 2007 Summer Computer Simulation Conference (SCSC'07). – San Diego, CA, USA, 2007. – P. 533–540.
9. **Sacha, K.** Translatable finite state time machine / K. Sacha // Lecture Notes in Computer Science. – 2007. – Vol. 4745. – P. 117–132.
10. **Moura, R. S.** Using basic Statechart to program industrial controllers / R. S. Moura, L. A. Guedes // Computer Standards & Interfaces. – 2012. – № 34. – P. 60–67.
11. **Frey, G.** A Re-Engineering Approach for PLC Programs using Finite Automata and UML / G. Frey, M. B. Younis // Proc. IEEE International Conference on Information Reuse and Integration, IRI-2004. – Las Vegas, USA, 2004, Nov. – P. 24–29.
12. **Дубинин, В. Н.** Проектирование и реализация систем управления дискретными событийными системами на основе иерархических модульных недетерминированных автоматов (Часть 1. Формальная модель) / В. Н. Дубинин, Д. Н. Дроздов, Д. А. Будаговский // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 1 (37). – С. 30–41.
13. **Вашкевич, Н. П.** Недетерминированные автоматы и их использование для синтеза систем управления / Н. П. Вашкевич, С. Н. Вашкевич. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 1996. – 88 с.
14. **Fantuzzi, C.** A Design Pattern for translating UML software models into IEC 61131-3 Programming Languages / C. Fantuzzi, M. Bonfe, F. Fanfoni, C. Secchi // 18th

- IFAC World Congress (August 28 – September 2, 2011). – Milano (Italy), 2011. – Vol. 18, Part 1. – P. 9158–9163.
15. Simulink PLC Coder. – URL: <http://www.mathworks.com/products/sl-plc-coder/>.
16. ViVe – VisualVerifier Tool Framework. – URL: <http://www.fb61499.com/license.html>.

### References

1. Cassandras C. G., Lafortune S. *Introduction to Discrete Event Systems*. Springer, 2008, 772 p.
2. Petrov I. V. *Programmiruemye kontrollery. Standartnye yazyki i priemy prikladnogo programmirovaniya* [Programmable controllers. Standard languages and methods of applied programming]. Moscow: SOLON-Press, 2004, 256 p.
3. *International Standard IEC 61131-3 (edition 2.0): Programmable Controllers*. International Electrotechnical Commission. Geneva, 2003, 230 p.
4. Frey G., Litz L. *Proc. IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2000)*. Nashville, USA, 2000, Oct., pp. 2431–2436.
5. Shalyto A. A. *SWITCH-tekhnologiya. Algoritmizatsiya i programmirovaniye zadach logicheskogo upravleniya* [SWITCH technology. Algorithmization and programming of logic control problems]. Saint-Petersburg: Nauka, 1998, 628 p.
6. Dierks H. *Transformation-Based Reactive Systems Development (ARTS'97)*. Springer LNCS, 1997, vol. 1231, pp. 111–125.
7. Shah S. S., Endsley E. W., Lucas M. R., Tilbury D. M. *Proceedings of the 2002 American Control Conference*. 2002, vol. 5, pp. 4153–4158.
8. Thapa D., Park S.C., Park C. M., Wang G.-N. *Proceedings of the 2007 Summer Computer Simulation Conference (SCSC'07)*. San Diego, CA, USA, 2007, pp. 533–540.
9. Sacha K. *Lecture Notes in Computer Science*. 2007, vol. 4745, pp. 117–132.
10. Moura R. S., Guedes L. A. *Computer Standards & Interfaces*. 2012, no. 34, pp. 60–67.
11. Frey G. A., Younis M. B. *Proc. IEEE International Conference on Information Reuse and Integration, IRI-2004*. Las Vegas, USA, 2004, Nov., pp. 24–29.
12. Dubinin V. N., Drozdov D. N., Budagovskiy D. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2016, no. 1 (37), pp. 30–41.
13. Vashkevich N. P., Vashkevich S. N. *Nedeterminirovannyye avtomaty i ikh ispol'zovanie dlya sinteza sistem upravleniya* [Non-deterministic automata and their application in control system sunthesis]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 1996, 88 p.
14. Fantuzzi C. A., Bonfe M., Fanfoni F., Secchi C. *18th IFAC World Congress (August 28 – September 2, 2011)*. Milano (Italy), 2011, vol. 18, part 1, pp. 9158–9163.
15. *Simulink PLC Coder*. Available at: <http://www.mathworks.com/products/sl-plc-coder/>.
16. *ViVe – VisualVerifier Tool Framework*. Available at: <http://www.fb61499.com/license.html>.

---

#### **Дубинин Виктор Николаевич**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра вычислительной техники,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: [dubinin.victor@gmail.com](mailto:dubinin.victor@gmail.com)

#### **Dubinin Viktor Nikolaevich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of computer engineering,  
Penza State University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

***Будаговский Дмитрий Александрович***  
аспирант, Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: budagovsky92@gmail.com

***Budagovskiy Dmitriy Aleksandrovich***  
Postgraduate student, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

***Дроздов Дмитрий Николаевич***  
аспирант, Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: dmitriidrozдов9@gmail.com

***Drozдов Dmitriy Nikolaevich***  
Postgraduate student, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

***Артамонов Дмитрий Владимирович***  
доктор технических наук, профессор,  
кафедра автономных информационных  
и управляющих систем, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: aius@pnzgu.ru

***Artamonov Dmitriy Vladimirovich***  
Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of autonomous information  
and control systems, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

УДК 681.5

**Дубинин, В. Н.**

**Проектирование и реализация систем управления дискретными  
событийными системами на основе иерархических модульных недетер-  
минированных автоматов (Ч. 2. Методы и средства) / В. Н. Дубинин,  
Д. А. Будаговский, Д. Н. Дроздов, Д. В. Артамонов // Известия высших учеб-  
ных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). –  
С. 18–32. DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-2**

## ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ И РЕАЛИЗАЦИЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ МОДУЛЕЙ АРИФМЕТИЧЕСКОГО ЛОГИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Объектом исследования являются аппаратно-программные модели вычислительных устройств на базе ПЛИС. Предмет исследования – методика временного анализа аппаратно-программных модулей вычислительных устройств и их синтез на базе ПЛИС. Цель – разработка способа быстрой оценки временных затрат модулей вычислительной системы, реализуемой на базе ПЛИС.

*Материалы и методы.* Представленная в статье методика объединяет математический и имитационный способы временной оценки алгоритмов, реализуемых в рамках аппаратно-программных модулей. Имитационный способ дает наглядную картину работы модуля и позволяет собрать библиотеку модулей для последующего комплексного анализа вычислительного устройства. Математический способ удобен тем, что не требует знания специализированного программного обеспечения и позволяет быстро сделать приблизительные расчеты отдельного модуля устройства.

*Результаты.* Разработаны две компьютерные модели пяти вычислительных устройств. Первая компьютерная модель построена на базе САПР CPNTools и математического аппарата сетей Петри. Вторая компьютерная модель – с использованием языка VHDL и САПР ALTERA. Оба подхода показали адекватность разработанной методики оценки временных затрат.

*Выводы.* Несмотря на наличие в средствах реализации СБИС систем программных модулей для расчета и визуализации временных затрат, описанная в статье методика на ранних этапах формирования архитектуры позволяет быстро оценить адекватность затрат на разработку вычислительного устройства и внести нужные разработчикам коррективы.

**Ключевые слова:** временной анализ, вычислительное устройство, вычислительная система, арифметико-логическое устройство, методика анализа, аппаратно-программный модуль, функциональный блок.

R. N. Fedyunin

## TIME ANALYSIS AND IMPLEMENTATION OF HARDWARE AND SOFTWARE MODULES OF ALU

### Abstract.

*Background.* The research object is hardware and software models of FPGA-based computing devices. The research subject is the methodology of time analysis of hardware-software modules of computing devices and synthesis thereof on the FPGA basis. The aim of the work is to develop a method of rapid time study of FPGA-based computing system modules.

*Materials and methods.* The methodology represented in the article unites mathematical and simulation methods of time estimates of algorithms, realized within hardware-software modules. The simulation method shows pictorial functioning of the module and allows to collect a library of modules for further complex analysis

of the computing device. The mathematical method is convenient as it requires no knowledge of specialized software and allows to roughly calculate an individual device module.

*Results.* The author developed two computer models of five computing devices. The first computer model is built on the basis of the CPNTools CAD and the Petri nets mathematical apparatus. The second model – using the VHDL language and the ALTERA CAD. Both approaches proved adequacy of the developed methodology of time estimates.

*Conclusions.* Despite a presence of systems of program modules for time calculation and visualization in VLSI realization means, the methodology described in the article allows to rapidly estimate computing device development time adequacy and to introduce required amendments at early stages of architecture formation.

**Key words:** timing analysis, computing device, computing system, arithmetic logic unit, methods of analysis, hardware and software module, functional block

Для иллюстрации рассматриваемой методики временного анализа в качестве примера возьмем схему RISC-ядра, разрабатываемого для эксплуатации в виде аппаратно-программных модулей вычислительного устройства (рис. 1) [1]. Каждый модуль RISC-ядра (рис. 1), в том числе и модуль арифметического логического устройства (АЛУ) [2], содержит блоки, выполняющие базовые операции, которые далее именуется функциональными [3, 4] (рис. 2).

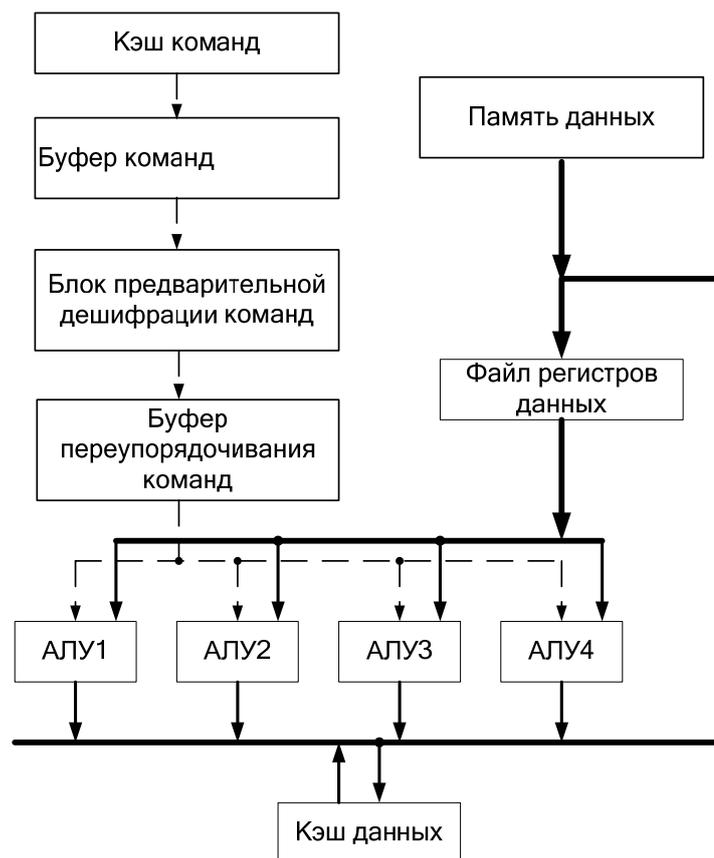


Рис. 1. Обобщенная структура операционной части RISC-ядра

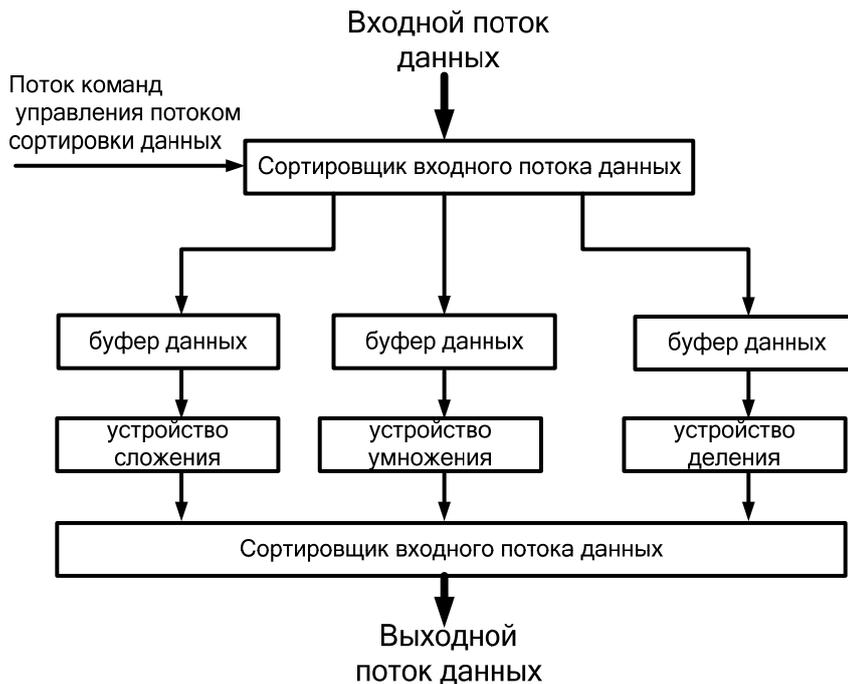


Рис. 2. Вариант реализации АЛУ RISC-ядра

Предложенный после анализа вариант вычислительного устройства будет реализован на базе ПЛИС, что позволит быстро и дешево ввести разработанное устройство в эксплуатацию.

В первую очередь перед исследователем встает задача разработки общей схемы вычислительного устройства (рис. 1), затем разработчик описывает схемы реализации аппаратно-программных модулей устройства (рис. 2) и на третьем шаге итеративно выбирает, анализирует и модернизирует алгоритмы реализации функциональных блоков (ФБ) модулей (рис. 3).

Выбранный алгоритм ФБ должен обладать простотой реализации и минимальными временными задержками относительно эталонного алгоритма. Эталонном разработчик обычно берет алгоритм аналогичных функциональных блоков, разработанных ранее. Затем разработчик итеративно действует по шагам методики (рис. 3): делает теоретическую оценку производительности предлагаемых алгоритмов арифметических и логических операций; производит имитационный анализ исследуемых алгоритмов с помощью специализированного программного обеспечения; выбирает алгоритм с наилучшими временными показателями для реализации функционального блока на базе ПЛИС. Алгоритм, показавший наилучшее время работы, реализуется на ПЛИС с помощью языка VHDL.

Для иллюстрации математического способа временного анализа (шаги 4–8 на рис. 3) рассмотрим процесс анализа, выбора и реализации алгоритма деления в рамках функционального блока деления АЛУ (рис. 2). В нашем случае выбор осуществляется среди алгоритмов целочисленного деления: деление с восстановлением остатка [5, 6], деление без восстановления остатка [5, 6], SRT-деление [7], способ деления Ньютона – Рафсона [7], алгоритм де-

ления Гольдшмита [7]. В качестве математического аппарата для определения временных затрат функциональных блоков выберем аппарат теории марковских процессов, подробно описанный [8] и эффективный на уровне аппаратно-программных модулей.

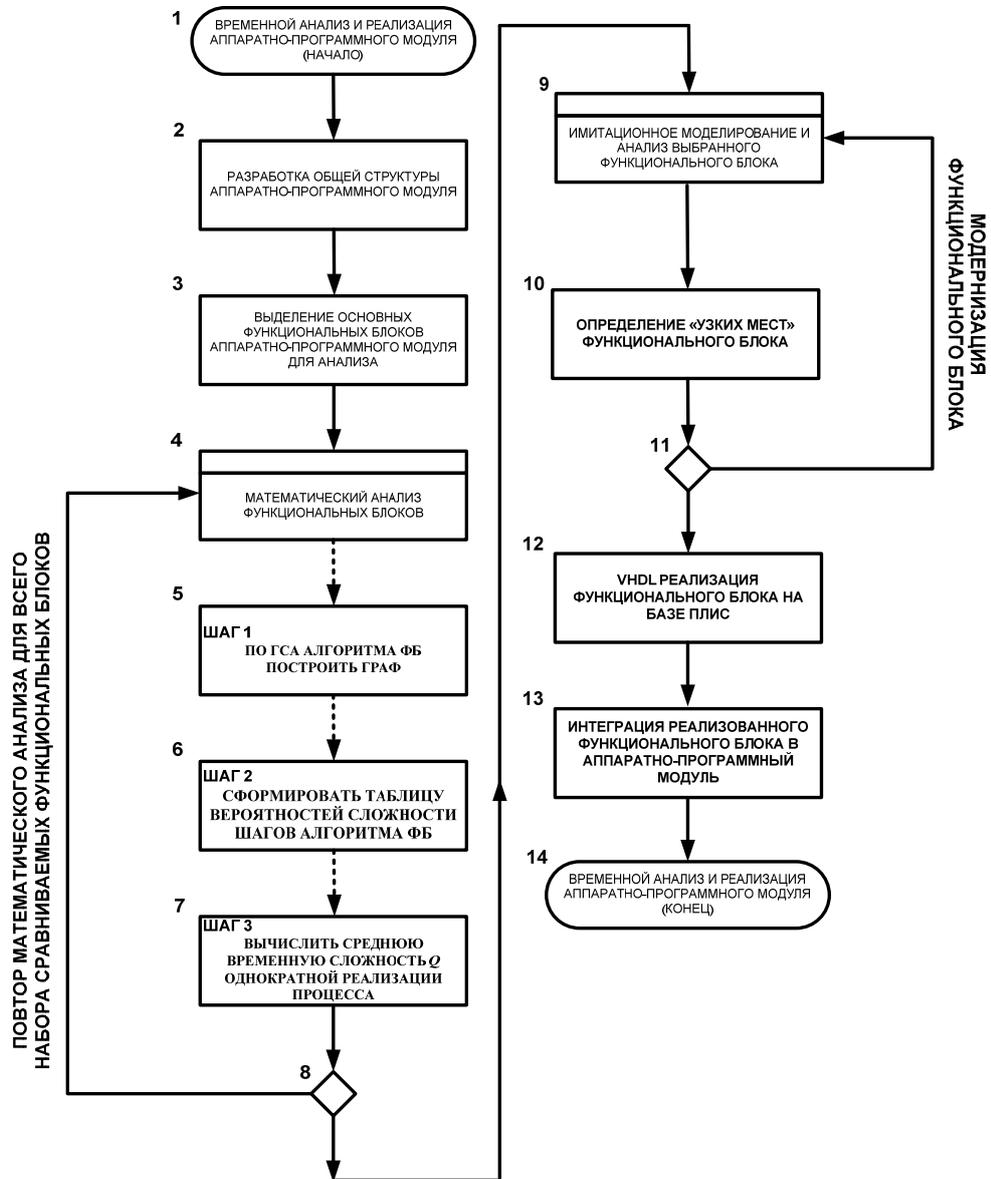


Рис. 3. Иллюстрация методики временного анализа и реализации аппаратно-программного модуля вычислительной системы

Процесс временного анализа (шаги 4–14 на рис. 3) показан для одного алгоритма – SRT-деление. Остальные способы деления анализируются аналогично.

На первом шаге теоретической оценки по граф-схеме SRT-алгоритма (ГСА) деления строится марковский граф (рис. 4) [8].

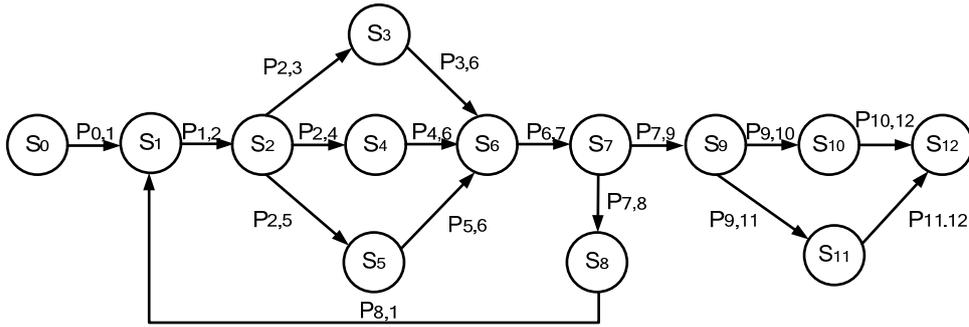


Рис. 4. Граф алгоритма SRT-деления

В данном графе состояния  $S_i$  определяют соответствующие состояния исследуемого алгоритма, а  $P_{ij}$  – вероятности переходов из одного состояния алгоритма  $S_i$  в другое  $S_j$ .

На втором шаге теоретической оценки формируется таблица вероятностной сложности шагов алгоритма деления (табл. 1).

Таблица 1

Вероятностная сложность шагов алгоритма SRT-деления

Состояние $S_i$	Значение состояния $S_i$	Вероятность $P_{ij}$ перехода из состояния $S_i$ в состояние $S_j$	Примечание
$S_0$	состояние, в котором находится вычислитель до запуска вычислительного процесса	$P_{0,1} = 1$	нет
$S_1$	ввод делимого $X$	$P_{1,2} = 1$	нет
$S_2$	ввод делителя $Y$	$P_{2,3} = 0,33$	нет
$S_3$	получить остаток $R = X - Y$	$P_{2,4} = 0,33$	нет
$S_4$	анализ: остаток больше нуля или нет	$P_{2,5} = 0,33$	нет
$S_5$	флаг $Z$ установить в 1	$P_{3,6} = 1$	нет
$S_6$	сдвиг $R$ вправо на один разряд	$P_{3,6} = 1$	нет
$S_7$	анализ: остаток больше нуля или нет	$P_{4,6} = 1$	нет
$S_8$	сложить остаток $R$ с делителем $Y$ : $R = R + Y$	$P_{5,6} = 1$	нет
$S_9$	декремент счетчика выполнения операции деления	$P_{6,7} = 1$	нет
$S_{10}$	анализ	$P_{7,8} = N - 1$	нет
$S_{11}$	конец операции деления	$P_{7,9} = 1$	нет
$S_{12}$	финальное состояние	$P_{9,10} = 0,5$	нет
		$P_{9,11} = 0,5$	нет

При однократной и результативной реализации процесса вычислений временная сложность алгоритма SRT-деления определяется по методике оценки сложности процессов с ветвлениями [8], для чего решается система уравнений [8] при  $d_0 = 1$  и вероятностях  $P_{ij}$  (табл. 2).

Таблица 2

Временная сложность алгоритма SRT-деления

Система уравнений определения временной сложности алгоритма SRT-деления $Q$	Временная сложность алгоритма SRT-деления				
	при $N=8$	при $N=16$	при $N=32$	при $N=64$	при $N=128$
$-1 \cdot d_0 = -1$	1	1	1	1	1
$P_{0,1} \cdot d_0 + P_{8,1} \cdot d_8 - d_1 = 0$	7,5	14	24	39	56,4
$P_{1,2} \cdot d_1 - d_2 = 0$	7,5	14	24	39	56,4
$P_{2,3} \cdot d_2 - d_3 = 0$	2,5	5	8	13	19
$P_{2,4} \cdot d_2 - d_4 = 0$	2,5	5	8	13	19
$P_{2,5} \cdot d_2 - d_5 = 0$	2,5	5	8	13	19
$P_{3,6} \cdot d_3 + P_{4,6} \cdot d_4 + P_{5,6} \cdot d_5 - d_6 = 0$	7,4	14	24	39	56
$P_{6,7} \cdot d_6 - d_7 = 0$	0,9	0,9	0,7	0,5	0,5
$P_{6,8} \cdot d_6 - d_8 = 0$	6,5	13	23	38	55
$P_{7,9} \cdot d_7 - d_9 = 0$	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3
$P_{7,10} \cdot d_7 - d_{10} = 0$	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3
$P_{9,11} \cdot d_9 + P_{10,11} \cdot d_{10} - d_{11} = 0$	0,9	0,9	7,5	0,5	0,5
<b>Временная сложность алгоритма SRT-деления <math>Q = \sum_{k=0}^{k-1} d_k</math>, в тактах машинного времени</b>	<b>40</b>	<b>72</b>	<b>124</b>	<b>197</b>	<b>282</b>

На третьем шаге вычисляется средняя временная сложность  $Q$  однократной и результативной реализации процесса, которая определяется как сумма  $d_i$ :  $Q = \sum_{k=0}^{k-1} d_k$  (табл. 2), а средняя временная сложность вычислений

массива данных  $Q_{mas}$  определяется произведением средней временной сложности  $Q$  однократной и результативной реализации процесса на количество

данных в массиве  $Q_{mas} = N \cdot \sum_{k=0}^{k-1} d_k$ , где  $N$  – количество данных в массиве.

Повторив описанные выше расчеты для исследуемых алгоритмов, разработчик выбирает лучший с точки зрения временных затрат (рис. 5 – иллюстрация массовой обработки нескольких десятков целых чисел). В данном случае меньшее время обработки показал алгоритм SRT-деления.

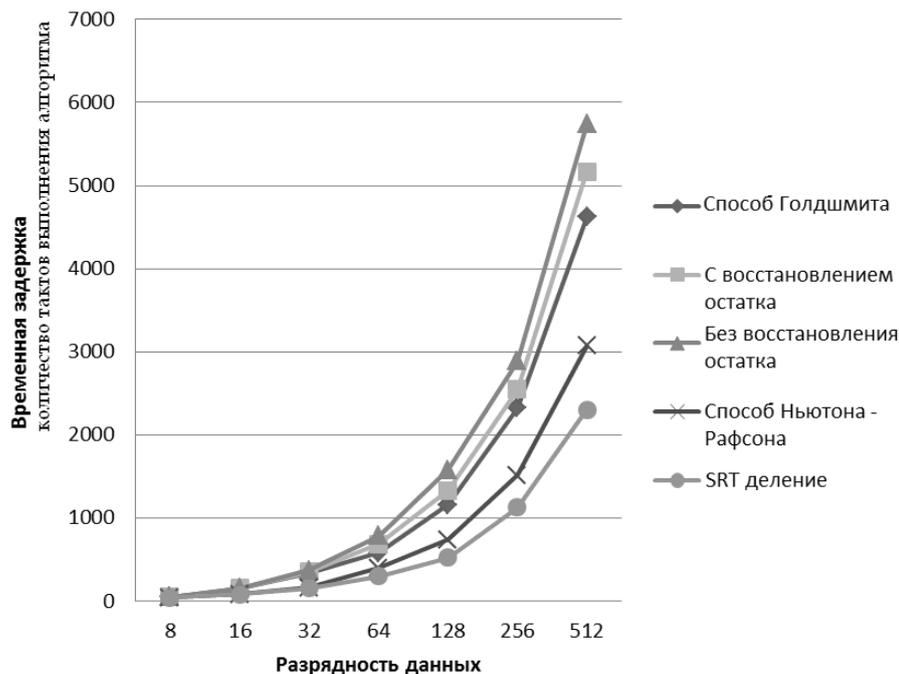


Рис. 5. Временные диаграммы временного анализа алгоритмов деления математическим способом

Для проверки адекватности математической модели реализуется имитационная модель алгоритмов деления в системе CPN Tools с использованием сетей Петри [9] (рис. 6) (шаги 9–10 на рис. 3). В отличие от иных систем и языка имитационного моделирования, данный подход позволяет описывать как дискретные, так и вероятностные модели, как синхронные, так и асинхронные вычислительные модули [9]. Вид имитационной модели алгоритма SRT-деления практически полностью повторяет граф на рис. 4. При реализации логики имитационной модели помимо графических элементов используется скриптовый язык описания логики. Так, в данной имитационной модели (рис. 6) элементы `sub_signed`, `add_signed`, `setbit`, `lsr` – скрипты, логика которых повторяет логику шагов алгоритма SRT-деления [7].

Приведем пример кода `add_signed` [7]:

```

fun add_signedN (lhs : signedN, rhs : signedN) =
sl2signedN (add_sl([#1 lhs, #2 lhs, #3 lhs, #4 lhs, #5 lhs,
#6 lhs, #7 lhs, #8 lhs...#N lhs],
[#1 rhs, #2 rhs, #3 rhs, #4 rhs, #5 rhs, #6 rhs, #7 rhs,
#8 rhs...#N rhs]));
скрипт - сложения N разрядных чисел.
Fun sub_signedN (lhs : signedN, rhs : signedN) = let
val rhs_ok = (not_bit(#1 rhs), not_bit(#2 rhs),
not_bit(#3 rhs), not_bit(#4 rhs), not_bit(#5 rhs), not_bit(#6
rhs), not_bit(#7 rhs), not_bit(#8 rhs)... not_bit(#N rhs));
in add_signedN(lhs, add_signedN(rhs_ok, (0, 0, 0, 0,... 0,
0, 0, 1)))
end
    
```

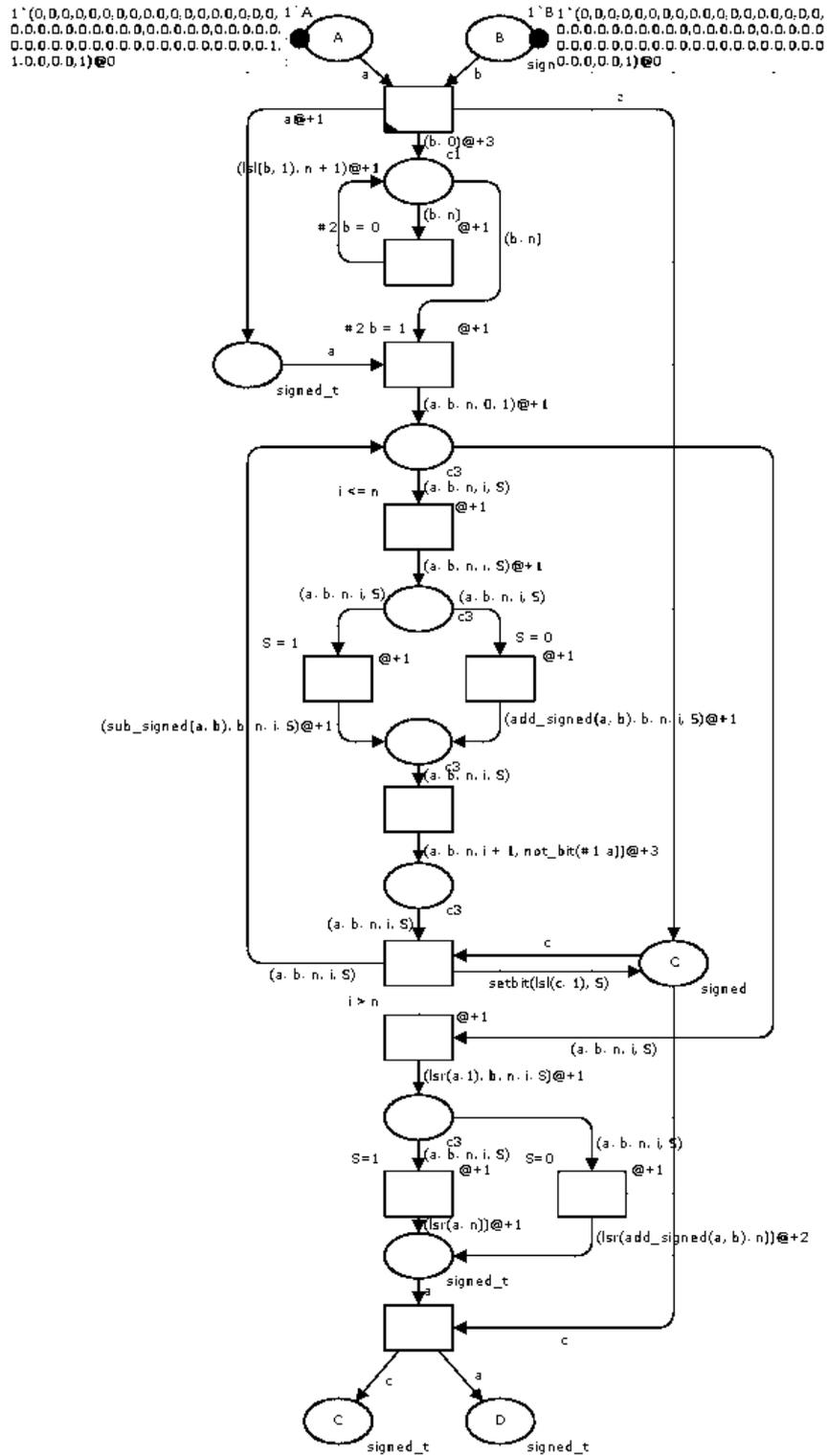


Рис. 6. Имитационная модель функционального блока, реализующего алгоритм SRT-деления в CPN Tools

Данная модель в интерактивном режиме показывает потоки информации по шагам в рамках функционального блока. Система статистики дает возможность увидеть как общую временную задержку, так и задержку по шагам [9]. В результате разработчик, если этого требует необходимость, может провести анализ и доработку модели, а затем испытать имитационную модель функционального блока (рис. 7) и всего модуля целиком.

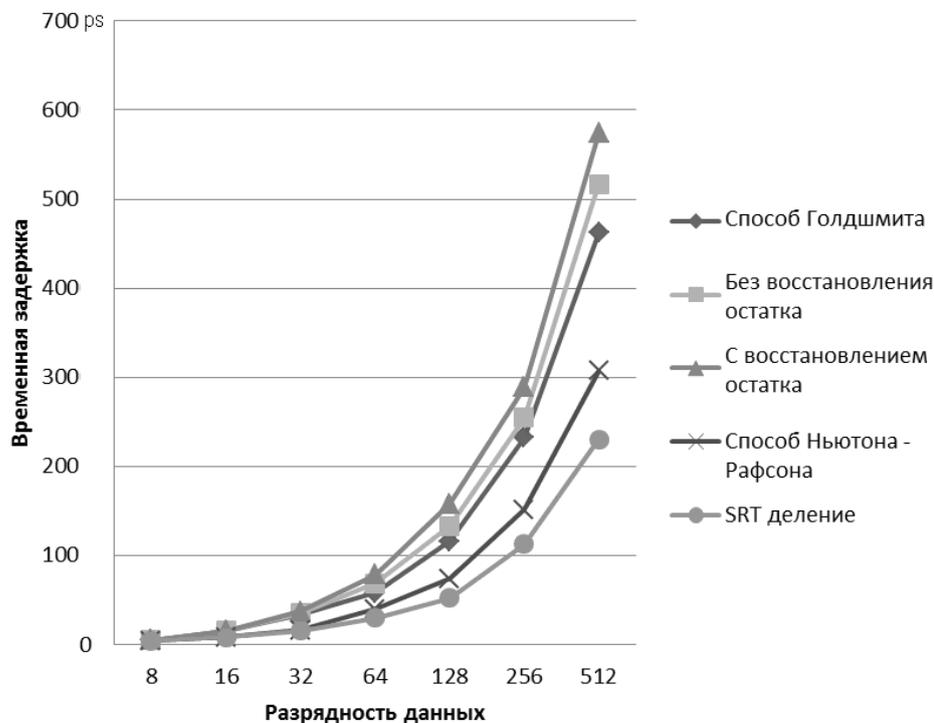


Рис. 7. Результаты имитационного моделирования алгоритмов деления

После теоретической и имитационной проверки испытанный алгоритм реализуется в виде самостоятельного устройства на базе ПЛИС фирмы ALTERA в виде иерархической связки условного графического обозначения (УГО) и логики на языке VHDL (рис. 8) [10].

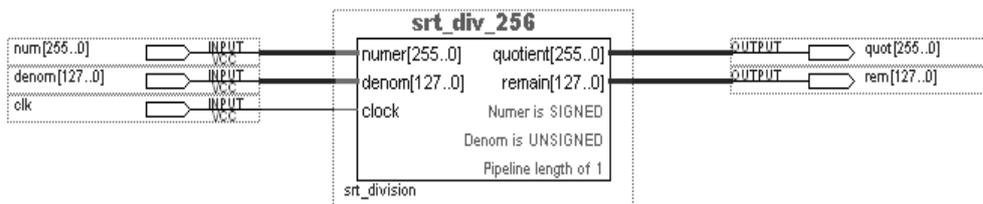


Рис. 8. Условное графическое обозначение устройства блока SRT-деления 256-разрядных данных

Код устройства SRT-деления на языке VHDL (реализация логики алгоритма SRT-деления) (рис. 8):

```
LIBRARY IEEE;
USE IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
USE IEEE.STD_LOGIC_ARITH.ALL;
USE IEEE.STD_LOGIC_UNSIGNED.all;
ENTITY square_root IS
    GENERIC(n: NATURAL := 256);
PORT (
    x: IN STD_LOGIC_VECTOR(n-1 DOWNT0 0);
    clk, reset, start: IN STD_LOGIC;
    r: INOUT STD_LOGIC_VECTOR(n-1 DOWNT0 0);
    done: OUT STD_LOGIC
);
END square_root;
ARCHITECTURE behavior OF square_root IS
    SIGNAL next_r, s, next_s: STD_LOGIC_VECTOR(n-1 DOWNT0 0);
    SIGNAL greater: STD_LOGIC;
    SIGNAL ce, load: STD_LOGIC;
    TYPE states IS RANGE 0 TO 2;
    SIGNAL current_state: states;
BEGIN
    next_r <= r + 1;

    next_s <= s + (next_r(n-2 DOWNT0 0)&'0') + 1;

    register_r: PROCESS(clk)
    BEGIN
        IF clk'EVENT AND clk = '1' THEN
            IF LOAD = '1' THEN r <= (OTHERS => '0');
            ELSIF ce = '1' THEN r <= next_r;
            END IF;
        END IF;
    END PROCESS;
    register_s: PROCESS(clk)
    BEGIN
        IF clk'EVENT AND clk = '1' THEN
            IF LOAD = '1' THEN s <= CONV_STD_LOGIC_VECTOR(1,256);
            ELSIF ce = '1' THEN s <= next_s;
            END IF;
        END IF;
    END PROCESS;
    greater <= '1' WHEN s > x ELSE '0';
    control_unit_output: PROCESS(current_state, start, greater)
    BEGIN
        CASE current_state IS
            WHEN 0 => ce <= '0'; load <= '0'; done <= '1';
            WHEN 1 => ce <= '0';
                IF start = '1' THEN load <= '1'; done <= '0';
        ELSE load <= '0'; done <= '1'; END IF;
            WHEN 2 => IF greater = '0' THEN ce <= '1'; ELSE ce <=
'0'; END IF;
                load <= '0'; done <= '0';
        END CASE;
    END PROCESS;
    control_unit_next_state: PROCESS(clk, reset)
    BEGIN
        IF reset = '1' THEN current_state <= 0;
        ELSIF clk'event AND clk= '1' THEN
```

```

CASE current_state IS
  WHEN 0 => IF start = '0' THEN current_state <= 1; END
IF;
  WHEN 1 => IF start = '1' THEN current_state <= 2; END
IF;
  WHEN 2 => IF greater = '1' THEN current_state <= 0;
END IF;
END CASE;
END IF;
END PROCESS;
END behavior;

```

Затем производится апробация готового к эксплуатации функционального блока средствами САПР Altera [10]. Если устройство на испытаниях показывает верные тестовые результаты (рис. 9), то оно сохраняется в рабочей библиотеке САПР Altera для последующего использования в рамках аппаратно-программного модуля. Иначе производится тестирование разработанного функционального блока [10].

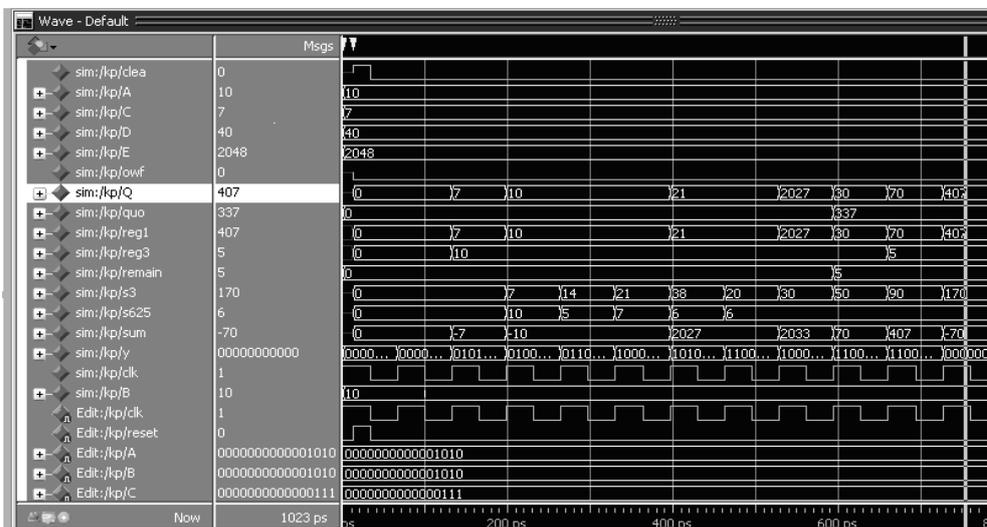


Рис. 9. Апробация работа функционального блока SRT-деления средствами САПР Altera

После формирования библиотеки готовых функциональных блоков аппаратно-программного модуля, в данном случае модуль арифметико-логического устройства (рис. 10), осуществляется формирование и проверка работоспособности всей схемы АЛУ [10] (рис. 11, 12). Функциональные блоки АЛУ (рис. 10): `lpm_add_sub`, `lpm_divide`, `inv_to_dop`, `shift` – реализованы с использованием описанной выше методики.

В итоге получена и описана методика оценки временных затрат и реализации аппаратно-программных модулей на базе ПЛИС. Адекватность методики была проверена реализацией вычислительных устройств на базе различных типов ПЛИС с последующим анализом временных затрат в САПР фирмы Altera [10]. Практичность методики доказана неоднократным использованием в рамках грантов и федеральных целевых программ.

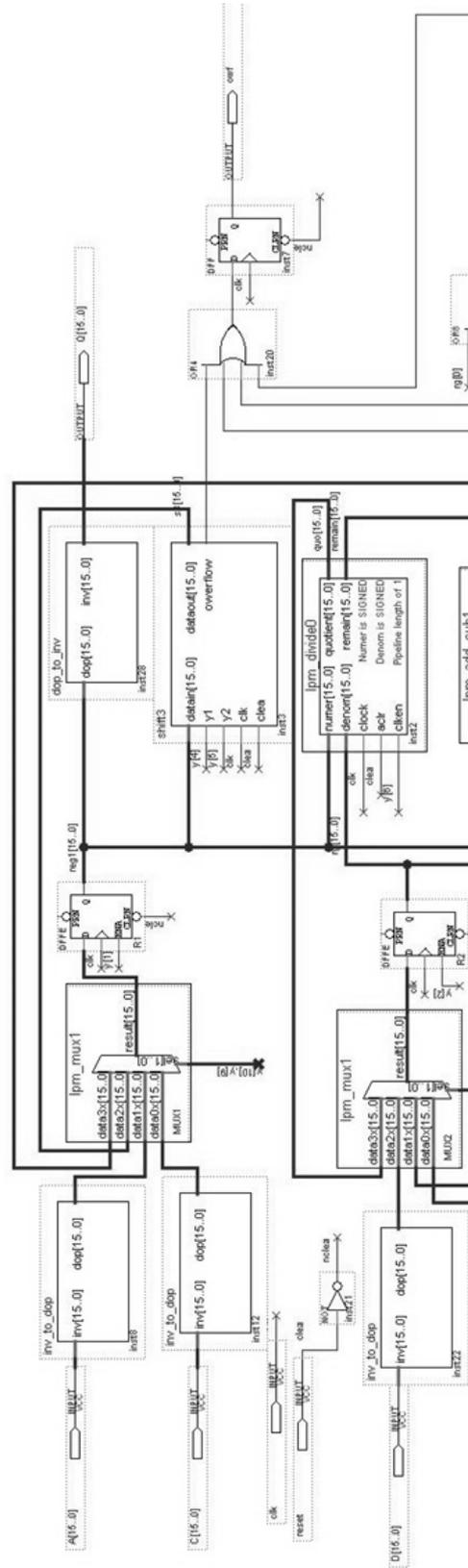


Рис. 10. Схема АЛУ на базе арифметико-логических функциональных блоков

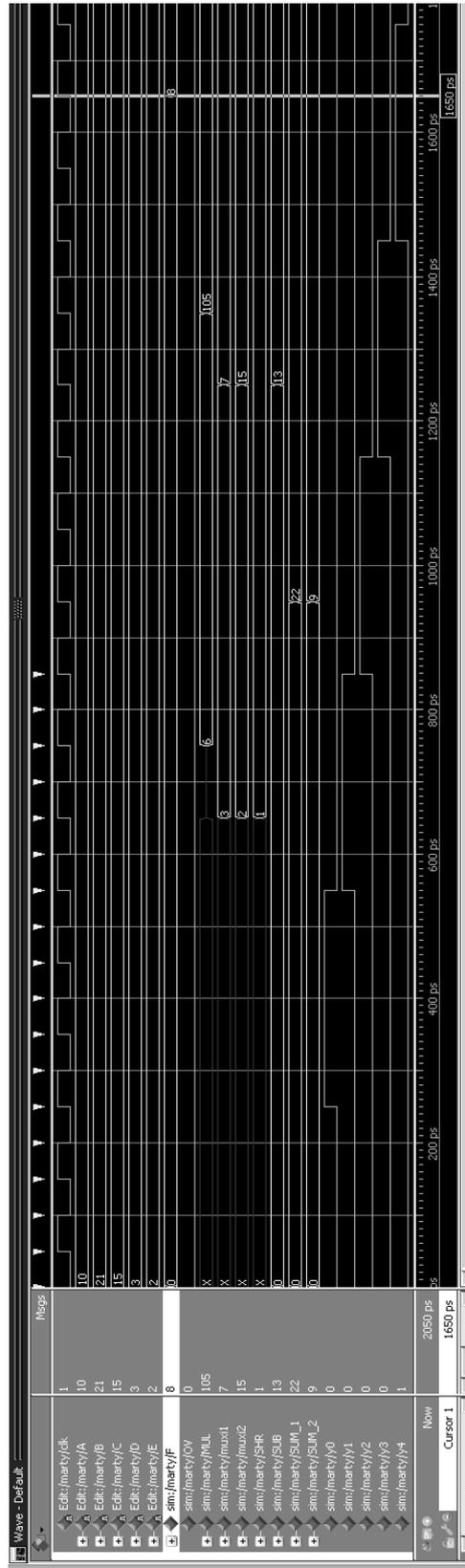


Рис. 11. Пример работы аппаратно-программного модуля АЛУ

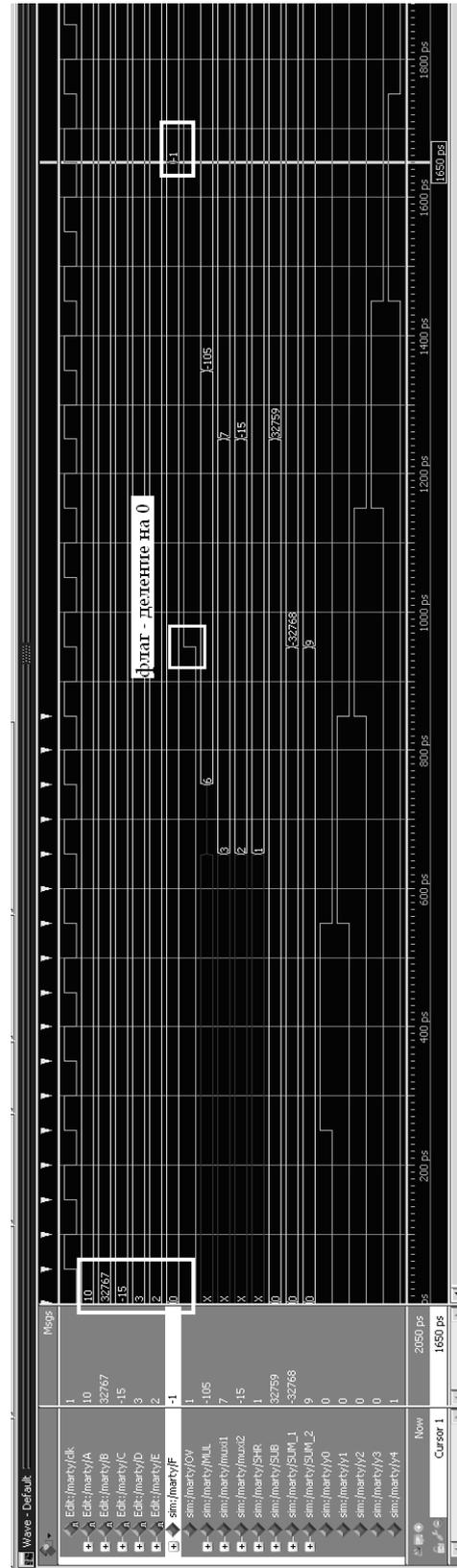


Рис. 12. Пример работы аппаратно-программного модуля АЛУ (исключительная ситуация – деление на ноль)

Несмотря на наличие в средствах реализации СБИС систем программных модулей для расчета и визуализации временных затрат, данная методика на ранних этапах формирования архитектуры позволяет быстро оценить адекватность затрат на разработку вычислительного устройства и внести нужные разработчикам коррективы. Автор неоднократно применял данную методику при обосновании патентных решений на базе вычислительных систем [2, 5].

### *Список литературы*

1. **Федюнин, Р. Н.** Способ реализации аппаратного слоя VLIW архитектуры на базе систолических структур / Р. Н. Федюнин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 2 (26). – С. 15–22.
2. Патент № 2284568 Российская Федерация. Ячейка однородной вычислительной среды / Федюнин Р. Н., Князьков В. С. – Оpubл. 27.09.2006, Бюл. № 27.
3. Maltsev, A. Triangular systolic array with reduced latency for QR-decomposition of complex matrices, Circuits and Systems, 2006. ISCAS 2006 / A. Maltsev, V. Pestretsov, R. Maslennikov, A. Khoryaev // Proceedings. 2006 IEEE International Symposium, 2006. – P. 602–608.
4. **Hegde, G.** Implementation of Systolic Array Architecture for Full Search Block Matching Algorithm on FPGA / Ganapathi Hegde, Prasanna Cyril, P. Raj and P. R. Vaya // European Journal of Scientific Research. – 2009. – Vol. 33, № 4. – P. 606–616.
5. **Федюнин, Р. Н.** Конвейерно-модульные умножители в системе остаточных классов / Р. Н. Федюнин, В. С. Князьков // Вопросы радиоэлектроники. – 2007. – Т. 1, № 1. – С. 1–14.
6. **Федюнин, Р. Н.** Функциональные блоки АЛУ для конвейерно-параллельной обработки информации на базе однородных вычислительных структур / Р. Н. Федюнин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 2. – С. 32–42.
7. **Костин, А. Е.** Организация и обработка структур данных в вычислительных системах / А. Е. Костин, В. Ф. Шангин. – М. : Высшая школа, 1987. – 245 с.
8. **Федюнин, Р. Н.** Оценка пространственно-временной сложности и способы повышения скорости двоичных арифметических операций / Р. Н. Федюнин // Научное обозрение. – 2006. – № 3. – С. 100–111.
9. **Дворянский, Л. В.** Имитационное моделирование и верификация вложенных сетей Петри с использованием CPN Tools / Л. В. Дворянский, И. А. Ломазова // Моделирование и анализ информационных систем. – 2012. – Т. 19, № 5. – С. 115–130.
10. URL: <http://www.altera.com/>

### *References*

1. Fedyunin R. N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2013, no. 2 (26), pp. 15–22.
2. Patent № 2284568 Russian Federation. *Yacheyka odnorodnoy vychislitel'noy sredy* [A cell of a homogeneous computing environment]. Fedyunin R. N., Knyaz'kov V. S. Publ. 27.09.2006, Bull. № 27.
3. Maltsev A., Pestretsov V., Maslennikov R., Khoryaev A. *Proceedings. 2006 IEEE International Symposium*, 2006, pp. 602–608.
4. Hegde G., Prasanna Cyril, Raj P. and Vaya P. R. *European Journal of Scientific Research*. 2009, vol. 33, no. 4, pp. 606–616.

5. Fedyunin R. N., Knyaz'kov V. S. *Voprosy radioelektroniki* [Issues of radioelectronics]. 2007, vol. 1, no. 1, pp. 1–14.
6. Fedyunin R. N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2007, no. 2, pp. 32–42.
7. Kostin A. E., Shangin V. F. *Organizatsiya i obrabotka struktur dannykh v vychislitel'nykh sistemakh* [Organization and processing of data structures in computing systems]. Moscow: Vysshaya shkola, 1987, 245 p.
8. Fedyunin R. N. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific overview]. 2006, no. 3, pp. 100–111.
9. Dvoryanskiy L. V., Lomazova I. A. *Modelirovanie i analiz informatsionnykh sistem* [Information system modeling and analysis]. 2012, vol. 19, no. 5, pp. 115–130.
10. Available at: <http://www.altera.com/>

---

**Федюнин Роман Николаевич**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра вычислительной техники,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: [frn\\_penza@mail.ru](mailto:frn_penza@mail.ru)

**Fedyunin Roman Nikolaevich**

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, sub-department of computer  
engineering, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

УДК 004.415.2

**Федюнин, Р. Н.**

**Временной анализ и реализация аппаратно-программных модулей арифметического логического устройства / Р. Н. Федюнин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 33–48. DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-3**

## ОЦЕНКА ИНФОРМАЦИОННЫХ РИСКОВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ<sup>1</sup>

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Рассматриваются аспекты управления информационными рисками в системах защищенного сбора и распределенной обработки больших сенсорных данных. Объектами информационных угроз являются компоненты SCADA-систем диспетчерского контроля и управления в службах энергоснабжения и энергопотребления.

*Материалы и методы.* Сбор и распределенная обработка данных осуществляется с пространственно-распределенных датчиков, приборов автоматики, учета и контроля энергоносителей и процессов транспортировки энергии в инженерных энергетических сетях. На узлах беспроводной сенсорной сети, модемах сотовой связи и промышленных контроллерах приборов учета и контроля энергоресурсов реализуется модель распределенных «туманных» вычислений, относительно которой рассмотрены основные составляющие информационных рисков.

*Результаты.* Приведена классификация информационных угроз и атак в отношении беспроводной транспортной среды «туманных» вычислений. Определены методы и инструментальные средства защиты сенсорных сегментов технологии ZigBee, узлов сбора данных, беспроводных каналов связи и передаваемых данных. Особое внимание уделяется аспектам обеспечения информационной безопасности в отношении программных агентов и брокеров «туманных» вычислений.

*Выводы.* Обеспечение защиты и выполнение политик безопасности при организации доступа с пространственно-распределенный модулей к агентам и брокерам «туманных» вычислений требует разработки новых моделей защиты из-за ограниченных вычислительных и энергетических ресурсов сетевых узлов. Вопросы информационной защиты смещаются от защиты периметра сети и сетевой инфраструктуры в сторону защиты сенсорных данных и кадров с кодом агентов «туманных» вычислений.

**Ключевые слова:** мониторинг, защита сенсорных данных, информационный риск, распределенная обработка данных, туманные вычисления, SCADA, беспроводная сенсорная сеть, информационная безопасность.

А. А. Finogeev, A. G. Finogeev, I. S. Nefedova

## INFORMATION RISKS ASSESSMENT IN DISTRIBUTED SYSTEMS OF DATA PROCESSING ON THE BASIS OF WIRELESS SENSOR NETWORKS

### Abstract.

*Background.* The article considers information risk management aspects in systems of secured collection and distributed processing of large sensor data. The tar-

---

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-07-00031, 15-07-01720, № 15-57-54033.

gets of information threats are SCADA components of systems of centralized control and management in power supply and energy consumption services.

*Materials and methods.* Collection and distributed processing of data are implemented via spatially distributed sensors, devices of automation, control and registration of energy sources and transportation of energy in engineering power networks. Applied at wireless sensor network nodes, cell connection modems and industrial controllers of energy resources control and registration devices, the authors implement a model of distributed “fog” computing, according to which main components of information risks are considered.

*Results.* The article introduces a classification of information threats and attacks on wireless transporting environment of “fog” computing. The work determines methods and tools of protection of ZigBee sensor segments, data collection nodes, wireless communication channels and transmitted data. Special consideration is given to information safety provision regarding program agents and brokers of “fog” computing.

*Conclusions.* Ensuring protection and safety protocols execution at organization of access from spatially distributed modules to agents and brokers of “fog” computing requires development of new models of protection due to limited computing and power resources of network nodes. Problems of information protection are shifting from network perimeter and network infrastructure protection towards protection of sensor data and personnel with “fog” computing agents’ codes.

**Key words:** monitoring, sensor data protection, information risk, distributed data processing, fog computing, SCADA, wireless sensor network, information security

### **Введение**

Понимание и оценка угроз информационной безопасности – это основа внедрения любой информационной системы (ИС), в том числе для обеспечения процессов мониторинга и диспетчерского контроля [1, 2]. Переход на применение беспроводных каналов связи, в особенности сетей сотовой связи для передачи данных и реализации удаленного доступа, многократно увеличивает риски информационной безопасности.

Традиционно системы управления рисками опираются на мнения экспертов, либо предполагают ведение анкет, на основании которых производится оценка уязвимостей ИС и рисков. Это является основным недостатком, так как ответы могут давать некомпетентные лица либо лица, заинтересованные в сокрытии информации. Автоматизированные системы, основанные на базах знаний и процедурах логического вывода, позволяют выявлять информационные ресурсы, нарушение защиты которых является неприемлемым, строить модели защиты информационных активов, сравнивать их между собой по критерию «эффективность – стоимость», определять варианты комплексов мер защиты и контроля, вести мониторинг организации информационной безопасности. Недостатком таких систем является высокая стоимость их покупки и использования, так как отечественных систем в настоящее время на рынке не представлено.

### **Анализ рисков в системах сбора и обработки данных**

Внедрение беспроводных сетей, технологий, моделей и методов сбора и распределенной обработки данных приводит к новым опасностям возникновения убытков или ущерба в результате их применения в системах мониторинга. Анализ информационных рисков представляется как процесс выявления подобной опасности и оценки негативных последствий в результате возник-

новения нарушений в работе вычислительных, программных и телекоммуникационных составляющих и технологических процессов сбора, обработки, хранения и передачи информации, а также прогнозирование последствий в количественных показателях. Потенциально возможные негативные последствия могут возникнуть в результате сбоев или отказов в работе распределенных на большой территории сенсорных узлов, модемов, измерительно-технологического оборудования, телекоммуникационных систем передачи данных. Причиной возникновения и реализации рисков могут быть деструктивные воздействия вирусных программ, ошибки или преднамеренные действия персонала предприятия и внешних злоумышленников, природных факторов окружающей среды, сбой электропитания, помехи и т.п.

Новой технологией распределенной обработки больших сенсорных данных, которая предлагается для систем мониторинга и диспетчерского управления, является модель «туманных» вычислений [3, 4]. Концепция туманных вычислений предусматривает обработку данных терминальными устройствами с ограниченными вычислительными и энергетическими ресурсами, в число которых могут входить контроллеры промышленного оборудования и устройств бытовой техники, а также узлы сенсорных сетей. В качестве защищаемых компонент системы «туманных» вычислений необходимо рассматривать программные агенты, брокеры и операционные прошивки, которые реализуют процедуры сбора и обработки данных, а также сами данные, передаваемые по каналам связи.

Понятие информационного риска включает следующие категории: активы предприятия, причины или угрозы, факторы, уязвимости, последствия, ущерб [5]. Причиной или угрозой возникновения информационного риска (рис. 1) является явление или событие, вызывающее риск, а фактор риска определяется как характеристика процесса или явления, которое способствует или препятствует возможности реализации риска [6].

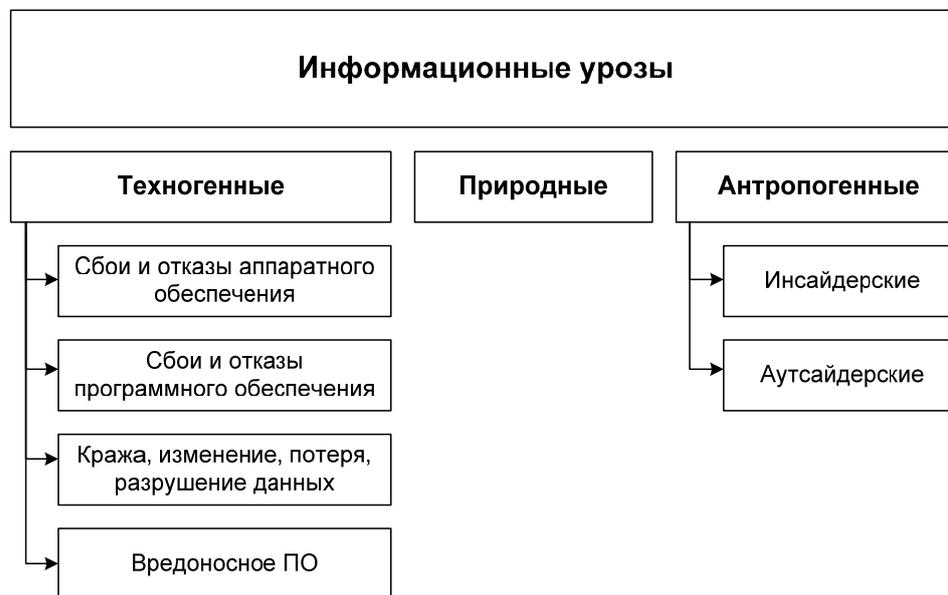


Рис. 1. Категории информационных угроз

Информационная угроза определяет источники возникновения информационных рисков через уязвимости системы, а факторы следует рассматривать как обстоятельства, способствующие или препятствующие реализации риска. Большинство угроз реализуется путем осуществления атак на информационные активы внутренними и внешними нарушителями и/или программными средствами с использованием уязвимостей (рис. 2).

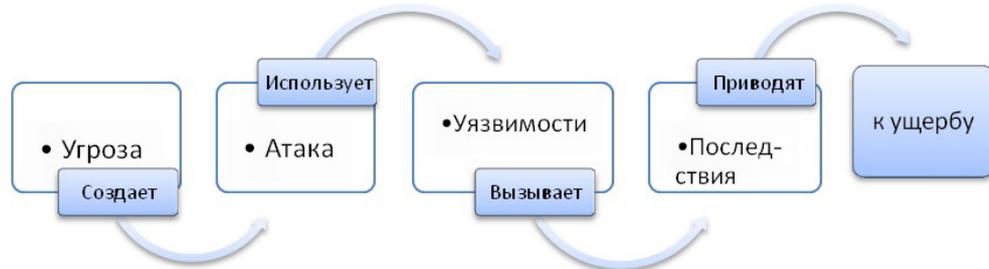


Рис. 2. Взаимосвязь между категориями информационного риска

Управление информационными рисками заключается в согласованном воздействии на объекты и субъекты информационно-вычислительной и телекоммуникационной инфраструктуры системы энергетического мониторинга в направлении устранения угроз, уязвимостей и факторов рисков с целью предупреждения или минимизации возможных последствий от их реализации.

Модель информационных рисков может быть представлена в виде взвешенного динамического гиперграфа (рис. 3):  $G = (V(S_i, Q_j), P_k(U_k))$ , где подмножество вершин  $S_i = \{s_i | i = 1, \dots, N_s\}$  моделирует угрозы, подмножество вершин  $Q_j = \{q_j | j = 1, \dots, N_q\}$  моделирует уязвимости, множество гиперребер  $P_k = \{p_k | k = 1, \dots, M\}$  – атаки, динамически возникающие в момент времени  $t$ .

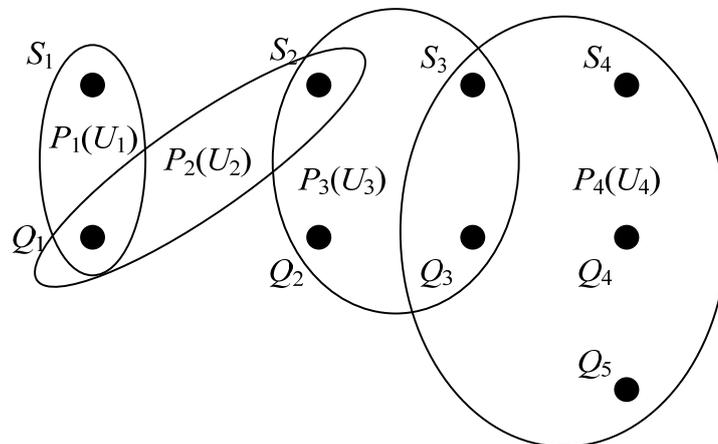


Рис. 3. Гиперграфовая модель информационных рисков

Динамические гиперребра объединяют подмножество вершин-угроз с подмножеством вершин-уязвимостей и представляют атаки, в результате которых возникает и реализуется информационный риск  $R_k$  с последствиями,

которые можно оценить ущербом  $U_k$ . В модели величина возможного ущерба  $U_k$  в случае реализации информационного риска представлена весом динамического гиперребра. Оценка информационного риска представляет собой определение уровня риска, а также его сравнения с допустимым уровнем при конкретных условиях его реализации. Для оценки риска можно использовать такие параметры, как уровень критичности  $K_i$  (%) возникновения  $i$ -й угрозы и вероятность реализации атаки  $P_a$  (%) со стороны угрозы  $S_i$  через уязвимость системы  $Q_j$ .

Уровень критичности информационного риска можно оценить как отношение числа реализаций риска на число возникновения риска в течение интервала времени  $\Delta T$ .

Угрозу можно оценить как

$$S_i(Q_j) = K_i \times P_a \times 0,1,$$

где коэффициент 0,1 используется для снижения размерности при перемножении переменных в процентах.

Информационный риск  $R$  можно оценить через вероятности как

$$R_i = P_i(VF) \times U_i = (P_i(V) \times P_i(F/V)) \times U_i,$$

где  $P_i(VF)$  – вероятность совместного возникновения риска для  $i$ -й угрозы (событие  $V$ ) и его реализации (событие  $F$ );  $P_i(V)$  – вероятность возникновения риска из-за  $i$ -й угрозы;  $P_i(F/V)$  – условная вероятность реализации риска (события  $F$ ) при наступлении события  $V$ ;  $U_i$  – уровень ущерба от реализации риска (событие  $F$ ).

Вероятность реализации информационного риска определим с учетом уязвимости:

$$P_i(V) = P_j^u \times Q_i,$$

где  $P_i^u$  – вероятность реализации  $i$ -й угрозы в отношении  $j$ -го актива;  $Q_i$  – величина  $i$ -й уязвимости.

Управление информационными рисками в автоматизированных системах мониторинга и диспетчерского управления должно быть организовано в соответствии с политикой информационной безопасности предприятия [7, 8]. Здесь используются документально задекларированные правила, процедуры и разрешения, которые доводятся администраторами информационной безопасности и руководством до исполнения персоналом и являются инструментами управления рисками.

### **Обеспечение информационной безопасности в SCADA-системах с распределенной обработкой данных**

Защита от угроз безопасности является важным элементом в процессе функционирования SCADA-систем. Для обеспечения информационной безопасности SCADA-систем, которые обслуживают пространственно-распределенные объекты инженерных энергетических сетей, необходима защита следующих компонент:

- 1) контроллеров приборов автоматики, учета и контроля;
- 2) сенсорных узлов и модемного оборудования сотовой связи;
- 3) узлов серверного кластера в центре обработки данных;

- 4) информационного хранилища;
- 5) гетерогенной беспроводной среды передачи данных.

Эффективность решения задач по обеспечению информационной безопасности зависит от технологий и средств защиты беспроводной транспортной среды передачи данных. При реализации модели «туманных» вычислений, когда операции по распределенной обработке данных выполняются на терминальных и ретранслирующих узлах сенсорной сети и в промышленных контроллерах, также требуется организация защиты программных агентов и брокеров, загружаемых в данные узлы. В целом вопросы обеспечения информационной безопасности смещаются от защиты периметра сети в сторону защиты передаваемых данных и самих приложений «туманных» вычислений.

Программные агенты, брокеры и серверные приложения SCADA-системы должны иметь доступ только к внутренним ресурсам (сенсорным данным и данным из центрального информационного хранилища). «Тонкие» пользовательские клиентские приложения в виде информационных панелей (дашбордов) на мобильных средствах связи и вычислительных узлах за пределами периметра могут иметь ограниченный доступ только к агрегатам сенсорных данных и интегральным показателям, если это разрешено политиками безопасности. Хотя такая защита периметра полностью не гарантирует безопасности всех распределенных ресурсов в модели «туманных» вычислений, ее существование дает администраторам возможность осуществлять контроль доступа к информационным активам и оперативно обнаруживать вторжения. Для защиты периметра необходимо установить на координаторах сенсорных сегментов модули проверки адресов источников и обнаружения внешнего трафика за исключением запросов на сбор данных и маршрутных кадров от центрального координатора, а также запросов от тех пользовательских устройств, адреса которых загружаются в память координаторов сегментов. Необходимо обеспечить криптографическую защиту передаваемых данных и контроль передачи данных по беспроводным каналам связи между брокерами «туманных» вычислений и центральным координатором сети, а также между клиентами и шлюзами.

Ограниченные энергоресурсы и вычислительная мощность узлов сенсорных сетей не позволяют применять сложные протоколы и алгоритмы защиты данных и процессов передачи. Основной упор делается на своевременное обнаружение подозрительного трафика либо несвойственных маршрутов передачи данных. Поэтому инструментами информационной безопасности в беспроводных сенсорных сетях следует считать системы обнаружения (IDS – Intrusion Detection System) и предотвращения вторжений (IPS – Intrusion Prevention System) [9].

Критической угрозой здесь является внедрение программ для кражи данных о контролируемых процессах или кодов активации исполнительных механизмов. Серьезной проблемой для SCADA-систем, которые работают с множеством удаленных объектов мониторинга на большой территории, является тенденция к установке модемов сотовой связи для сбора данных и использовании в качестве передающей среды каналов сотовой связи с возможностью публичного доступа. Такие каналы фактически являются мишенью для проведения атак на информационные активы.

Механизмы защиты данных должны учитывать следующие моменты:

1. Топология и динамические маршруты в сенсорной сети строятся на основе информации, полученной от координаторов, маршрутизаторов или оконечных сенсорных узлов по принципу «маршрутизация от источника».

2. При работе алгоритмов маршрутизации используется механизм широковещательной рассылки маршрутных кадров и квитанций подтверждения. Широковещательная рассылка также используется при конфигурировании сети, назначении адресов и поиске новых узлов.

3. После построения маршрута передача кадров осуществляется последовательно по цепочке между соседними узлами по одному маршруту, который можно разрушить или изменить в любой момент времени.

4. Идентификация сенсорных узлов и кадров данных осуществляется только на основе адресной информации, полученной сенсорными узлами от координатора сети, что позволяет подменить координатор.

5. Аутентификация кадров данных и узлов сети в большинстве случаев не выполняется, что позволяет подменить сенсорные узлы и маршрутизаторы на «чужие» узлы с вредоносной «прошивкой».

В беспроводной сенсорной среде реализуются следующие виды атак (рис. 4) [10].

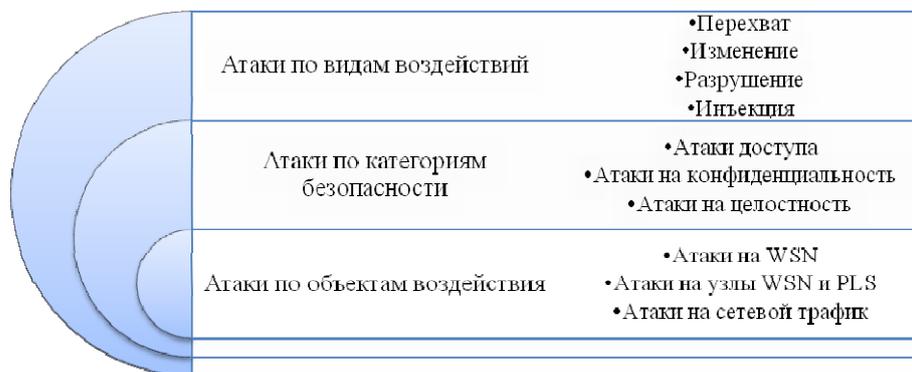


Рис. 4. Категории информационных атак в среде «туманных» вычислений

Данные атаки можно определить по отношению ко всей сети, отдельным узлам и сетевому трафику (рис. 5) [11].

#### **Инструменты обеспечения безопасности в среде «туманных» вычислений**

В плане обеспечения надежной и безопасной передачи данных беспроводная транспортная среда SCADA-системы должна быть устойчивой как к радиопомехам, так и к различным видам воздействий, приводящих к нарушению ее функциональности, сбоям и отказам в работе сетевых узлов и подключенным к ним устройств. Обеспечение помехоустойчивости требует реализации мероприятий по электромагнитной защите узлов сети (экранирование узлов, использование узконаправленных антенн, применение фильтров помех, помехоустойчивое кодирование данных, расширение спектра частот, активная смена радиоканалов), что позволяет устранить или снизить влияние помех.



Рис. 5. Классификация атак в среде «туманных» вычислений

Для решения проблем безопасности целесообразно использовать следующие методы:

1. Резервирование транспортной среды путем создания вторичной сети, которая активируется при обнаружении атаки на основную сеть.
2. Интеграция в систему мониторинга программно-технических решений по обнаружению и предотвращению вторжений, которые могут поставляться разработчиками или представлять автономные комплексы.
3. Использование встроенных подсистем обеспечения безопасности.
4. Комбинированные решения.

Основными мероприятиями защиты являются следующие:

1. Планирование беспроводных сенсорных сетей и конфигурирование сенсорных узлов.
2. Идентификация и аутентификация всех активов системы мониторинга (пользователей, программных агентов и брокеров, серверных и клиентских приложений, сетевых узлов, приборов автоматике, кадров данных).
3. Организация защиты от активных радиопомех.
4. Шифрование и организация защищенных каналов передачи данных.
5. Контроль и управление ключами доступа и шифрования.
6. Поиск и ликвидация уязвимостей в проприетарном ПО системы.
7. Локализация атак и злоумышленников.
8. Обнаружение и предотвращение вторжений.
9. Контроль трафика в реальном времени и фильтрация кадров данных.
10. Анализ и ликвидация последствий атак в отношении восстановления функциональности системы после сбоев и отказов.
11. Мониторинг и аудит системы безопасности.
12. Отслеживание и установка обновлений ПО и ОС в ручном режиме.
13. Отслеживание информации в Интернете по уязвимостям эксплуатируемой SCADA-системы у других потребителей и производителя.

14. Периодическое использование эксплоитов с новыми базами уязвимостей для пентестинга эксплуатируемых компонент системы мониторинга.

15. Аудит работы агентов, приложений, пользователей и т.д.

Основные средства обеспечения безопасности:

1. Системы обнаружения сетевых вторжений (NIDS – Network-Based Intrusion Detection System).

2. Системы предотвращения вторжений через периметр сети (NIPS – Network-Based Intrusion Prevention System).

3. Автономные системы предотвращения вторжений, размещаемые на сетевых узлах (HIPS – Host-Based Intrusion Prevention System).

4. Системы антивирусной защиты.

5. Межсетевые экраны.

6. Системы аутентификации и управления доступом пользователей.

7. Системы аутентификации сетевых ресурсов и кадров данных.

8. Системы криптографической защиты и управления ключами и т.п.

### **Заключение**

От степени защищенности систем мониторинга и диспетчерских SCADA-систем в области энергетики зависит энергетическая безопасность регионов и национальная безопасность. Методы управления информационными рисками на базе инфокоммуникационных технологий являются достаточно новым направлением в теории управления рисками. Они касаются разработки мероприятий по снижению вероятности возникновения и реализации информационных рисков в плане предупреждения несанкционированного доступа к данным, возможности перехвата, изменения, уничтожения данных и, в конечном счете, предотвращения аварий и сбоев оборудования на объектах инженерных коммуникаций энергетической отрасли. В общей инфраструктуре системы мониторинга с использованием распределенной обработки данных на основе модели «туманных» вычислений следует разделять три зоны ответственности в плане реализации мероприятий безопасности:

1) транспортную зону сбора, распределенной обработки и передачи данных на основе беспроводной сенсорной сети и каналов сотовой связи, в которой узлы сенсорной сети и модемы сотовой связи связаны с датчиками, контроллерами и исполнительными механизмами, где выполняются производственные и технологические процессы;

2) зону диспетчерского контроля и управления с реализацией человеко-машинного интерфейса, где работают операторы и диспетчеры, с целью наблюдения за ходом выполнения технологического процесса;

3) корпоративную зону доступа, где обеспечивается доступ к информационному хранилищу со стороны серверных приложений вычислительного кластера и со стороны клиентских приложений.

Для защиты информационных активов предприятий энергетики целесообразно использовать многослойную модель, включающую защиту персональных данных и учетных записей персонала, списки контроля доступа, механизмы контроля периметра транспортной среды и отдельных сетевых сегментов, виртуальные защищенные каналы связи, защиту центрального вычислительного кластера и т.д. Однако обеспечение защиты и выполнение политик безопасности при организации доступа с подобных устройств к аген-

там и брокерам «туманных» вычислений требует разработки новых моделей защиты из-за ограниченных вычислительных и энергетических ресурсов сетевых узлов. Вопросы информационной защиты смещаются от защиты периметра сети и сетевой инфраструктуры в сторону защиты сенсорных данных и кадров с кодом агентов «туманных» вычислений.

#### **Список литературы**

1. **Финогеев, А. Г.** Система удаленного мониторинга и управления сетями теплоснабжения на основе беспроводных сенсорных сетей / А. Г. Финогеев, В. Б. Дильман, В. А. Маслов, А. А. Финогеев // Прикладная информатика. – 2011. – № 3 (33). – С. 83–93.
2. **Камаев, V. A.** Wireless monitoring and control at urban heating supply system / V. A. Kamaev, L. R. Fionova, A. G. Finogeev, A. A. Finogeev // International Journal of Applied Engineering Research – Research India Publications. – 2015. – Vol. 10, № 3. – P. 6499–6507.
3. **Bonomi, F.** Fog Computing and Its Role in the Internet of Things / Flavio Bonomi, Rodolfo Milito, Jiang Zhu, Sateesh Addepalli // Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing. – ACM New York, NY, USA 2012. – P. 13–16
4. **Камаев, В. А.** Инструментальные средства облачного мониторинга распределенных инженерных сетей / В. А. Камаев, А. Г. Финогеев, И. С. Нефедова, Е. А. Финогеев // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. – 2014. – Вып. 22, № 25 (152). – С. 164–176.
5. ISO/IEC 27005:2008 Information technology. Security techniques. Information security risk management. – М., 2008.
6. **Финогеев, А. Г.** Проблемы безопасности беспроводной сенсорной сети в SCADA-системах АСУ ТП / А. Г. Финогеев, И. С. Нефедова, Тхай Куанг Винь // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. – 2014. – Вып. 20, № 6 (133). – С. 129–138.
7. **Завгородний, В. И.** Информационные риски и экономическая безопасность предприятия / В. И. Завгородний. – М. : Финакадемия, 2008. – 160 с.
8. ГОСТ Р 50922–2006. Защита информации. Основные термины и определения. – М., 2006.
9. **Камаев, В. А.** Методология обнаружения вторжений / В. А. Камаев, В. В. Натров // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Концептуальное проектирование в образовании, технике и технологии. – 2006. – Вып. 2, № 2. – С. 127–132.
10. Analysis, classification and detection methods of attacks via wireless sensor networks in SCADA systems / P. V. Botvinkin, V. A. Kamaev, I. S. Nefedova, A. G. Finogeev, E. A. Finogeev // Life Science Journal – Acta Zhengzhou University Overseas Edition (Life Sci J). – 2014. – Vol. 11. – Special Issue 11 (Supplement 1111s). – P. 384–388.
11. Анализ и классификация атак через беспроводные сенсорные сети в SCADA системах / А. Г. Финогеев, И. С. Нефедова, Е. А. Финогеев, Тхай Куанг Винь, П. В. Ботвинкин // Прикаспийский журнал. Управление и высокие технологии. – 2014. – № 1. – С. 12–23.

#### **References**

1. Finogeev A. G., Dil'man V. B., Maslov V. A., Finogeev A. A. *Prikladnaya informatika* [Applied informatics]. 2011, no. 3 (33), pp. 83–93.

2. Kamaev V. A., Fionova L. R., Finogeev A. G., Finogeev A. A. *International Journal of Applied Engineering Research – Research India Publications*. 2015, vol. 10, no. 3, pp. 6499–6507.
3. Bonomi F., Milito Rodolfo, Zhu Jiang, Addepalli Sateesh *Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing*. 2012, pp. 13–16.
4. Kamaev V. A., Finogeev A. G., Nefedova I. S., Finogeev E. A. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Aktual'nye problemy upravleniya, vychislitel'noy tekhniki i informatiki v tekhnicheskikh sistemakh* [Proceedings of Volgograd State Technical University. Series: Topical problems of control, computer engineering and informatics in technical systems]. 2014, iss. 22, no. 25 (152), pp. 164–176.
5. *ISO/IEC 27005:2008 Information technology. Security techniques. Information security risk management*. Moscow, 2008.
6. Finogeev A. G., Nefedova I. S., Tkhai Kuang Vin' *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Aktual'nye problemy upravleniya, vychislitel'noy tekhniki i informatiki v tekhnicheskikh sistemakh* [Proceedings of Volgograd State Technical University. Series: Topical problems of control, computer engineering and informatics in technical systems]. 2014, iss. 20, no. 6 (133), pp. 129–138.
7. Zavgorodniy V. I. *Informatsionnye riski i ekonomicheskaya bezopasnost' predpriyatiya* [Information risks and economic safety of companies]. Moscow: Finakademiya, 2008, 160 p.
8. *GOST R 50922–2006. Zashchita informatsii. Osnovnye terminy i opredeleniya* [State standard R 50922–2006. Information protection. General terms and definitions].
9. Kamaev V. A., Natrov V. V. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Kontseptual'noe proektirovanie v obrazovanii, tekhnike i tekhnologii* [Proceedings of Volgograd State Technical University. Series: Conceptual design in education, engineering and technology]. 2006, iss. 2, no. 2, pp. 127–132.
10. Botvinkin P. V., Kamaev V. A., Nefedova I. S., Finogeev A. G., Finogeev E. A. *Life Science Journal – Acta Zhengzhou University Overseas Edition (Life Sci J)*. 2014, vol. 11, Special Issue 11 (Supplement 1111s), pp. 384–388.
11. Finogeev A. G., Nefedova I. S., Finogeev E. A., Tkhai Kuang Vin', Botvinkin P. V. *Prikaspiyskiy zhurnal. Upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian journal. Management and high technologies]. 2014, no. 1, pp. 12–23.

---

**Финогеев Антон Алексеевич**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра систем автоматизированного  
проектирования, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная 40)

E-mail: fanton3@ya.ru

**Finogeev Anton Alekseevich**

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, sub-department of CAD systems,  
Penza State University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

**Финогеев Алексей Германович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра систем автоматизированного  
проектирования, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная 40)

E-mail: alexeyfinogeev@gmail.com

**Finogeev Aleksey Germanovich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of CAD systems, Penza  
State University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

**Нефедова Ирина Сергеевна**  
аспирант, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная 40)

**Nefedova Irina Sergeevna**  
Postgraduate student, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

E-mail: fanton3@ya.ru

---

УДК 004.056.5

**Финогеев, А. А.**

**Оценка информационных рисков в распределенных системах обработки данных на основе беспроводных сенсорных сетей / А. А. Финогеев, А. Г. Финогеев, И. С. Нефедова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 49–60. DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-4**

С. А. Балахонова, О. Н. Бодин,  
А. Г. Иванчуков, В. Г. Полосин, А. Г. Убиенных

## ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СЕРДЦА В КОМПЬЮТЕРНОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ «КАРДИОВИД»

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Совершенствование технических устройств мониторинга электрофизиологических характеристик сердца привело к увеличению объема передаваемых данных, что определило необходимость разработки новых алгоритмов предварительного анализа электрокардиосигнала и исключения ошибок при передаче результатов. Целью работы является обоснование и разработка способа повышения достоверности оценки состояния сердца в компьютерной диагностической системе «Кардиовид» на основе энтропийно-параметрического анализа электрокардиосигнала и демодуляции канального кода.

*Материалы и методы.* Приведенные в работе подходы совершенствования мониторинга базируются на методах статистической обработки количественной информации о состоянии сердца и особенностях технической реализации структуры канала передачи данных в компьютерной диагностической системе «Кардиовид».

*Результаты.* Исследована статистическая модель регрессии для сортированного ряда отсчетов электрокардиосигнала, основанная на оценке изменения энтропии информационных процессов одного кардиоцикла. Разработан способ демодуляции канального кода. Проведен расчет статистических параметров электрофизиологических характеристик сердца и вероятности обнаружения ошибки канальным кодом. Получены результаты моделирования, подтверждающие повышение достоверности оценки состояния сердца при проведении мониторинга его электрофизиологических характеристик.

*Выводы.* Предложенные способы совершенствования мониторинга электрофизиологических характеристик сердца на базе компьютерной диагностической системы «Кардиовид» позволяют повысить достоверность оценки состояния сердца и расширить функциональные возможности классического анализа электрокардиосигнала. Значительное снижение временных и материальных затрат достигается благодаря оценке энтропии выборки сортированного ряда распределения результатов, полученного за цикл работы сердца, и модернизации способа передачи данных.

**Ключевые слова:** сердце, электрофизические характеристики, мониторинг, энтропия, термодинамические и информационные процессы, количество информации, вероятность обнаружения ошибки, энтропийно-параметрический потенциал.

S. A. Balakhonova, O. N. Bodin,  
A. G. Ivanchukov, V. G. Polosin, A. G. Ubiennykh

## INCREASE OF HEART CONDITION ASSESSMENT RELIABILITY IN THE “CARDIOVID” COMPUTER DIAGNOSTIC SYSTEM

**Abstract.**

*Background.* The improvement of technical devices of heart electrophysiological characteristics monitoring has led to an increase in the volume of transmitted data that has defined a need for development of new algorithms of preliminary analysis of electrocardiosignals and elimination of errors when transferring results. The purpose of the work is to substantiate and develop a method to increase heart condition assessment reliability in the “cardiovid” computer diagnostic system on the basis of an entropy-parametrical analysis of electrocardiosignals and channel code demodulation.

*Materials and methods.* The approaches to monitoring improvement, given in work, are based on methods of statistical processing of quantitative information on heart condition and features of technical realization of the data transmission channel structure in the “cardiovid” computer diagnostic system.

*Results.* The authors investigated a statistical model of regression for a sorted number of electrocardiosignal countings, based on information processes’ entropy change assessment for a single cardiocycle. The method of channel code demodulation was developed. The researchers calculated statistical parameters of heart electrophysiological characteristics and error detection probability by a channel code. The obtained modeling results confirm an increase of reliability of heart condition assessment when monitoring its electrophysiological characteristics.

*Conclusions.* The offered methods of improvement of heart electrophysiological characteristics monitoring on the basis of the “cardiovid” computer diagnostic system allow to increase reliability of heart condition assessment and to expand functionality of the classical analysis of electrocardiosignals.

**Key words:** heart, electrophysical characteristics, monitoring, entropy, thermodynamic and information processes, information quantity, probability of detection error, entropy-parametrical potential.

### Введение

Мониторинг электрофизиологических характеристик сердца – один из наиболее перспективных подходов диагностики заболеваний. Несмотря на то, что выявление первичных патологических изменений в функционировании сердца **принципиально** решается с помощью методов электрокардиографии, классические способы анализа электрокардиосигнала (ЭКС) исчерпали свои ресурсы и не позволяют повысить точность локализации повреждения миокарда. Одна из проблем состоит в большом объеме данных, получаемых при мониторинге характеристик сердца. При классическом подходе необходимо привлечение **опытного** специалиста для выявления и оценки степени повреждения миокарда. При этом время, затрачиваемое специалистом для поверхностного ознакомления с результатами мониторинга, сопоставимо со временем его проведения.

Очевидно, что использование компьютера позволяет существенно снизить затраты времени на анализ результатов мониторинга. При этом актуальными задачами являются поиск значимых параметров ЭКС и исключение ошибок при передаче данных для повышения эффективности диагностики кардиографической информации.

Целью статьи является обоснование и разработка подхода к повышению достоверности оценки состояния сердца в компьютерной диагностической системе (КДС) «Кардиовид» на основе энтропийно-параметрического анализа ЭКС и демодуляции канального кода.

### 1. Пути повышения достоверности оценки состояния сердца

Современная концепция медицинского мониторинга (от лат. *monitor* – предостерегающий) направлена на совершенствование и развитие методов непрерывного контроля состояния человека. В основе предлагаемого подхода к анализу состояния сердца в условиях свободной активности лежат принципы *своевременности* и *доступности*.

*Своевременность* – это возможность в течение 30 мин оказания экстренной кардиологической помощи (согласно медицинской статистике) в два раза сократить число осложнений [1]. В соответствии с инструкцией по оказанию скорой помощи бригада скорой помощи должна прибыть к пациенту в течение 20 мин. Своевременность обеспечивается определением рисков опасных аритмий сердца *без участия* высококвалифицированного медицинского персонала за счет автоматической статистической обработки сортированной выборки отчетов ЭКС одного кардиоцикла.

*Доступность* портативной информационно-измерительной системы мониторинга для определения опасных аритмий сердца в условиях свободной активности позволяет охватить слои населения из группы риска и обеспечивается низкой стоимостью и простотой пользования.

На рис. 1 приведена последовательность действий мобильного приложения компьютерной диагностической системы «Кардиовид» при мониторинге состояния сердца в условиях свободной активности.



Рис. 1. Предлагаемый подход к мониторингу состояния сердца

Контроль состояния сердца осуществляется путем регистрации физиологических данных и оценки диагностических показателей организма с целью выявления отклонения показателей, предупреждения опасностей, возникающих в процессе контроля. Достоверность передачи информации обратно пропорциональна вероятности возникновения ошибок в информационной системе. Тогда с точки зрения теории надежности [2] предлагаемый подход к мониторингу состояния сердца представляет собой последовательное соединение элементов, обеспечивающих работоспособное состояние КДС «Кардиовид» (рис. 2).

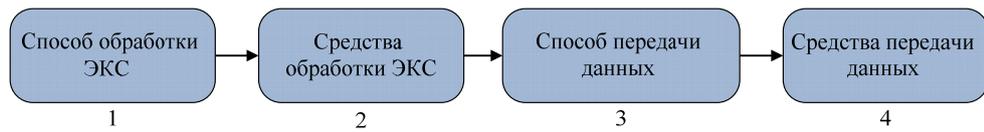


Рис. 2. Структурная схема надежности функционирования КДС «Кардиовид»

Вероятность безотказной работы системы последовательно соединенных элементов представляет собой произведение вероятностей каждого из блоков, приведенных на рис. 2:

$$P_D = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4. \quad (1)$$

Определим вероятность возникновения ошибок по структурной схеме надежности функционирования КДС «Кардиовид». Известно, что один из четырех перенесенных пациентами инфарктов миокарда не диагностируется по результатам классического амплитудно-временного анализа ЭКС, т.е. достоверность оценки состояния сердца (или способа обработки ЭКС на рис. 2) составляет  $P_1 = 0,75$ .

Далее допустим, что вероятность безотказной работы средств обработки ЭКС и передачи данных равна  $P_2 = P_4 = 0,99$ .

Далее определим вероятность возникновения ошибок ( $Q_3 = 1 - P_3$ ) способа передачи данных [3]. Канальное кодирование, как правило, ведет к удвоению разрядов двоичного кода [4]. Такой код можно обозначить  $(n, k)$ , где  $n$  – длина канального кода,  $k$  – длина двоичного кода,  $n = 2k$ . В терминах теории помехоустойчивого кодирования [5] канальный код обладает двойной избыточностью, следовательно, вероятность ошибки этого кода равна

$$Q_{ош}(n) = \sum_{i=1}^n C_n^i p^i (1-p)^{n-i} = \sum_{i=1}^{2k} C_{2k}^i \cdot p^i (1-p)^{2k-i}. \quad (2)$$

Вероятность обнаружения ошибок этим кодом равна

$$Q_{оо}(n) = \frac{1}{2^n} \sum_{j=1}^n W_j p^j (1-p)^{n-j}, \quad (3)$$

где  $W_j$  – число вариантов  $j$ -кратной обнаруживаемой кодом ошибки.

Поскольку в канале связи наиболее вероятны однократные ошибки, то для нашего случая при  $n=4$  получим

$$\text{при } p = 1 \cdot 10^{-3} \quad Q_{оо}(n) = 0,00495, \quad Q_3(4) = 0,0099 \text{ или } P_3(4) = 0,9901.$$

Тогда согласно выражению (1) вероятность безотказной работы будет равна

$$P_D = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 = 0,75 \cdot 0,99 \cdot (1 - 0,0099) \cdot 0,99 = 0,73.$$

Совершенно очевидно, что необходимо уменьшить вероятность возникновения ошибок в информационной системе, повысив тем самым досто-

верность информации при определении состояния сердца. По мнению авторов, повышение достоверности оценки состояния сердца в КДС «Кардиовид» возможно за счет совершенствования способов обработки ЭКС, средств регистрации и анализа ЭКС и средств передачи данных.

Рассмотрим каждую из возможностей повышения достоверности оценки состояния сердца в КДС «Кардиовид» отдельно.

## 2. Определение энтропии информационных процессов в сердце на основе сортировочного ряда значений временных отсчетов ЭКС

В рамках совершенствования способов обработки ЭКС авторами предлагается алгоритм определения состояния сердца, основанный на энтропийно-параметрическом анализе ЭКС [6]. Подход к анализу результатов, основанный на оценке энтропии выборки сортированного ряда распределения результатов, полученных во время мониторинга за один цикл работы сердца, не требуют значительных временных затрат, использования сложного оборудования, применения дополнительных материальных средств. Формирование сортированного ряда отсчетов ЭКС при мониторинге электрической активности сердца приведено на рис. 3.

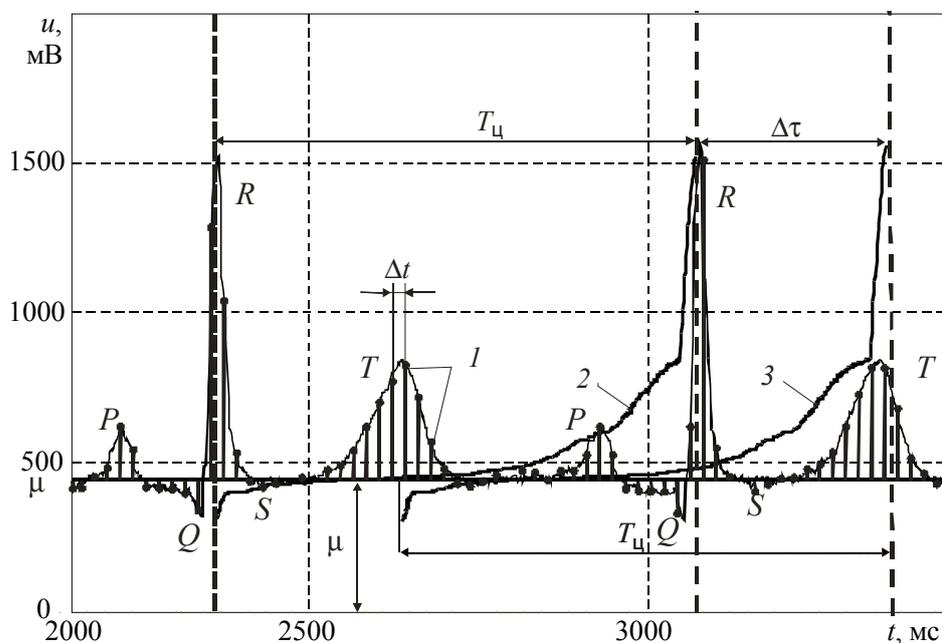


Рис. 3. Иллюстрация формирования сортированного ряда отсчетов ЭКС при мониторинге электрической активности сердца

Для анализа формируется выборка отсчетов  $l$  за один временной цикл наблюдений  $T_{ц}$ , затем этой же выборке сопоставляется сортированный ряд отсчетов  $2$  и  $3$ , показанных со смещением по времени на  $\Delta\tau$ . На рис. 3 отсчеты даны относительно изолинии ЭКС, смещенной на  $\mu$  относительно нулевого значения потенциала электрода. В связи с тем что каждый отсчет несет информацию о состоянии объекта, вероятность  $p_i$  его появления позволяет рассчитать энтропию информации с помощью следующей формулы [7]:

$$H = - \sum_{i=1}^m p_i \cdot \ln p_i, \quad (4)$$

и энтропийный потенциал  $\Delta_{\mathcal{E}}$  с помощью следующей формулы [6]:

$$\Delta_{\mathcal{E}} = \frac{1}{2} \Delta u \cdot N \cdot \exp \left( - \sum_{i=1}^m p_i \cdot \ln (N \cdot p_i) \right). \quad (5)$$

здесь  $N$  – количество отсчетов в выборке;  $m$  – количество интервалов группирования отсчетов;  $\Delta u$  – ширина интервала группирования отсчетов.

Приняв положение минимального значения сортированной выборки отсчетов в качестве начала отсчета времени и поделив их на время одного цикла, для распределения результатов относительно измеряемой величины находим экспериментальную зависимость распределения.

Так как параметры полученного распределения зависят от состояния сердца и отражают пропорциональный состав элементов кардиоцикла, то контроль изменения этих параметров позволяет определить появление отклонений в работе сердца. Среди таких параметров следует выделить параметры статистических распределений, применяемых для аппроксимации данных распределений. Параметр формы распределения  $s$  выбирается на основе сопоставления коэффициента энтропии  $k_{\mathcal{E}}$ , равного отношению энтропийного потенциала к среднему квадратическому отклонению выборки отсчетов, и значений, приведенных в табл. 1 [8]. В табл. 2 даны характерные параметры аппроксимирующих распределений при различных методах выбора распределений, основанных на совпадении математических ожиданий, средних квадратических отклонений, энтропийного и энтропийно-параметрического потенциала.

Оценка погрешности аппроксимации показывает, что наиболее эффективный способ аппроксимации отсчетов ЭКС основан на методе выбора параметров распределения, в основу которого положено совпадение энтропийно-параметрического потенциала.

Авторы считают, что достоверность способа обработки ЭКС (см. рис. 2) на основе энтропийно-параметрического анализа ЭКС составляет 0,93 (табл. 2).

### 3. Повышение достоверности передачи данных на основе демодуляции и обнаружения искажений канальных кодов

В рамках совершенствования способов передачи данных авторами предлагается алгоритм декодирования канального кода, увеличивающий достоверность приема двоичных сигналов.

Сущность способа заключается в том, что при кодировании канальным кодом каждый двоичный бит преобразуется в два биимпульса с частой сменной полярности сигнала. Это необходимо для самосинхронизации приемного устройства. Кроме того, для повышения помехоустойчивости передачи применяют биполярный сигнал типа  $(+u, -u)$ . Таким образом, при кодировании канальным кодом  $k$  двоичных бит отображаются в  $n=2k$  биполярных сигнала-

лах, что соответствует введению избыточности в первичный код. Эта избыточность используется для обнаружения искажений (ошибок) при приеме канального кода.

Таблица 1

Энтропийные коэффициенты и параметры формы для двухпараметрического распределения Вейбулла – Гнеденко

$i$	$c_i$	$k_{\alpha_i}$	$i$	$c_i$	$k_{\alpha_i}$	$i$	$c_i$	$k_{\alpha_i}$
0	0,2	0,000709	340	0,472	0,514	680	0,744	1,477
10	0,208	0,001193	350	0,48	0,545	690	0,752	1,498
20	0,216	0,001917	360	0,488	0,576	700	0,76	1,518
30	0,224	0,002955	370	0,496	0,607	710	0,768	1,538
40	0,232	0,004394	380	0,504	0,639	720	0,776	1,558
50	0,24	0,006326	390	0,512	0,671	730	0,784	1,577
60	0,248	0,008849	400	0,52	0,702	740	0,792	1,595
70	0,256	0,012	410	0,528	0,734	750	0,8	1,613
80	0,264	0,016	420	0,536	0,766	760	0,808	1,631
90	0,272	0,021	430	0,544	0,797	770	0,816	1,648
100	0,28	0,027	440	0,552	0,829	780	0,824	1,665
110	0,288	0,034	450	0,56	0,86	790	0,832	1,681
120	0,296	0,042	460	0,568	0,891	800	0,84	1,696
130	0,304	0,051	470	0,576	0,922	810	0,848	1,711
140	0,312	0,062	480	0,584	0,953	820	0,856	1,726
150	0,32	0,073	490	0,592	0,983	830	0,864	1,74
160	0,328	0,086	500	0,6	1,013	840	0,872	1,754
170	0,336	0,101	510	0,608	1,043	850	0,88	1,768
180	0,344	0,116	520	0,616	1,072	860	0,888	1,781
190	0,352	0,133	530	0,624	1,101	870	0,896	1,793
200	0,36	0,152	540	0,632	1,129	880	0,904	1,805
210	0,368	0,171	550	0,64	1,157	890	0,912	1,817
220	0,376	0,192	560	0,648	1,185	900	0,92	1,828
230	0,384	0,214	570	0,656	1,212	910	0,928	1,839
240	0,392	0,237	580	0,664	1,239	920	0,936	1,85
250	0,4	0,261	590	0,672	1,265	930	0,944	1,86
260	0,408	0,286	600	0,68	1,29	940	0,952	1,87
270	0,416	0,312	610	0,688	1,315	950	0,96	1,88
280	0,424	0,339	620	0,696	1,34	960	0,968	1,889
290	0,432	0,366	630	0,704	1,364	970	0,976	1,898
300	0,44	0,395	640	0,712	1,388	980	0,984	1,906
310	0,448	0,424	650	0,72	1,411	990	0,992	1,914
320	0,456	0,453	660	0,728	1,433	1000	1	1,922
330	0,464	0,483	670	0,736	1,455			

При демодуляции канальных кодов в приемнике с помощью стробирования и анализа структуры кода обнаруживаются искажения, информация о которых подается на следующий уровень помехоустойчивого декодирования в виде сигнала «стирание», что обеспечивает повышение достоверности приема информации. Структурная схема демодулятора канального кода приведена на рис. 4 [3].

Параметры аппроксимирующих распределений при различных методах выбора распределений

Метод выбора параметра распределения	Совпадение математических ожиданий	Совпадение средних квадратических отклонений	Совпадение энтропийных потенциалов	Совпадение энтропийно-параметрических потенциалов
Значение параметра масштаба	300,037 мВ	53,855 мВ	174,225 мВ	70,935 мВ
Погрешность аппроксимации	33 %	11 %	23 %	7 %

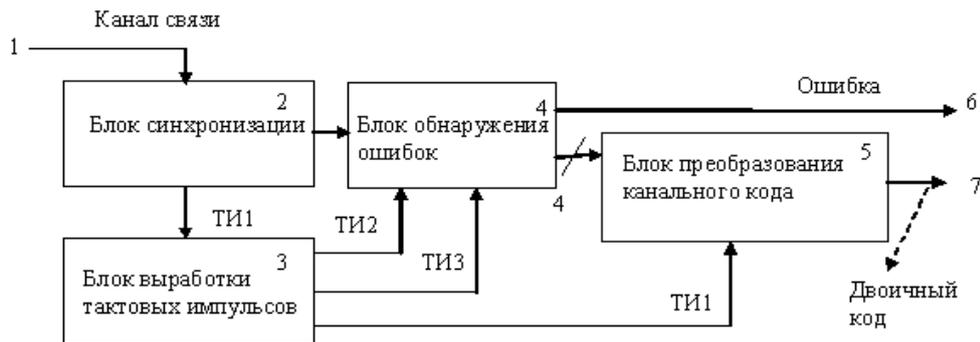


Рис. 4. Структурная схема демодулятора канального кода

При демодуляции канального кода в двоичные сигналы добавляются вырабатываемые блоком синхронизации синхронные тактовые импульсы ТИ1 с частотой следования, обратной длине тактового интервала  $T$ . На основе тактовых импульсов ТИ1 согласно вырабатываются тактовые импульсы ТИ2 и ТИ3, следующие соответственно с тактовыми интервалами  $T/2$  и  $2T$  (рис. 5).

С помощью тактовых импульсов ТИ2 и ТИ3 в блоке обнаружения ошибок выделяют последовательности из двух соседних запрещенных канальным кодом комбинаций и сообщают об ошибке преобразования канального кода в двоичный код.

Вероятность необнаруженных ошибок можно оценить по формуле

$$Q_{оо}(n) = Q_{ош}(n) - Q_{но}(n), \tag{6}$$

т.е. при  $p = 1 \cdot 10^{-3}$   $Q_{но}(n) = 0,00505$ .

Таким образом, на 50 % увеличивается количество обнаруживаемых ошибок и вероятность безотказной работы ( $P_3$ ) усовершенствованного способа передачи данных равна  $P_3 = 1 - 0,00505 = 0,99495$ .

Тогда согласно выражению (1) вероятность безотказной работы с использованием усовершенствованных способов обработки ЭКС и передачи данных будет равна

$$P_д = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 = 0,93 \cdot 0,99 \cdot (1 - 0,00505) \cdot 0,99 = 0,965.$$

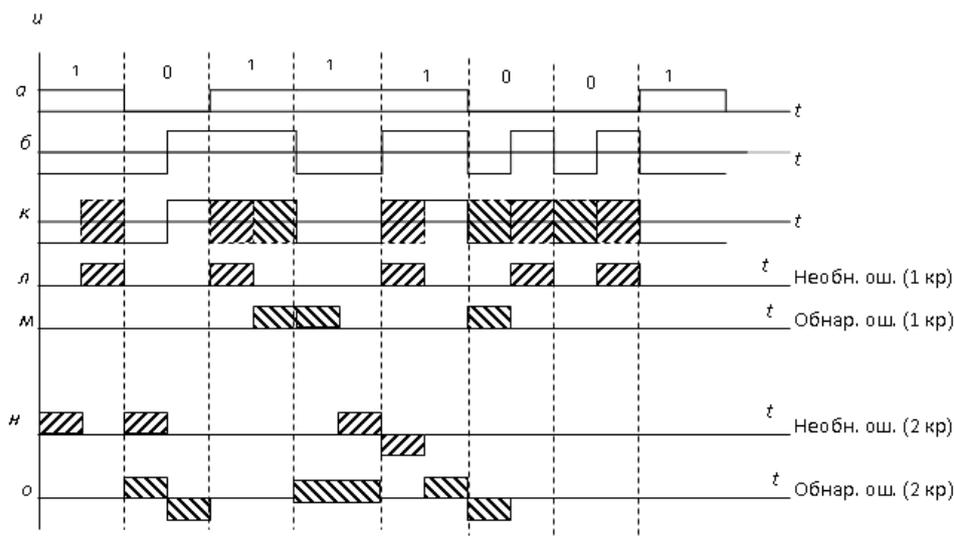


Рис. 5. Временные диаграммы демодуляции канального кода

### Заключение

Таким образом, повышение достоверности оценки состояния сердца в КДС «Кардиовид» обеспечивается за счет совершенствования способов обработки ЭКС, средств регистрации и анализа ЭКС и средств передачи данных.

Выделение длительности кардиоцикла ( $T_{Ц}$ ) и формирование сортированного ряда значений отсчетов ЭКС позволяют определить статистические параметры выборки, контроль которых обеспечивает отслеживание изменений электрокардиосигнала и указывает на наличие заболевания при выходе параметров за контролируемые границы.

Усовершенствование способа передачи данных на основе введения избыточности при демодуляции канального кода повышает достоверность передачи данных.

Таким образом, предлагаемый подход повышения достоверности оценки состояния сердца, основанный на оценке энтропии выборки сортированного ряда распределения результатов, полученных во время мониторинга за один цикл работы сердца, и усовершенствовании способа передачи данных, позволяет расширить функциональные возможности классического анализа ЭКС. При этом не требуется значительных временных затрат, использование сложного оборудования, применение дополнительных материальных средств.

### Список литературы

1. Сахно, И. И. Медицина катастроф (организационные вопросы) : учебник для медицинских вузов / И. И. Сахно, В. И. Сахно. – М. : ГОУ ВУНМЦ МЗ РФ, 2001. – 560 с.
2. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М. : Наука, 1965. – 524 с.
3. Патент № 2521299 Российская Федерация. Способ и устройство для демодуляции канального кода / Савельев Б. А., Бобрышева Г. В., Убиенных А. Г., Кручина М. В. – заявл. 01.11.2012 ; опубл. 27.06.2014, БИ №18.

4. **Савельев, Б. А.** Система передачи на основе канального кода / Б. А. Савельев, М. В. Кручинина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 62–73.
5. **Гладких, А. А.** Теория помехоустойчивого кодирования : метод. указания / А. А. Гладких. – Ульяновск : УлГТУ, 2005. – 34 с.
6. **Бодин, О. Н.** Энтропийно-параметрическая обработка электрокардиосигнала / О. Н. Бодин, А. Г. Иванчуков, В. Г. Полосин, Ф. К. Рахматуллов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 3. – С. 23–27.
7. **Shannon, C. E.** A mathematical theory of communication / C. E. Shannon // Bell Syst. Tech. J. – 1948. – № 27. – С. 379–423.
8. **Балахонова, С. А.** Способ построения кривой восстановления миокарда / С. А. Балахонова, О. Н. Бодин, В. Г. Полосин // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2013. – № 12. – С. 59–64.

### **References**

1. Sakhno I. I., Sakhno V. I. *Meditina katastrof (organizatsionnye voprosy): uchebnik dlya meditsinskikh vuzov* [Disaster medicine (organizational issues): textbook for medical universities]. Moscow: GOU VUNMTs MZ RF, 2001, 560 p.
2. Gnedenko V. V., Belyaev Yu. K., Solov'ev A. D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti* [Mathematical methods in the theory of reliability]. Moscow: Nauka, 1965, 524 p.
3. Patent № 2521299 Russian Federation. *Sposob i ustroystvo dlya demodulya-tsii kanal'nogo koda* [An approach and a device for channel code demodulation]. Savel'ev B. A., Bobrysheva G. V., Ubiennykh A. G., Kruchinina M. V. Appl. 01.11.2012; publ. 27.06.2014, Bull. № 18.
4. Savel'ev B. A., Kruchinina M. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2013, no. 4 (28), pp. 62–73.
5. Gladkikh A. A. *Teoriya pomekhoustoychivogo kodirovaniya: metod. ukazaniya* [The theory of noise-immune coding: methodological instructions]. Ulyanovsk: UIGTU, 2005, 34 p.
6. Bodin O. N., Ivanchukov A. G., Polosin V. G., Rakhmatullov F. K. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research]. 2015, no. 3, pp. 23–27.
7. Shannon C. E. *Bell Syst. Tech. J.* 1948, no. 27, pp. 379–423.
8. Balakhonova S. A., Bodin O. N., Polosin V. G. *Mekhatronika. Avtomatizatsiya. Upravlenie* [Mechatronics. Automation. Control]. 2013, no. 12, pp. 59–64.

---

**Балахонова Светлана Александровна**  
аспирант, Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: iit@pnzgu.ru

**Balakhonova Svetlana Aleksandrovna**  
Postgraduate student, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

**Бодин Олег Николаевич**  
доктор технических наук, профессор,  
кафедра информационно-измерительной  
техники и метрологии, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: bodin\_o@inbox.ru

**Bodin Oleg Nikolaevich**  
Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of information-measuring  
technology and metrology, Penza  
State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

***Иванчуков Антон Геннадьевич***

аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: anton@designer.ru

***Ivanchukov Anton Gennad'evich***

Postgraduate student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

***Полосин Виталий Германович***

кандидат технических наук, доцент, кафедра физики, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: polosin-vitalij@yandex.ru

***Polosin Vitaliy Germanovich***

Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of physics, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

***Убиенных Анатолий Геннадьевич***

старший преподаватель, кафедра информационно-вычислительных систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: utolg@.ru

***Ubiennykh Anatoliy Gennad'evich***

Senior lecturer, sub-department of data-computing systems, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

УДК 612.173; 536.758

**Повышение достоверности оценки состояния сердца в компьютерной диагностической системе «Кардиовид» / С. А. Балахонова, О. Н. Бодин, А. Г. Иванчуков, В. Г. Полосин, А. Г. Убиенных // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 61–71. DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-5**

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ДОКУМЕНТОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Качество выпускаемой продукции напрямую зависит от качества документов, сопровождающих ее выпуск. К ним относятся и управленческие документы. Перед внедрением автоматизированных систем управления любого уровня необходимо провести оптимизацию системы управления документами (СУД). Данный процесс ввиду отсутствия общепризнанной системы показателей эффективности состояния СУД весьма трудоемок. Целью работы является теоретическое обоснование подхода к анализу и оценке текущего состояния СУД предприятия и разработка эффективного алгоритма проведения анализа порядка документирования.

*Материалы и методы.* Начинать оптимизацию СУД нужно с анализа порядка документирования на соответствие действующим нормам. При разработке плана проверки предложено использовать группу государственных стандартов «Статистические методы управления качеством продукции». Для сокращения времени проведения проверки и анализа обосновано применение выборочного метода. Выделены однородные партии документов. Моделирование структуры связей между элементами различных партий проведено на основе ориентированного дерева. Граф  $G = (W, R)$  дает полную информацию о количестве документов, создаваемых в подразделении и объеме групп документов, что и необходимо учесть при планировании проверки. В соответствии со статистическими методами контроля введены показатели качества документов. При проведении анализа порядка документирования выборочным методом реализуется схема оценки вероятности события «неправильное оформление документа». Вычисляется частота его появления в некоторой выборке из генеральной совокупности всех документов определенной группы. Описан алгоритм проведения анализа порядка документирования.

*Выводы.* Выборочный метод является хорошо разработанной и многократно опробованной конструкцией теории вероятностей. Использование статистических методов при проведении анализа порядка документирования позволяет сократить время проверки и количество проверяющих. Эффективность алгоритма проведения анализа повышается.

**Ключевые слова:** управление качеством, управление документами, оптимизация, анализ документов, порядок документирования, моделирование связей между документами, статистические методы, алгоритм анализа.

L. R. Fionova, L. V. Korovina

## APPLICATION OF STATISTICAL METHODS OF DOCUMENT ASSESSMENT FOR QUALITY CONTROL

### Abstract.

*Background.* Product quality depends on the quality of documents accompanying its release. Before the implementation of automated control systems of any level

it is necessary to optimize the document management system (DMS). Due to a lack of established DMS performance indicators, this process is very time-consuming. The purpose of this work is to theoretically substantiate an approach to analyzing and assessing the current state of DMS at enterprises and to develop an algorithm for documentation order analysis.

*Materials and methods.* DMS optimization should start with documentation procedure analysis regarding compliance with current regulations. When developing the test plan it is suggested to use the state standards group "Statistical methods of quality control". To reduce the audit and analysis time it is offered to use the sampling method. The authors have singled out homogeneous batches of documents. The structure of links between elements of different parties was modeled on the basis of the oriented tree. The  $G=(W,R)$  graph gives full information on the number of documents created in the division and the volume of documents that needs to be considered when planning the audit. The indicators of document quality have been introduced in accordance with the statistical control methods. When analyzing the documentation order by the sampling method, there is implemented a scheme that estimates the probability of "incorrect document" occurrence. The frequency of its occurrence at some sampling in all documents of a certain group is calculated. The article describes the algorithm of documentation procedure analysis.

*Conclusions.* The sampling method is a well-developed and well-tested construction of the probability theory. The use of statistical methods in documentation procedure analysis allows to reduce the test time and a number of reviewers. The analysis algorithm efficiency increases.

**Key words:** control by quality, document management, optimization, analysis of documents, procedure documentation, modeling links between documents, statistical methods, the analysis algorithm.

## Введение

Обязательность документирования информации о деятельности любой организации определена законодательством [1]. Практически все бизнес-процессы, реализуемые в ходе функционирования предприятия, вплотную связаны с теми или иными видами документов, и итогом их осуществления являются не только реализованные действия, но и документы, создаваемые в результате выполнения каждого действия бизнес-процесса.

В зависимости от того, какой процесс отражается в документе, он может иметь юридическую, производственную или коммерческую ценность. Выпуск любой продукции сопровождается определенным количеством документов, в том числе и управленческих. Всегда весьма жесткие требования предъявляются к рабочей конструкторской документации [2]. Если говорить об управленческих документах, то их грамотное и своевременное оформление напрямую влияет на эффективность принятия каждого управленческого решения.

В связи этим действенным методом повышения качества управления деятельностью предприятий, а значит и качеством выпускаемой продукции, стала оптимизация системы управления документами (СУД). Совершенствование СУД создает условия для внедрения автоматизированных систем управления, что на сегодня является приоритетной задачей российских предприятий [3].

Необходимым этапом, предшествующим непосредственно оптимизации СУД, является изучение, анализ и оценка текущего состояния СУД пред-

приятия и бизнес-процессов как источника информации для документов. Однако данный этап ввиду отсутствия общепризнанной системы показателей эффективности состояния СУД весьма трудоемок. Но если предварительно не исправить ошибки традиционных (ручных) процессов, то они обязательно перенесутся и в автоматизированную СУД, и никакого эффекта не будет достигнуто.

Оптимизация управления документами позволяет привести все документационные процессы в соответствие с потребностями управления и существующими нормами с одновременным снижением затрат на их реализацию [4]. Начинать оптимизацию нужно с анализа порядка документирования (записи информации на материальном носителе [5]) на соответствие действующим нормам, которые в зависимости от специфики организации отражены в ГОСТ Р 6.30–2003 [6] или в методических рекомендациях [7].

### **1. Разработка плана проведения анализа порядка документирования**

Цель анализа – оценить степень и критичность отклонения от действующих правил [8]. В первую очередь анализ нацелен на оценку качества оформления управленческих документов. Предлагается не анализировать все документы организации, а использовать выборочный метод.

Для четкой организации процесса проверки и анализа необходимо разработать план его проведения, используя группу ГОСТов «Статистические методы управления качеством продукции» [9–12].

Согласно этим ГОСТам под контролируемой партией документов будем понимать совокупность единиц документов одного наименования, подготовленных в течение определенного интервала времени в одних и тех же условиях и одновременно представленных для контроля. Выборка – единицы документов, отобранные из контролируемой партии для контроля и принятия решения о соответствии действующим нормам. При статистическом приемочном контроле качества будет иметь значение объем партии – число единиц документов, составляющих контролируемую партию, а также объем выборки – число единиц документов, составляющих выборку.

Обычно смысл применения выборочного метода в различных сферах заключается в небольшой «жертве качества», обеспечивающей огромный выигрыш в затратах ресурсов, поскольку, как правило, выборка по объему во много раз меньше генеральной совокупности.

Применение выборочного метода в оценке документов, как и в других сферах деятельности, заключается в замене сплошного наблюдения какой-либо генеральной совокупности документов изучением некоторой ее части с последующим распространением результатов изучения на всю совокупность документов.

Применительно к оценке документов для выборочного контроля должны быть представлены следующие однородные партии документов: документы конкретного подразделения, документы организационной группы, документы распорядительной группы, документы информационно-справочной группы, документы каждого вида (наименования) [5].

Для облегчения разработки плана проведения оценки документов структура связей между элементами различных партий может быть отобра-

жена в виде ориентированного дерева (рис. 1) или же задана соответствующим теоретико-множественным представлением графа:

$$G = (W, R), \tag{1}$$

где  $G$  – конечный связный граф;  $W = \{w_i\}$ ,  $i = 1, \dots, n$ , – множество вершин графа;  $R = \{r_j\}$ ,  $j = 1, \dots, m$ , – множество дуг графа.

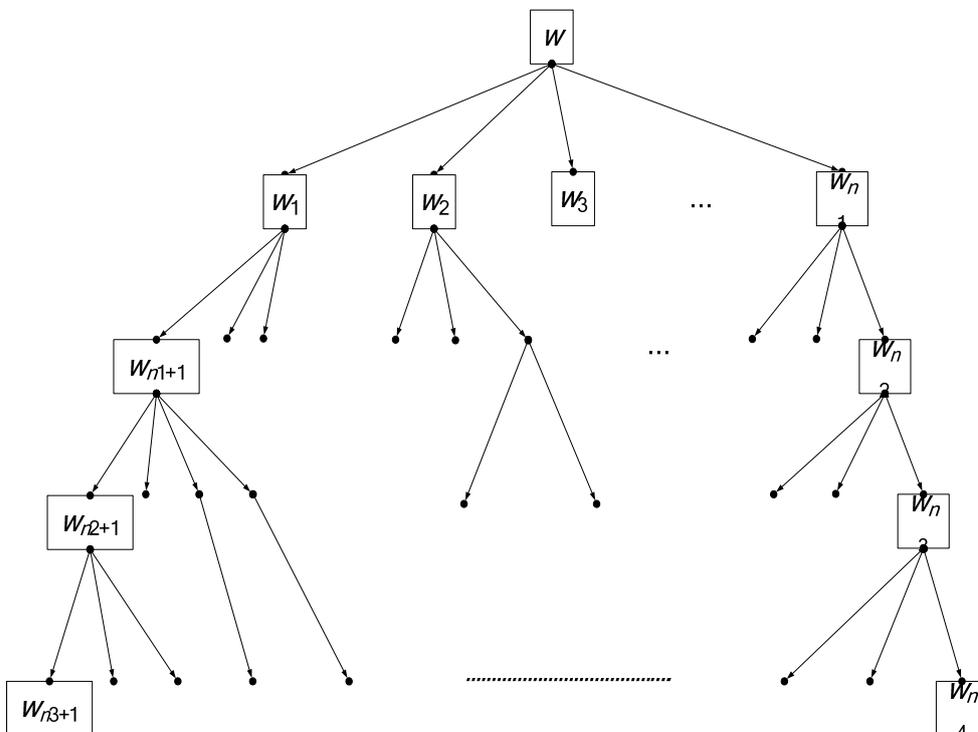


Рис. 1. Граф  $G = (W, R)$ , отражающий распределение документов по подразделениям

Множество  $W = \{w_i\}$  графа включают вершину  $w_0$ , моделирующую весь комплекс управленческих документов организации, и четыре непересекающихся подмножества вершин, т.е.  $W = W1 \cup W2 \cup W3 \cup W4$ .

При этом  $W1 = \{w_i\}$ ,  $i = 1, \dots, n_1$ , – множество вершин графа, представляющих подразделения организации.  $W2 = \{w_i\}$ ,  $i = n_1 + 1, \dots, n_2$ , – множество вершин графа, представляющих группы управленческих документов в каждом подразделении.  $W3 = \{w_i\}$ ,  $i = n_2 + 1, \dots, n_3$ , – множество вершин графа, представляющих виды документов в каждой группе.  $W4 = \{w_i\}$ ,  $i = n_3 + 1, \dots, n_4$ , – множество вершин графа, представляющих конкретные документы подразделений организации ( $n_4$  – общее количество документов, создаваемых по всем подразделениям за контролируемый период). Естественно,  $n = 1 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4$ . Во множестве  $R$  любая дуга  $r_j = (w_i, w_j) \in W$ .

Граф  $G = (W, R)$  или матрицы, его представляющие, дают полную информацию о количестве документов, создаваемых в подразделении, и объеме групп документов, что и необходимо учесть при планировании процесса.

## 2. Основные расчетные соотношения при применении статистических методов для оценки документов

Способы отбора единиц документов и создание представительной выборки, которая в достаточной мере отражала бы свойства контролируемых партий в целом, можно регулировать требованиями ГОСТа [9]. В соответствии с [10] групповым показателем качества продукции  $q$  является уровень несоответствий в предъявленной для контроля партии документов, который выражается чаще всего в виде процента несоответствующих единиц продукции (неправильно оформленных документов в нашем случае) по формуле

$$q = \frac{\text{Количество несоответствующих документов}}{\text{Количество проверяемых документов}} \cdot 100. \quad (2)$$

В соответствии с [11, 12] при различных методах статистического контроля фактический уровень несоответствия  $g$  сравнивается с нормативным показателем  $g_0$  или  $NQL$  (*normative quality level*), задающим предельно допустимый процент несоответствующих установленным требованиям единиц продукции (у нас – документов).

Данные выборочного контроля используются для принятия решения о качестве контролируемой партии документов. При  $g < NQL$  принимается решение об успешном прохождении процедуры оценки документов отдельным подразделением по конкретному виду документов.

При проведении контроля выборочным методом реализуется известная в теории вероятностей схема оценки вероятности определенного события, а именно – «неправильное оформление документа» – по его частоте в некоторой выборке из генеральной совокупности всех документов определенной группы [13].

В рамках этой генеральной совокупности мы имеем дело с типичной задачей теории вероятностей – оценкой математического ожидания генеральной совокупности по выборке из нее. Обычно наилучшей оценкой математического ожидания этой совокупности является среднее арифметическое выборки из некоторой генеральной совокупности. Это точечная оценка ( $\hat{g}$ ). Можно пользоваться, кроме точечных, еще и интервальными оценками. В качестве последних чаще всего используется так называемый доверительный интервал для математического ожидания генеральной совокупности.

При доверительной вероятности  $\gamma$  границы доверительного интервала  $I_\gamma$  для математического ожидания  $\hat{g}$  при естественных допущениях вычисляются по формуле

$$I_\gamma = [\hat{g} - \Delta, \hat{g} + \Delta], \quad (3)$$

где

$$\hat{g} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (4)$$

$$\Delta = t\sqrt{D} / \sqrt{n}, \quad (5)$$

$$D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \hat{g})^2, \quad (6)$$

здесь  $\hat{g}$  – среднее арифметическое значение, полученное по выборке, представляет собой относительное количество неправильно оформленных документов;  $\Delta$  – статистическая погрешность (вычисляемая величина, совместимая с опытными данными);  $n$  – объем выборки;  $X_i$  – признак, характеризующий правильность оформления  $i$ -го документа выборки ( $X_i = 1$ , если документ неправильно оформлен, и  $X_i = 0$ , если документ оформлен правильно);  $t$  – критерий Стьюдента, зависящий от  $\gamma$ , значения которого имеются в таблицах справочников по математике (например,  $t = 1,96$  при  $\gamma = 0,95$ ) [14].

Вероятностная конструкция доверительного интервала хорошо сочетается с конструкцией уровня существенности (используемой при проверках), т.е. допустимой долей неправильно оформленных документов. Смысл доверительного интервала при достаточно больших доверительных вероятностях ( $\gamma = 0,99$ ,  $\gamma = 0,95$  и т.п.) состоит в том, что он практически всегда накрывает интересующий нас показатель, т.е. среднее арифметическое значение доли неправильно оформленных документов в генеральной совокупности.

Согласно [14] доверительная вероятность должна при этом удовлетворять равенству

$$P(\hat{g} - \Delta < g < \hat{g} + \Delta) = \gamma. \quad (7)$$

Задача будет ставиться так. Есть генеральная совокупность из  $N$  документов, по отношению к каждому из которых событие  $A$  (неправильное оформление) может иметь место, но может и отсутствовать. Обозначим через  $g$  относительную частоту наступления события  $A$  в выборке. Для оценки степени распространенности события  $A$  в генеральной совокупности и уменьшения затрат труда делается выборка из  $n$  документов ( $n$  гораздо меньше, чем  $N$ ). Подсчитывается число документов выборки, для которых событие  $A$  имеет место, и определяется отношение этого числа к  $n$  (т.е.  $g$ ). Далее по величине  $g$  необходимо сделать вывод о том, насколько распространено событие  $A$  во всей генеральной совокупности.

Таким образом, перед нами – типичная для математической статистики задача оценки вероятности наступления некоторого события в генеральной совокупности по его относительной частоте в выборке.

Обозначим порог существенности, т.е. допустимую долю неправильно оформленных документов  $g_0$ , а нижнюю и верхнюю границы доверительного интервала соответственно  $g_n$  и  $g_v$ . Здесь возможны три случая. В первом

из них и  $g_n$ , и  $g_v$  меньше порога существенности (например,  $g_n = 5\%$ ,  $g_v = 8\%$ , а  $g_0 = 10\%$ ). Вывод: нарушения в оформлении всей совокупности документов данного вида несущественны. Во втором случае и  $g_n$ , и  $g_v$  больше порога существенности, что позволяет сделать вывод о существенном количестве неверно оформленных документов данного вида и ставить вопрос о причинах неправильного их оформления. Наконец, самым сложным для принятия решения оказывается третий случай, когда  $g_n$  меньше, а  $g_v$  больше порога существенности. В этом случае считается статистическая погрешность  $\Delta = |g - g_0|$  и по формуле (5) вычисляется новый объем выборки  $n$ . Заметим, что путь увеличения  $n$  сравнительно легко реализуем, так как отобрать еще несколько документов или десятков документов достаточно просто.

Рассмотрим теперь частный, но важный при проведении проверки случай, когда  $g = 0$ . Например, проверяющий случайным образом отобрал  $n$  документов, и все они оказались оформлены правильно. Здесь возникает вопрос, остановиться или увеличить выборку. Тот же вопрос может иметь другую формулировку, нацеленную на планирование проверки: какое число документов отбирать, чтобы в случае их правильного оформления дальнейший отбор не производить.

Согласно соотношениям (3)–(6) при отсутствии ошибок в выборке из  $n$  документов, т.е. при всех  $X_i = 0$ ,  $g = D = \Delta = 0$ , доверительный интервал стягивается в точку. Этот случай рассматривается в общем виде в теории вероятностей и доведен там до достаточно простых расчетных соотношений. Например, минимальный объем выборки может определяться по формуле

$$n_{\min} = \lg(1 - \gamma) / \lg(1 - g_0). \quad (8)$$

В табл. 1 представлены для удобства предельные значения минимальных объемов выборок в случае отсутствия отрицательных результатов при различных доверительных вероятностях  $\gamma$  и порогах существенности  $g_0$ , вычисленных по формуле (8).

Таблица 1  
Данные для определения минимального объема выборки

$\gamma$	$g_0$				
	0,01	0,05	0,10	0,15	0,20
0,99	400	91	44	29	21
0,95	260	59	28	19	14

Приведенные в табл. 1 значения  $n_{\min}$  удобно использовать при планировании проверки как начальные величины размера выборки на первом этапе.

Например, если выбраны порог существенности  $g_0 = 0,1$  и доверительная вероятность  $\gamma = 0,95$ , то согласно табл. 1 целесообразно запланировать объем выборки  $n_{\min} = 28$  элементов. Если после обработки выборки окажется, что событие  $A$  ни разу не зафиксировано (все документы оформлены пра-

вильно), то работа по данной генеральной совокупности заканчивается с положительным итогом проверки. Если же хотя бы один раз событие  $A$  в выборке имело место, то необходимо переходить к ранее описанной общей процедуре.

При проведении анализа порядка документирования необходимо управленческие документы разбить на традиционные группы: организационные, распорядительные, информационно-справочные, а каждую группу – на отдельные виды. Для каждой группы важно установить свой порог существенности.

Обработку данных легко осуществить с помощью приложения *Microsoft Excel*, используя статистический пакет.

Таким образом, используя выборочный метод, можно провести в организации анализ порядка документирования.

### 3. Алгоритм проведения анализа порядка документирования

Алгоритм проведения анализа порядка документирования будет складываться из следующих шагов:

1) определить, к какой группе организаций относится исследуемая организация: орган власти; государственное учреждение; коммерческая структура, другое. Если к последней, то определить направление (сферу) деятельности и форму собственности;

2) определить и внимательно изучить нормативные акты федерального уровня, определяющие порядок ведения делопроизводства и создания СУД в таких организациях: данной группы, с данной формой собственности и данного направления деятельности;

3) выявить локальные нормативные акты в самой проверяемой организации, которые регламентируют порядок оформления управленческих документов в организации;

4) если локальные акты есть, то необходимо оценить их соответствие действующей нормативной базе, если их нет, то переходим к п. 5;

5) выявить виды документов по каждой группе управленческой документации, а именно: какие виды организационных, распорядительных и информационно-справочных документов сопровождают деятельность каждого подразделения организации, построить граф  $G = (W, R)$ ;

6) разработать план проведения анализа порядка документирования, определить, какие подразделения и в каком порядке проверять (пути по графу  $G = (W, R)$ );

7) в соответствии с разработанным планом проверки в каждом выбранном подразделении:

- анализ начинать с группы организационных документов, для них должен быть установлен самый высокий порог существенности  $g_0 = 0,01$  и максимальное значение доверительной вероятности  $\gamma = 0,99$ . На их основе выбирается минимальный объем выборки организационных документов каждого вида для проверки;

- в распорядительных документах главное внимание уделить структуре текста, так как от указания сроков выполнения поручений зависит исполнительская дисциплина;

• среди информационно-справочных документов выявить внутренние нерегистрируемые, проверить, не теряются ли документы;

8) сравнить полученный уровень несоответствий  $g$  с  $g_0$ , сделать выводы;

9) по итогам проверки подготовить отчет и ознакомить с ним руководителя организации и подразделений.

### **Заключение**

Таким образом, использование статистических методов оценки документов при проведении анализа порядка документирования позволяет вместо всей совокупности конкретной группы документов рассматривать лишь часть из них, сократив время проверки и количество проверяющих. Предложенный подход позволил разработать алгоритм проведения анализа порядка документирования.

Для управления качеством выпускаемой продукции по предложенному алгоритму анализ порядка документирования должны периодически проводить специалисты организации, имеющие специальную подготовку. По его итогам необходимо составлять план действий, корректирующих и предупреждающих дальнейшие ошибки.

### **Список литературы**

1. Федеральный закон «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ.
2. **Епишин, И. Г.** Анализ рисков жизненного цикла технологического оборудования для опасных производственных объектов при разработке рабочей конструкторской документации / И. Г. Епишин, А. Ю. Репин, Л. Р. Фионова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 3 (27). – С. 176–188.
3. **Фионова, Л. Р.** Факторы, влияющие на структуру документооборота / Л. Р. Фионова // Делопроизводство. – 2012. – № 2. – С. 51–55.
4. **Фионова, Л. Р.** Использование информационных технологий в делопроизводстве районной администрации / Л. Р. Фионова // Делопроизводство. – 2012. – № 1. – С. 75–84.
5. ГОСТ Р 7.0.8–2013. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Делопроизводство и архивное дело. Термины и определения [введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17.10.2013 № 1185-ст.]. – М., 2013.
6. ГОСТ Р 6.30–2003. Унифицированные системы документации. Унифицированная система организационно-распорядительной документации. Требования к оформлению документов [Постановление Госстандарта России от 03.03.2003 № 65-ст.]. – М., 2003.
7. Методические рекомендации по разработке инструкций по делопроизводству в федеральных органах исполнительной власти, утв. Приказом Росархива от 23.12.2009 № 76.
8. **Фионова, Л. Р.** Разработка алгоритма проведения документного аудита / Л. Р. Фионова // Делопроизводство. – 2013. – № 1. – С. 22–26.
9. ГОСТ 18321–73. Статистический контроль качества. Методы случайного отбора выборок штучной продукции. – М., 1973.
10. ГОСТ Р 50779.30–95. Статистические методы. Приемочный контроль качества. Общие требования. – М., 1995.

11. ГОСТ Р 50779.50–95. Статистические методы. Контроль по количественному признаку. Общие требования. – М., 1995.
12. ГОСТ Р ИСО 2859-1–2007. Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Планы выборочного контроля последовательных партий на основе приемлемого уровня качества. – М., 2007.
13. **Фионова, Л. Р.** Проведение аудита документов / Л. Р. Фионова, Ю. А. Тимофеев // Современные технологии документооборота в бизнесе, производстве и управлении : сб. ст. IX Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Поволжский дом знаний, 2009. – С. 23–27.
14. **Гмурман, В. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – Изд. 7-е, стер. – М. : Высшая школа, 2000. – 479 с.

### References

1. *Federal'nyy zakon «Ob informatsii, informatsionnykh tekhnologiyakh i o zashchite informatsii» ot 27 iyulya 2006 g. № 149-FZ* [The Federal law “On information, information technologies and information protection” from 27<sup>th</sup> July 2006 №149-FZ].
2. Epishin I. G., Repin A. Yu., Fionova L. R. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2013, no. 3 (27), pp. 176–188.
3. Fionova L. R. *Deloproizvodstvo* [Workflow management]. 2012, no. 2, pp. 51–55.
4. Fionova L. R. *Deloproizvodstvo* [Workflow management]. 2012, no. 1, pp. 75–84.
5. *GOST R 7.0.8–2013. Sistema standartov po informatsii, bibliotechnomu i izdatel'skomu delu. Deloproizvodstvo i arkhivnoe delo. Terminy i opredeleniya [vveden v deystvie prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 17.10.2013 № 1185-st.]* [State Standard R 7.0.8-2013. The system of standards of information, librarianship and publishing. Workflow and archives management. Terms and definitions (brought into effect by the order of the Federal Agency on Technical Regulating and Metrology from 17.10.2013 №1185-st)]. Moscow, 2013.
6. *GOST R 6.30–2003. Unifitsirovannyye sistemy dokumentatsii. Unifitsirovan-naya sistema organizatsionno-rasporyaditel'noy dokumentatsii. Trebovaniya k oformleniyu dokumentov [Postanovlenie Gosstandarta Rossii ot 03.03.2003 № 65-st.]* [State Standard R 6.30-2003. Unified systems of documentation. Unified system of organizational-executive documentation. Document format requirements (The decree of the Federal Agency on Technical Regulating and Metrology of Russia from 03.03.2003 №65st)]. Moscow, 2003.
7. *Metodicheskie rekomendatsii po razrabotke instruktsiy po deloproizvodstvu v federal'nykh organakh ispolnitel'noy vlasti, utv. Prikazom Rosarkhiva ot 23.12.2009 № 76* [Methodological recommendations on development of instructions on workflow management at federal executive bodies, approved by the order of the Federal Archival Agency from 23.12.2009 №76].
8. Fionova L. R. *Deloproizvodstvo* [Workflow management]. 2013, no. 1, pp. 22–26.
9. *GOST 18321–73. Statisticheskyy kontrol' kachestva. Metody sluchaynogo ot-bora vyborok shtuchnoy produktsii* [State Standard 18321-73. Statistical quality control. Methods of random sampling custom-made products]. Moscow, 1973.
10. *GOST R 50779.30–95. Statisticheskie metody. Priemochnyy kontrol' kachestva. Obshchie trebovaniya* [State Standard R 50779.30-95. Statistical methods. Acceptance quality control. General requirements]. Moscow, 1995.
11. *GOST R 50779.50–95. Statisticheskie metody. Kontrol' po kolichestvennomu priznaku. Obshchie trebovaniya* [State Standard R 50779.50-95. Statistical methods. Testing by variables. General requirements]. Moscow, 1995.
12. *GOST R ISO 2859-1–2007. Statisticheskie metody. Protsedury vyborochnogo kontrolya po al'ternativnomu priznaku. Plany vyborochnogo kontrolya posledovatel'nykh partiy*

*na osnove priemlemogo urovnya kachestva* [State Standard R ISO 2859-1-2007. Statistical methods. Sampling by alternatives]. Moscow, 2007.

13. Fionova L. R., Timofeev Yu. A. *Sovremennye tekhnologii dokumentooborota v biznese, proizvodstve i upravlenii: sb. st. IX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modern technologies of documentation in business, production and management: proceedings of IX International scientific and practical conference]. Penza: Povolzhskiy dom znaniy, 2009, pp. 23–27.
14. Gmurman V. E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: ucheb. posobie dlya vuzov* [Probability theory and mathematical statistics: tutorial for universities]. 7<sup>th</sup> ed., ster. Moscow: Vysshaya shkola, 2000, 479 p.

---

***Фионова Людмила Римовна***

доктор технических наук, профессор,  
декан факультета вычислительной  
техники, Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: lrfionova@mail.ru

***Fionova Lyudmila Rimovna***

Doctor of engineering sciences, professor,  
dean of the faculty of computer  
engineering, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

***Коровина Людмила Владимировна***

аспирант, Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: zabrodina\_lyusj@mail.ru

***Korovina Lyudmila Vladimirovna***

Postgraduate student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

УДК 004.91

**Фионова, Л. Р.**

**Использование статистических методов оценки документов для управления качеством продукции / Л. Р. Фионова, Л. В. Коровина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 72–82. DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-6**

# ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

---

УДК 621.391:621.396.96  
DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-7

*Д. И. Попов*

## АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Объектом исследования являются цифровые системы обработки сигналов движущихся целей на фоне пассивных помех, осуществляющие когерентное режектирование с последующим некогерентным накоплением остатков режектирования. В качестве режекторного фильтра (РФ) рассматривается рекурсивный фильтр, в котором для сокращения времени переходного процесса используется перестройка его структуры путем коммутации обратных (рекурсивных) связей. Предметом исследования являются характеристики обнаружения цифровых систем обработки сигналов на основе рекурсивных РФ перестраиваемой и фиксированной структуры. Цель работы – сопоставление эффективности цифровых систем обработки сигналов в переходном и установившемся режимах при перестраиваемой и фиксированной структурах рекурсивного РФ.

*Материалы и методы.* Исследования характеристик обнаружения в переходном и установившемся режимах выполнены на основе статистических методов анализа с использованием метода характеристических функций.

*Результаты.* Получены выражения для элементов корреляционных матриц на выходе РФ перестраиваемой структуры в переходном режиме и на выходе РФ фиксированной структуры в установившемся режиме. Корреляционные матрицы на выходе РФ являются исходными при последующем анализе характеристик обнаружения цифровых систем обработки сигналов.

*Выводы.* Проведенный анализ характеристик обнаружения цифровых систем обработки сигналов в переходном и установившемся режимах показал, что переходные процессы в рекурсивных РФ фиксированной структуры существенно снижают эффективность системы, а перестройка структуры РФ позволяет избежать соответствующих потерь, приблизившись к эффективности системы в установившемся режиме.

**Ключевые слова:** переходный режим, сигналы, системы обработки, рекурсивные режекторные фильтры, пассивные помехи, характеристики обнаружения.

*D. I. Popov*

## ANALYSIS OF DIGITAL SIGNAL PROCESSING SYSTEMS

### **Abstract.**

*Background.* The object of the research is digital signal processing systems of moving targets at the background clutter, performing coherent rejection followed by

non-coherent accumulation rejection residues. As the rejecter filter (RF) the researcher took a recursive filter in which changes in its structure by switching the inverse (recursive) bonds were used to reduce the transient time. The subject of the research is detection characteristics of digital signal processing systems based on recursive RF tunable and fixed structures. The objective of the study is to compare the effectiveness of digital signal processing systems in the transient and steady-state modes with tunable and fixed structures of recursive RF.

*Materials and methods.* The research of detection characteristics of in transient and steady modes was based on statistical methods of analysis using the method of characteristic functions.

*Results.* Expressions for the elements of the correlation matrix were obtained on the output of the tunable structure RF in transition mode and on the output of the fixed structure RF in the steady state. The correlation matrix on the RF output were the starting point of the subsequent analysis of detection characteristics of digital signal processing systems.

*Conclusions.* The analysis of detection characteristics of digital signal processing systems in the transient and steady-state modes showed that the transients in fixed RF of recursive structure significantly reduce the efficiency of the system and the restructuring of the RF structure avoids the associated losses, approaching the efficiency of the system in steady state.

**Key words:** transient, signals, processing system, recursive rejector filters, clutter, detection characteristics.

### **Введение**

При проектировании радиолокационных систем одной из актуальных и трудных неизменно остается проблема обработки и выделения сигналов движущихся целей на фоне пассивных помех. Пассивные помехи в виде мешающих отражений от неподвижных или медленно перемещающихся объектов: местных предметов, поверхности суши, моря, гидрометеоров (облаков, дождя, града, снега) и металлизированных отражателей, сбрасываемых для маскировки цели, – существенно нарушают нормальную работу радиолокационных систем различного назначения [1]. Основной операцией обработки принятых данных при обнаружении сигналов движущихся целей на фоне пассивных помех является режектирование спектральных составляющих помехи. Среди нерекursивных и рекурсивных режекторных фильтров (РФ) известными преимуществами в установившемся режиме обладают рекурсивные РФ, открывающие широкие возможности формирования требуемых характеристик и гибкого их управления [1]. Применение цифровых рекурсивных фильтров позволяет получить существенные выигрыши в эффективности режектирования пассивных помех по сравнению с нерекursивными фильтрами того же порядка [2]. Однако обратные (рекурсивные) связи увеличивают время переходного процесса фильтра, что приводит к образованию протяженной кромки нескомпенсированных остатков помехи, маскирующих сигнал от цели. Представляет интерес сокращение длительности переходных процессов в рекурсивных фильтрах и сравнительный анализ характеристик обнаружения соответствующих систем обработки сигналов на фоне пассивных помех в переходном и установившемся режимах.

### **1. Система обработки сигналов**

Рассмотрим межпериодную обработку последовательности поступающих через период повторения  $T$  в одном элементе разрешения по дальности

$N$  цифровых отсчетов  $U_j = x_j + i y_j$ ,  $j = \overline{1, N}$ , комплексной огибающей аддитивной смеси сигнала и помехи. После квантования в аналого-цифровых преобразователях (АЦП) квадратурных проекций  $x_j$  и  $y_j$  имеем  $\tilde{U}_j = \tilde{x}_j + i \tilde{y}_j = U_j + \xi_j$ , где величины  $\xi_j = \xi_{1j} + i \xi_{2j}$  отображают дискретный шум квантования. Цифровые отсчеты  $\tilde{U}_j$  поступают на вход рекурсивного РФ, в котором для сокращения времени переходного процесса используется перестройка его структуры путем коммутации обратных связей (ОС). Структурная схема такого РФ, реализованного на основе одной из канонических схем  $m$ -го порядка, приведена на рис. 1, где  $a_k, b_k$  – весовые коэффициенты РФ,  $ЗУ_T$  – запоминающее на период повторения  $T$  устройство. Все операции в РФ для каждой квадратурной проекции ( $\tilde{x}_j, \tilde{y}_j$ ) осуществляются отдельно. Перестройка структуры РФ осуществляется с помощью коммутатора (К), замыкаемого по команде блока управления (БУ) после достижения в нерекурсивной части РФ установившегося режима, соответствующего поступлению  $m+1$  отсчетов. На выход РФ и в обратные связи теперь поступают уже частично скомпенсированные отсчеты помехи, что существенно уменьшает «звон» в ОС, вызываемый краем помехи, и ускоряет переходный процесс.

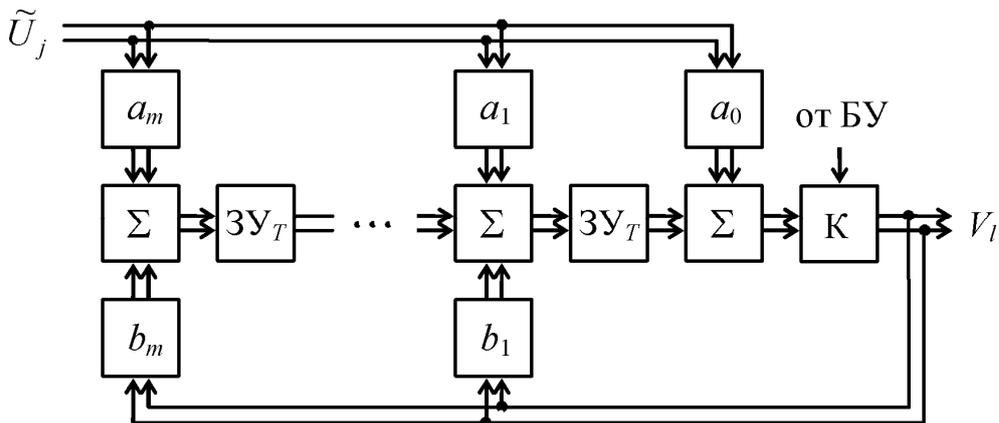


Рис. 1. Рекурсивный режекторный фильтр перестраиваемой структуры

Системная функция нерекурсивной части РФ в  $z$ -плоскости имеет вид

$$H_H(z) = \sum_{k=0}^m a_k z^{-k},$$

а коэффициенты импульсной характеристики задаются весовыми коэффициентами  $a_k$ .

Для рекурсивной части РФ имеем

$$H_P(z) = \left( 1 - \sum_{k=1}^m b_k z^{-k} \right)^{-1} = \sum_{k=0}^{\infty} g_k z^{-k},$$

где коэффициенты импульсной характеристики  $g_0 = 1$ ,  $g_k = \sum_{j=1}^k b_j g_{k-j}$ ,

а при  $k > m$   $g_k = \sum_{j=1}^m b_j g_{k-j}$ .

РФ фиксированной структуры (без коммутации ОС) описывается системной функцией

$$H(z) = H_n(z)H_p(z) = \sum_{k=0}^{\infty} h_k z^{-k}$$

и коэффициентами импульсной характеристики  $h_k$ , определяемыми из соотношений:

$h_0 = a_0$ ,  $h_k = a_k + \sum_{j=1}^k b_j h_{k-j}$ , а при  $k > m$   $h_k = \sum_{j=1}^m b_j h_{k-j}$ .

Коэффициенты  $a_k$ ,  $g_k$  и  $h_k$  позволяют анализировать цифровые системы обработки сигналов на основе РФ перестраиваемой и фиксированной структуры в переходном и установившемся режимах.

Коммутацию ОС в рекурсивном РФ наиболее просто осуществить при известном начале обрабатываемой последовательности, т.е. при дискретном сканировании антенного луча. Структурная схема соответствующей цифровой системы обработки сигналов, осуществляющей некогерентное накопление остатков когерентного режектирования, приведена на рис. 2 и содержит: рекурсивный РФ; блок объединения (БО), вычисляющий сумму квадратов проекций; блок управления (БУ), межпериодный накопитель (Н), состоящий из сумматора ( $\Sigma$ ), запоминающего на период повторения  $T$  устройства ( $ЗУ_T$ ) и коммутатора (К), и пороговое устройство (ПУ). Накопление осуществляется с помощью коммутируемой задержанной ОС. БУ коммутирует ОС в РФ в соответствии с рис. 1 и выход накопителя Н после перемещения антенного луча в новое положение. По результатам сравнения накопленных величин с пороговым уровнем обнаружения  $v_0$  выносится решение об обнаружении сигнала от цели.

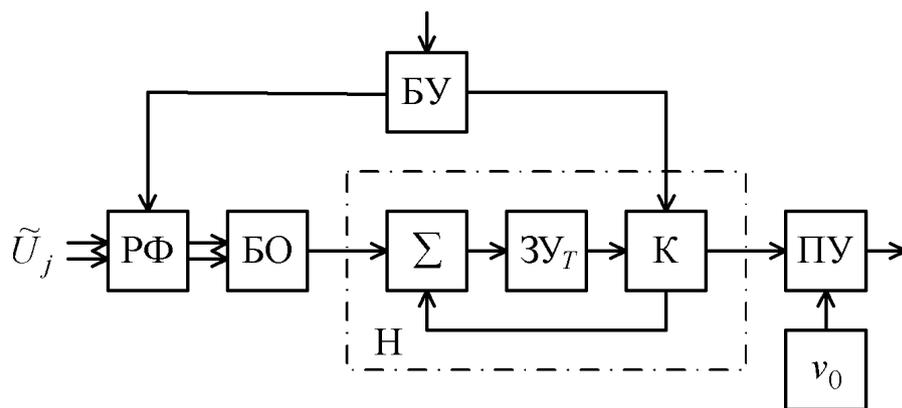


Рис. 2. Структурная схема системы обработки сигналов

Заметим, что использование коммутируемой задержанной ОС позволяет без перестройки структуры накапливать произвольное число отсчетов. Это оказывается удобным в случае применения критерия последовательного наблюдателя. При этом ПУ следует подключить к выходу сумматора и по результатам сравнения накопленных величин с пороговым уровнем обнаружения осуществлять управление антенным лучом и коммутатором, разрывающим после перемещения антенного луча цепь ОС накопителя, очищая при этом запоминающее устройство ЗУ<sub>Г</sub>.

## 2. Корреляционные матрицы на выходе РФ

При гауссовском распределении сигнала и помехи с нулевыми средними значениями статистические свойства исходного вектора  $\mathbf{U} = \{U_j\}^T$  описываются корреляционной матрицей  $\mathbf{R}$ , элементы которой

$$R_{jk} = \frac{1}{2\sigma_{\Pi}^2} \overline{U_j U_k^*} = \begin{cases} R_{jk}^{c\Pi} = q\rho_{jk}^c e^{i(j-k)\varphi} + \rho_{jk}^{\Pi} + \lambda\delta_{jk}, \\ R_{jk}^{\Pi} = \rho_{jk}^{\Pi} + \lambda\delta_{jk}, \end{cases}$$

где  $q = \sigma_c^2 / \sigma_{\Pi}^2$  – отношение сигнал/помеха;  $\rho_{jk}$  – коэффициенты межпериодной корреляции сигнала ( $\rho_{jk}^c$ ) или помехи ( $\rho_{jk}^{\Pi}$ );  $\varphi$  – доплеровский сдвиг фазы сигнала за период повторения  $T$ ;  $\lambda = \sigma_{\text{ш}}^2 / \sigma_{\Pi}^2$  – отношение собственных шум/помеха;  $\delta_{jk}$  – символ Кронекера.

Для дальнейшего анализа необходимо найти элементы корреляционных матриц  $\mathbf{B} = \|B_{jk}\|$  на выходе РФ. При этом в качестве исходных используются элементы матриц помехи  $\mathbf{R}_{\Pi} = \|R_{jk}^{\Pi}\|$  и суммы сигнала и помехи  $\mathbf{R}_{c\Pi} = \|R_{jk}^{c\Pi}\|$ . Кроме того, следует учитывать ошибки квантования по уровню, возникающие помимо аналого-цифрового преобразования также при округлении промежуточных результатов умножения в РФ. Оба типа ошибок имеют случайный характер и учитываются введением дискретных шумов квантования и округления, некоррелированных между периодами и с квантуемым процессом. Все источники шумов квантования и округления являются независимыми и образуют на своих выходах дискретный белый шум с дисперсиями  $\sigma_{\text{кв}}^2 = \delta_1^2 / 12$  и  $\sigma_{\text{ок}}^2 = \delta_2^2 / 12$ , где  $\delta_{1,2} = d\sigma_{\Pi} / (2^{v_{1,2}} - 1)$  – шаг квантования соответственно АЦП и РФ;  $d$  – динамический диапазон АЦП;  $v_{1,2}$  – число разрядов, включая знаковый, соответственно АЦП и РФ. Кроме того, в АЦП возникает шум насыщения, обусловленный выходом квантуемого процесса за пределы линейного участка АЦП. При оптимальном выборе величины  $d$  в зависимости от числа разрядов АЦП шум насыщения оказывается в несколько раз меньше шума квантования и поэтому при анализе может не учитываться.

Шум квантования АЦП всегда приложен к входу РФ, а направление приложения шумов округления зависит от схемы реализации РФ. В нерекурсивной части РФ перестраиваемой структуры (см. рис. 1) все шумы округле-

ния приложены к входу коммутатора К, образуя в установившемся режиме дискретный белый шум с дисперсией  $m_1\sigma_{\text{ок}}^2$ , где  $m_1$  – число дробных коэффициентов  $a_k$ , причем  $m_1 \leq m + 1$ . Шумы округления, возникающие в цепях ОС, приложены также к выходу нерекурсивной части РФ, образуя дискретный белый шум, дисперсия которого за  $m$  периодов после коммутации ОС достигает установившегося значения  $m_2\sigma_{\text{ок}}^2$ , где  $m_2$  – число дробных коэффициентов  $b_k$ , причем  $m_2 \leq m$ . Учитывая, что обычно  $m \ll N$  переходным процессом установления дисперсии можно пренебречь, а дисперсию результирующего шума округления на входе коммутатора принять равной  $(m_1 + m_2)\sigma_{\text{ок}}^2$ .

Для описания линейных операций обработки, осуществляемых в РФ перестраиваемой структуры (см. рис. 1), введем матрицы режекции. Обработка в нерекурсивной части РФ описывается квадратной матрицей режекции верхней треугольной формы:  $\|G_{jk}^{(1)}\| = \|a_{k-j}\|$ , где  $a_{k-j} = 0$  при  $k < j$ . Обработка в рекурсивной части РФ с учетом коммутации ОС в переходном режиме описывается матрицей режекции  $\|G_{jk}^{(2)}\|$ , элементы которой  $G_{jk}^{(2)} = g_{k-j}$  при  $j, k > m$  и с учетом коммутации  $G_{jk}^{(2)} = 0$  при  $j, k \leq m$ , причем  $g_{k-j} = 0$  при  $k < j$ . Представляя РФ перестраиваемой структуры в виде каскадного соединения нерекурсивной и рекурсивной частей, для его выходных величин найдем

$$V_j = \sum_{l=1}^N G_{jl}^{(2)} \sum_{r=1}^N G_{lr}^{(1)} \tilde{U}_r.$$

Передача шумов округления на выход РФ в переходном режиме также описывается матрицей  $\|G_{jk}^{(2)}\|$ . Тогда в предположении нормализации результирующих шумов на выходе РФ для элементов корреляционной матрицы  $\mathbf{B} = \|B_{jk}\|$  порядка  $(N - m) \times (N - m)$  в переходном режиме получим

$$B_{jk} = \frac{1}{2\sigma_{\text{п}}^2} \overline{V_j V_k^*} = \sum_{l,p=1}^N G_{jl}^{(2)} G_{kp}^{(2)} \sum_{r,s=1}^N G_{lr}^{(1)} G_{ps}^{(1)} [(R_{rs} + q_{\text{кв}}\delta_{rs}) + (m_1 + m_2)q_{\text{ок}}\delta_{lp}],$$

где  $q_{\text{кв}} = \sigma_{\text{кв}}^2 / \sigma_{\text{п}}^2$ ,  $q_{\text{ок}} = \sigma_{\text{ок}}^2 / \sigma_{\text{п}}^2$  – нормированные к помехе соответственно шум квантования и шум округления.

Переходный режим является основным режимом работы систем обработки на основе рекурсивных РФ. Однако предельная эффективность данных систем достигается в установившемся режиме, имеющем место при непрерывном сканировании антенного луча в случае протяженной помехи, предшествующей поступлению сигнала. Для элементов корреляционной матрицы  $\mathbf{B} = \|B_{jk}\|$  на выходе РФ фиксированной структуры (без коммутации ОС) в установившемся режиме можно найти:

$$B_{jk} = \sum_{l,p=0}^{M-1} h_l h_p (R_{j-l,k-p} + q_{\text{КВ}} \delta_{j-l,k-p}) + (m_1 + m_2) q_{\text{ОК}} \sum_{l=0}^{M-1} g_l g_{l+|j-k|},$$

где  $M$  – число отсчетов, при котором переходный процесс на выходе РФ для остатков протяженной помехи достигает установившегося состояния [2]. При этом из-за ограниченности выборки сигнала  $R_{j-l,k-p}^c = 0$  при  $j-l \leq 0$  или  $k-p \leq 0$ .

Обработка в РФ фиксированной структуры в переходном режиме описывается матрицей режекции  $\|H_{jk}\| = \|h_{k-j}\|$ , где  $h_{k-j} = 0$  при  $k < j$ . В этом случае элементы переходной корреляционной матрицы имеют вид

$$B_{jk} = \sum_{l,p=1}^N H_{jl} H_{kp} (R_{lp} + q_{\text{КВ}} \delta_{lp}) + (m_1 + m_2) q_{\text{ОК}} \sum_{l=0}^{N-1} g_l g_{l+|j-k|}.$$

### 3. Анализ характеристик обнаружения

С учетом перестройки структуры РФ алгоритм обработки в рассматриваемой цифровой системе обнаружения (рис. 2) имеет вид

$$v = \sum_{l=m+1}^N |V_l|^2 = \sum_{l=m+1}^N \left| \sum_{k=m+1}^l g_{l-k} \sum_{j=0}^m a_j \tilde{U}_{k-j} \right|^2 = \mathbf{V}^{*\text{T}} \mathbf{V} \geq v_0, \quad (1)$$

где  $\mathbf{V} = \{V_l\}^T$  –  $(N-m)$ -мерный вектор-столбец выходных отсчетов РФ.

Обнаружение сигнала от цели по критерию Неймана – Пирсона осуществляется путем сравнения статистики  $v$  с пороговым уровнем  $v_0$ , выбираемым по заданной вероятности ложной тревоги. Для расчета характеристик обнаружения необходимо найти распределение величины  $v$ . Используем универсальную методику анализа на основе метода характеристических функций [3]. Характеристическая функция величины  $v$  определяется следующим образом:

$$\Theta_v(it) = \overline{\exp(itv)} = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} P(\mathbf{V}) \exp(itv) d\mathbf{V},$$

где  $P(\mathbf{V}) = (2\pi)^{-(N-m)} (\det \mathbf{W}) \exp\left(-\frac{1}{2} \mathbf{V}^{*\text{T}} \mathbf{W} \mathbf{V}\right)$  – совместная плотность вероятности вектора  $\mathbf{V}$ ;  $\mathbf{W}$  – матрица, обратная матрице  $\mathbf{B}$ ;  $d\mathbf{V} = dV_1 dV_2 \dots dV_{N-m}$ .

Используя плотность вероятности  $P(\mathbf{V})$  и величину  $v$  из алгоритма (1), находим

$$\Theta_v(it) = (2\pi)^{-(N-m)} \det \mathbf{W} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{1}{2} \mathbf{V}^{*\text{T}} (\mathbf{W} - 2it\mathbf{I}) \mathbf{V}\right] d\mathbf{V},$$

где  $\mathbf{I}$  – единичная матрица.

Учитывая [3, т. 1], что

$$\int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2} \mathbf{V}^{*T} \mathbf{Q} \mathbf{V}\right) d\mathbf{V} = (2\pi)^{N-m} / \det \mathbf{Q}, \quad \det \mathbf{W} = (\det \mathbf{B})^{-1} \quad \text{и} \quad \mathbf{B} \mathbf{W} = \mathbf{I},$$

окончательно получаем

$$\Theta_v(it) = \det \mathbf{W} [\det(\mathbf{W} - 2it\mathbf{I})]^{-1} = [\det(\mathbf{I} - 2it\mathbf{B})]^{-1}.$$

Искомая плотность вероятности теперь определяется при помощи преобразования Фурье

$$p(v) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_v(it) \exp(-itv) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-itv)}{\det(\mathbf{I} - 2it\mathbf{B})} dt, \quad (2)$$

вычисление которого предполагает приведение определителя  $\det(\mathbf{I} - 2it\mathbf{B})$  в подынтегральном выражении к необходимому для интегрирования виду. С этой целью используем метод собственных значений [3, т. 2], позволяющий представить характеристическую функцию в виде

$$\Theta_v(it) = \prod_{j=1}^{N-m} (1 - 2it\alpha_j)^{-1}, \quad (3)$$

где  $\alpha_j$  – собственные значения матрицы  $\mathbf{B}$ .

Интегрированием в соотношении (2) с использованием метода вычетов и с учетом выражения (3) находится плотность вероятности  $p(v)$ , по которой определяется искомая вероятность превышения порогового уровня  $v_0$  статистикой  $v$ :

$$P(v \geq v_0) = \int_{v_0}^{\infty} p(v) dv = \sum_{j=1}^L \exp\left(-\frac{v_0}{\alpha_j}\right) \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{N-m} \left(1 - \frac{\alpha_k}{\alpha_j}\right)^{-1}, \quad (4)$$

где  $L$  – число различных положительных собственных значений матрицы  $\mathbf{B}$ .

Использование в выражении (4) собственных значений матрицы помехи  $\mathbf{B}_\Pi$  приводит к вычислению вероятности ложной тревоги  $F$ , а собственных значений матрицы суммы сигнала и помехи  $\mathbf{B}_{\text{СП}}$  – вероятности правильного обнаружения  $D$ .

#### 4. Результаты расчетов

Рассчитаем характеристики обнаружения для цифровой системы обработки сигналов (рис. 2) с рекурсивным РФ чебышевского типа при  $m = 2$  и угловой частоте среза полосы пропускания  $\theta_{\text{ср}} = \omega_{\text{ср}} T = 0,6\pi$ . При этом весовые коэффициенты  $a_k = (-1)^k C_m^k$  ( $a_0 = a_2 = 1$ ,  $a_1 = -2$ ), а округленные коэффициенты  $b_1 = -0,75$ ,  $b_2 = -0,5$ . Тогда  $m_1 = 0$ , а  $m_2 = m = 2$ . Полагаем,

что корреляционная функция сигнала аппроксимируется экспонентой  $\rho_{jk}^c = \exp\{-\pi\beta_c |j - k|\}$ , а помехи – гауссовской кривой

$$\rho_{jk}^n = \exp\{-(\pi^2 / 2,8)[\beta_n(j - k)]^2\},$$

где  $\beta = \Delta f T$  – нормированная ширина спектра на уровне 0,5 от максимума. Величину динамического диапазона АЦП  $d$  выбираем в зависимости от числа разрядов  $v_{1,2} = v$ . В частности, при  $v = 5 \dots 10$  оптимальная величина  $d = 3 \dots 4,5$ , что соответствует минимуму суммарной мощности шумов АЦП и пересчитанного к входу РФ шума округления и позволяет пренебречь шумом насыщения.

На рис. 3 приведены характеристики обнаружения цифровой системы обработки сигналов при  $N = 20$ ,  $\varphi = \pm(2k - 1)\pi$ ,  $\beta_c = 0,015$ ,  $\beta_n = 0,1$ ,  $\lambda < 10^{-4}$  и  $F = 10^{-3}$ . Сплошные кривые соответствуют системе с РФ перестраиваемой структуры, а штриховые кривые – системе с РФ фиксированной структуры, причем кривая 1 соответствует установившемуся режиму РФ, а кривая 2 – переходному режиму. Как видим, накопление сигнала на фоне нестационарных остатков помехи (кривая 2) приводит к существенному (около 20 дБ) проигрышу в пороговом отношении сигнал/помеха. Перестройка структуры РФ позволяет существенно повысить эффективность обнаружения в переходном режиме, уступая предельной эффективности в установившемся режиме (кривая 1) не более 1 дБ.

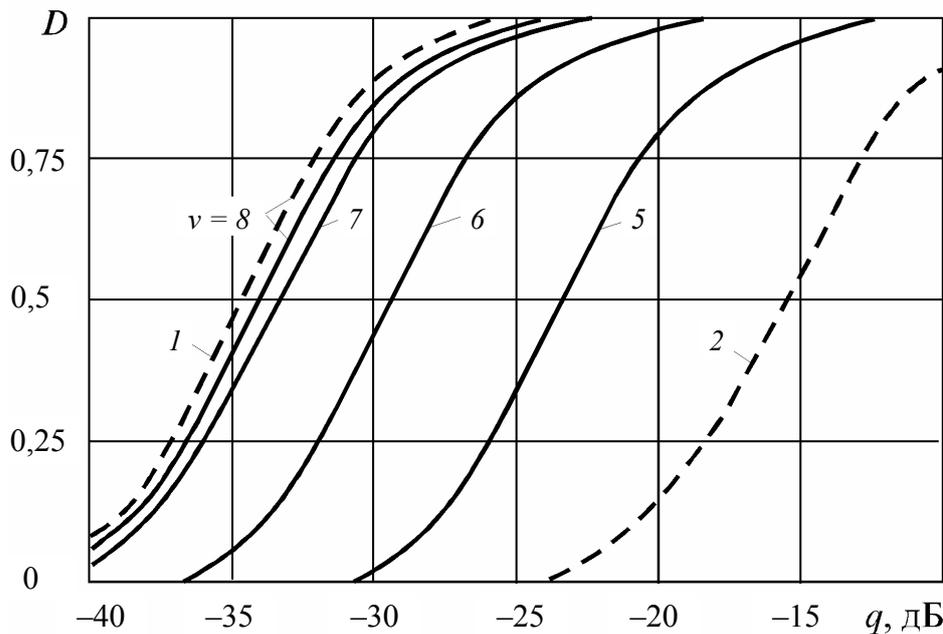


Рис. 3. Характеристики обнаружения цифровой системы обработки сигналов

Из рисунка видно, что разрядность АЦП для данных параметров помехи ( $\beta_n = 0,1$ ) оказывает существенное влияние на эффективность системы

обработки только в случае малоразрядных АЦП ( $v = 5...6$ ). При этом выбор разрядности связан с реализуемой системой эффективностью. В частности, для  $\beta_{\text{п}} = 0,05$  соответствующая эффективность без существенных потерь достигается при разрядности АЦП  $v = 10...11$ .

### **Заключение**

Таким образом, проведенный анализ характеристик обнаружения цифровых систем обработки сигналов в переходном и установившемся режимах показывает, что переходные процессы в рекурсивных РФ фиксированной структуры существенно снижают эффективность системы, а перестройка структуры РФ позволяет избежать соответствующих потерь, приблизившись к эффективности системы в установившемся режиме.

### **Список литературы**

1. Radar Handbook / ed. by M. I. Skolnik. – 3rd ed. – McGraw–Hill, 2008. – 1352 p.
2. **Кузьмин, С. З.** Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С. З. Кузьмин. – Киев : КВиЦ, 2000. – 428 с.
3. **Миддлтон, Д.** Введение в статистическую теорию связи : в 2 т. : пер. с англ. / Д. Миддлтон ; под ред. Б. Р. Левина. – М. : Сов. радио, 1961. – Т. 1. – 782 с. ; 1962. – Т. 2. – 832 с.

### **References**

1. *Radar Handbook*. Ed. by M. I. Skolnik. 3rd ed. McGraw–Hill, 2008, 1352 p.
2. Kuz'min S. Z. *Tsifrovaya radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu* [Digital radiolocation. Introduction into the theory]. Kiev: KViTs, 2000, 428 p.
3. Middleton D. *Vvedenie v statisticheskuyu teoriyu svyazi: v 2 t.: per. s angl.* [Introduction into statistical theory of communication: in 2 volumes: translation from English]. Moscow: Sov. radio, 1961, vol. 1, 782 p.; 1962, vol. 2, 832 p.

---

#### **Попов Дмитрий Иванович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра радиотехнических систем,  
Рязанский государственный  
радиотехнический университет  
(Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1)

#### **Popov Dmitriy Ivanovich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of radio engineering  
systemes, Ryazan State Radio Engineering  
University (59/1 Gagarina street, Ryazan,  
Russia)

E-mail: adop@mail.ru

---

УДК 621.391:621.396.96

**Попов, Д. И.**

**Анализ цифровых систем обработки сигналов / Д. И. Попов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 83–92. DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-7**

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ ПЛЕНОК SnO<sub>2</sub> КОНВЕРТНЫМ МЕТОДОМ

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Прозрачные проводящие покрытия на основе тонких пленок оксидов металлов широко используются в различных оптоэлектронных приборах и устройствах. Толщина пленок играет важную роль в формировании их электрических и оптических свойств, поэтому при получении требуется постоянно измерять этот параметр. Однако проводить измерения толщины тонких прозрачных пленок традиционными методами затруднительно вследствие определенных ограничений. Решить данную задачу позволяет конвертный метод, заключающийся в анализе распределения интерференционных экстремумов в спектрах пропускания тонких пленок. Целью работы является определение толщины пленок диоксида олова конвертным методом, его точности и условий применения.

*Материалы и методы.* Тонкие пленки диоксида олова получены методом спрей-пиролиза на стеклянных и кремниевых подложках. Измерены спектры пропускания пленок в области длин волн  $\lambda = (320-1000)$  нм. В работе представлена методика определения толщины прозрачных пленок конвертным методом. Толщина также измерена с помощью эллипсометрии и электронной микроскопии. Проведен сравнительный анализ полученных результатов.

*Результаты.* Сравнительный анализ продемонстрировал, что точность конвертного метода снижается с уменьшением толщины пленки. В результате проведенной работы выявлены недостатки конвертного метода и условия его применения.

*Выводы.* Конвертный метод следует применять только к спектрам пропускания, демонстрирующим интерференционные полосы, при условии слабого поглощения электромагнитного излучения тонкой пленкой и полностью прозрачной подложки.

**Ключевые слова:** прозрачные пленки, спрей-пиролиз, толщина, конвертный метод, спектры пропускания, интерференционные экстремумы, конвертные кривые, интерполяция.

V. I. Kondrashin

## DETERMINATION OF SnO<sub>2</sub> THIN OPTICALLY TRANSPARENT FILMS' THICKNESS BY THE ENVELOPE METHOD

### Abstract.

*Background.* Transparent conductive coatings based on thin films of metal oxides are widely used in various optoelectronic devices. Films' thickness plays an important role in formation of their electrical and optical properties, therefore this parameter must be measured constantly. However, measuring thickness of thin transparent films using traditional methods is difficult to complete due to certain restrictions. This problem is solved by the envelope method, which consists in analysis of interference extremes distribution in transmission spectra of thin films. The purpose of the work is to determine thickness of tin dioxide films by the envelope method, its accuracy and application conditions.

*Materials and methods.* Tin dioxide thin films were obtained by spray pyrolysis on glass and silicon substrates. The transmission spectra of films were measured in the wavelength  $\lambda = (320-1000)$  nm. The paper presents a technique for determining transparent films thickness by the envelope method. The thickness was also measured using electron microscopy and ellipsometry. The comparative analysis of obtained results was performed.

*Results.* The comparative analysis has shown that the accuracy of the envelope method reduces with a decreasing film thickness. Disadvantages of the envelope method and conditions of its application are revealed as a result of this work.

*Conclusions.* The envelope method should be applied only to transmission spectra, demonstrating the interference fringes, provided that a thin film has weak-absorption of electromagnetic radiation and a substrate is fully transparent.

**Key words:** transparent films, spray pyrolysis, thickness, envelope method, transmission spectra, interference extremes, envelope curves, interpolation.

### **Введение**

На сегодня в различных оптоэлектронных приборах и устройствах [1, 2] активно используются прозрачные проводящие покрытия (ППП) на основе тонких пленок оксидов металлов ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{SnO}_2$  и др.). Подобные материалы обладают уникальной комбинацией следующих свойств: высокой электропроводности и хорошей оптической прозрачности в видимой области электромагнитного спектра. Оба этих параметра сильно зависят от толщины пленок, типа и концентрации примеси. Например, поверхностное сопротивление тонких пленок уменьшается при увеличении толщины [3, 4]. Поэтому, изменяя условия получения каким-либо методом, можно добиться улучшения электрических и оптических свойств ППП.

Среди существующих способов определения толщины тонких пленок, таких как эллипсометрия, интерферометрия, профилометрия, электронная и атомно-силовая микроскопия и др., чаще всего применяются первые два [5]. Однако проводить измерения толщины тонких прозрачных пленок этими традиционными методами затруднительно вследствие определенных ограничений. Например, принцип работы спектральных эллипсометров основан на том, что свет должен отражаться на границе раздела пленка–подложка и менять поляризацию при прохождении пленки. Следовательно, в случае стеклянной подложки, толщина которой менее 8–10 мм, очень трудно исключить попадание в анализатор луча, отраженного от нижней плоскости подложки. Поэтому в эллипсометрии необходимо использовать образцы пленок, нанесенных на полированную отражающую подложку (например, монокристаллический кремний).

При измерении толщины прозрачных пленок с помощью интерференционных микроскопов также может возникнуть ряд проблем. В частности, затруднение вызывает анализ интерференционных полос и определение порядка интерференции по разную сторону ступеньки, что приводит к получению неверных значений толщины пленки. Для точного измерения толщины в этом случае требуются дополнительные технологические решения, например нанесение тонкой металлической пленки [6].

Одним из оптимальных способов определения толщины тонких прозрачных пленок является анализ распределения экстремумов в спектрах оптического пропускания, вызванные интерференцией электромагнитных волн

в плоскопараллельном слое (пленке) в случае использования монохроматического источника излучения [7]. На сегодня имеется несколько методик, построенных на данном явлении [8–10]. На основе одной из них разработан конвертный метод [11, 12], который помимо толщины позволяет также найти оптические свойства пленок: показатель преломления, коэффициент поглощения, коэффициент экстинкции [13].

Данная работа заключалась в определении толщины пленок диоксида олова ( $\text{SnO}_2$ ) конвертным методом и сравнительном анализе полученных результатов со значениями, измеренными с помощью других методов.

### 1. Экспериментальная часть

Пленки  $\text{SnO}_2$  получены с помощью метода спрей-пиролиза, который является на сегодня одним из наиболее перспективных способов нанесения ППП на подложки большой площади. Экспериментальная установка, которая разработана для реализации данного метода, подробно представлена в работе [14].

В качестве подложек использовались натриево-кальциево-силикатные стекла и кремниевые пластины. Подложки предварительно очищались с помощью ультразвуковой обработки в ацетоне, этаноле и дистиллированной воде. Нанесение пленок  $\text{SnO}_2$  проводилось из растворов, содержащих тетрагидроксид пентагидрат олова ( $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) с молярной концентрацией  $C_M$  и растворитель – этанол. Для этого растворы с разными объемами  $V_r$  распылялись на подложки обоих типов, нагретых до температуры  $T_S$ . Распыление происходило с помощью сжатого воздуха, подаваемого в пневматический распылитель под давлением  $p$ . Расстояние между распылителем и подложками составляло  $L$ . В табл. 1 приведены значения  $C_M$ ,  $V_r$ ,  $T_S$ ,  $p$  и  $L$ .

Таблица 1

Условия получения пленок  $\text{SnO}_2$

№ образца	$V_r$ , мл	$C_M$ , моль/л	$T_S$ , °C	$p$ , бар	$L$ , мм
1	20	0,25	450	2	300
2	15				
3	10				
4	5				

Для определения конвертным методом толщины пленок  $\text{SnO}_2$ , нанесенных на стеклянные подложки, получены спектры пропускания с помощью спектрофотометра ПЭ-5300ВИ в области длин волн  $\lambda = (320–1000)$  нм. Толщина пленок  $\text{SnO}_2$  на кремниевых подложках определялась такими методами, как эллипсометрия и электронная микроскопия. Для проведения измерений использовался спектроскопический эллипсометр SE850 в диапазоне  $\lambda = (300–800)$  нм при угле падения  $70^\circ$  и сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Nova NanoSEM 450.

### 2. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 изображены спектры пропускания пленок  $\text{SnO}_2$ , нанесенных на стеклянные подложки при различных значениях объема распыляемого

раствора. Видно, что спектры имеют осциллирующий характер, который обусловлен интерференционными явлениями. Коэффициенты пропускания ( $T$ ) уменьшаются при увеличении объема раствора, поэтому положение интерференционных максимумов и минимумов зависит от толщины пленок.

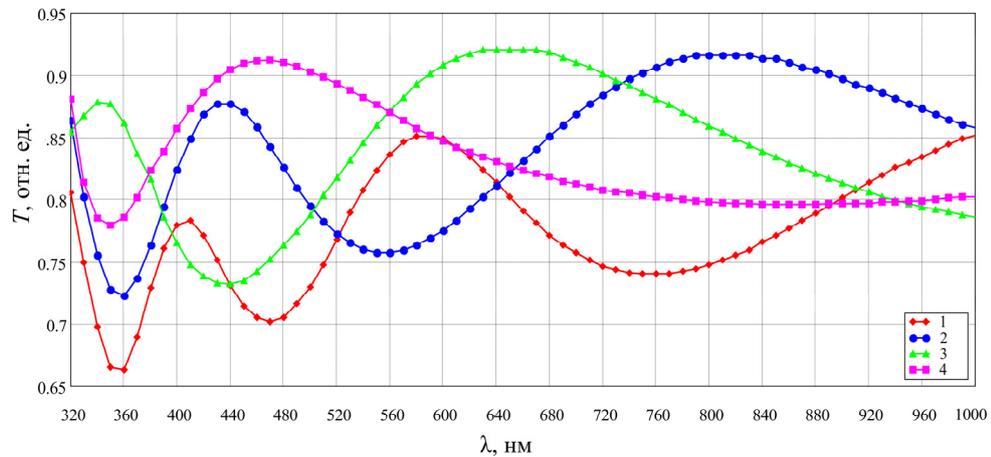


Рис. 1. Спектры пропускания образцов № 1–4

В связи с наличием на представленных спектрах пропускания интерференционных полос толщину пленок можно найти с помощью конвертного метода. Его основой являются конвертные кривые  $T_M$  и  $T_m$  (рис. 2), которые строятся посредством интерполяции спектра пропускания между экспериментальными точками, соответствующими положению интерференционных максимумов и минимумов. В зависимости от количества экстремумов для построения конвертных кривых можно применять линейную интерполяцию или интерполяцию сплайнами. При этом оптимального способа интерполяции сплайнами не существует. Например, исследования в работе [15] показывают, что более высокая степень сплайна приводит к увеличению погрешности измерений толщины пленок. Вследствие этого рекомендуется использовать линейный сплайн. Однако в работе [16] авторы считают, что наиболее предпочтительным способом является параболическая интерполяция. Поэтому для построения конвертных кривых выбор способа интерполяции всегда является произвольным.

Получив конвертные кривые, можно найти спектральную зависимость показателя преломления  $n$  пленок (дисперсию света), используя следующее уравнение:

$$n = \left[ N + (N^2 - n_S^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где

$$N = 2n_S \frac{T_M - T_m}{T_M T_m} + \frac{n_S^2 + 1}{2}. \quad (2)$$

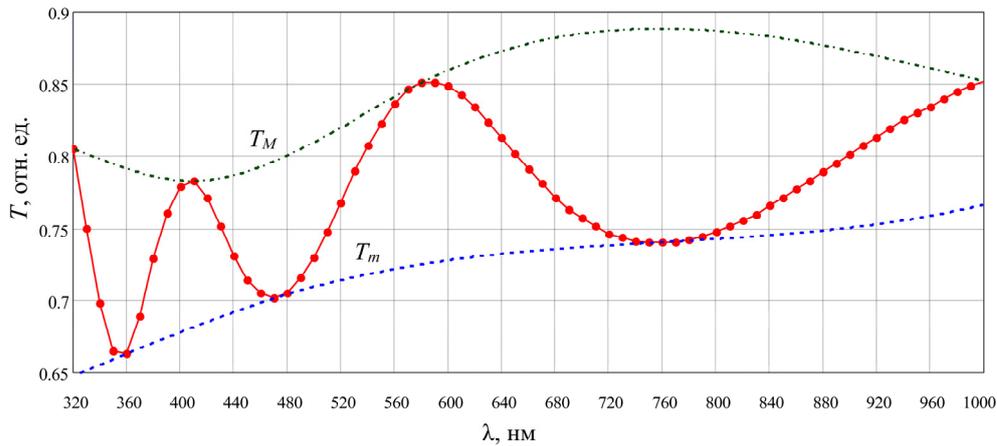


Рис. 2. Спектр пропускания образца № 1 вместе с конвертными кривыми

В формулах (1) и (2)  $n_S$  – показатель преломления подложки, который определяется из выражения

$$n_S = \frac{1}{T_S} + \sqrt{\frac{1}{T_S^2} - 1}, \quad (3)$$

где  $T_S$  – коэффициент пропускания подложки. Для стеклянных подложек, использованных в данной работе,  $T_S = 0,92$ . Таким образом, из уравнения (3) получается, что  $n_S = 1,513$ .

В качестве примера на рис. 3 представлен результат расчета показателя преломления для образца № 1, а также для сравнения изображен график из справочника [17].

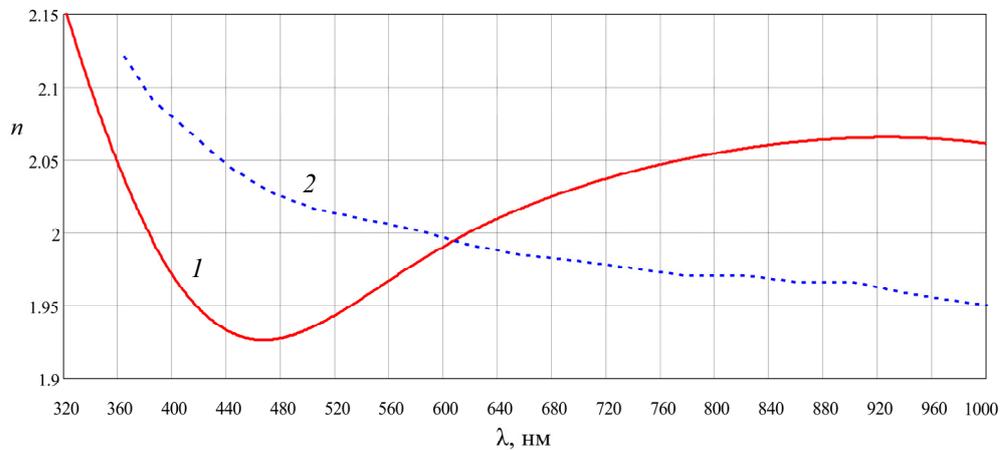


Рис. 3. Спектральная зависимость показателя преломления:  
1 – образец № 1; 2 – SnO<sub>2</sub> [17]

Для определения толщины пленок  $d$  необходимо воспользоваться следующим уравнением:

$$d = \frac{A\lambda_1\lambda_2}{2(n_1\lambda_2 - n_2\lambda_1)}, \quad (4)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – длины волн, которые соответствуют соседним экстремальным точкам на спектре пропускания,  $A = 1$  для двух соседних экстремумов одного типа (max – max, min – min) и  $A = 0,5$  для двух соседних экстремумов противоположного типа (max – min, min – max).

В табл. 2 приведены средние значения толщины образцов № 1–4, рассчитанные по уравнению (4) для всех комбинаций экстремальных точек. На основании данных, представленных в табл. 1 и 2, можно заметить, что с увеличением объема распыляемого раствора толщина пленок возрастает.

Таблица 2  
Толщина пленок SnO<sub>2</sub> при разных методах исследования

№ образца	$d_1$ , нм (на стекле, спектрофотометрия)	$d_2$ , нм (на кремнии, эллипсометрия)	$d_3$ , нм (на кремнии, СЭМ)
1	337	335	297
2	230	218	243
3	173	162	152
4	150	135	148

Результаты сравнивались со средними значениями, измеренными с помощью других методов (табл. 2). Самым точным из них является эллипсометрия. Максимальное отклонение между  $d_1$  и  $d_2$  среди всех образцов составило 15 нм (образец № 4), минимальное – 2 нм (образец № 1). Относительная погрешность измерений равна 11 и 0,6 % соответственно. Таким образом, точность конвертного метода понижается с уменьшением толщины пленки, так как в этом случае интерференционные экстремумы отдаляются дальше друг от друга и интерполяция между этими двумя точками становится более трудной.

На рис. 4 и 5 изображены снимки образцов № 1 и 4, полученные на сканирующем электронном микроскопе. Видно, что пленки являются поликристаллическими и состоят из случайно ориентированных кристаллитов, размеры которых становятся больше при увеличении объема раствора. Образцы имеют шероховатую и однородную поверхность (рис. 4,а и 5,а).

С помощью электронной микроскопии толщина пленок измерялась на сколах образцов. Для этого были получены изображения их поперечного сечения (рис. 4,б и 5,б). Наблюдается неоднородность пленок по толщине, которая вызвана, во-первых, способом распыления, использованным в данной работе; во-вторых, грубой оценкой толщины, заключающейся в измерении расстояния между точками на снимке в программном обеспечении СЭМ. Таким образом, результаты электронной микроскопии не позволяют оценить точность конвертного метода.

### Заключение

Исследования, проведенные в рамках данной работы, показали, что конвертный метод является весьма эффективным и простым способом определения толщины тонких оптически прозрачных пленок. Однако выявлены следующие недостатки метода:

- 1) не существует оптимального способа интерполяции сплайнами для построения конвертных кривых между интерференционными экстремумами;
- 2) точность метода снижается с уменьшением толщины пленки из-за удаления интерференционных экстремумов друг от друга;
- 3) метод не выполняется, если поглощение в пленке настолько велико, что интерференционные полосы на спектрах пропускания не наблюдаются.

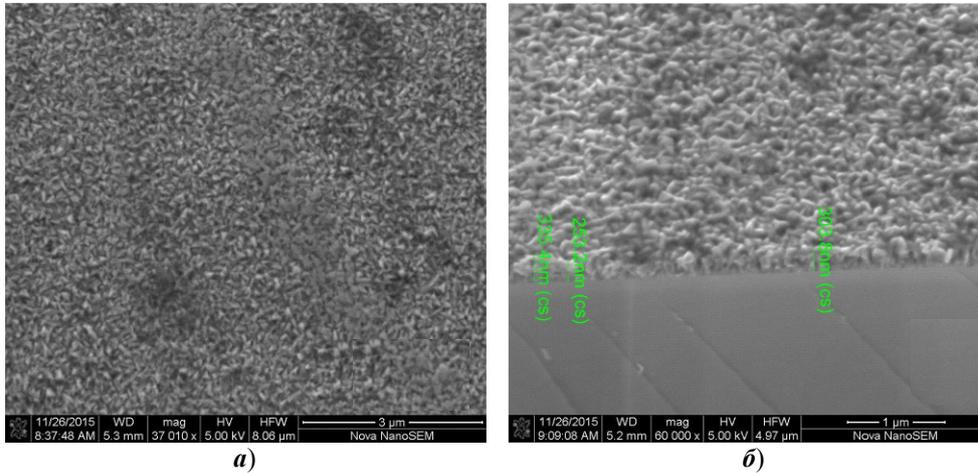


Рис. 4. СЭМ-изображения поверхности (а) и поперечного сечения (б) образца № 1 на кремнии

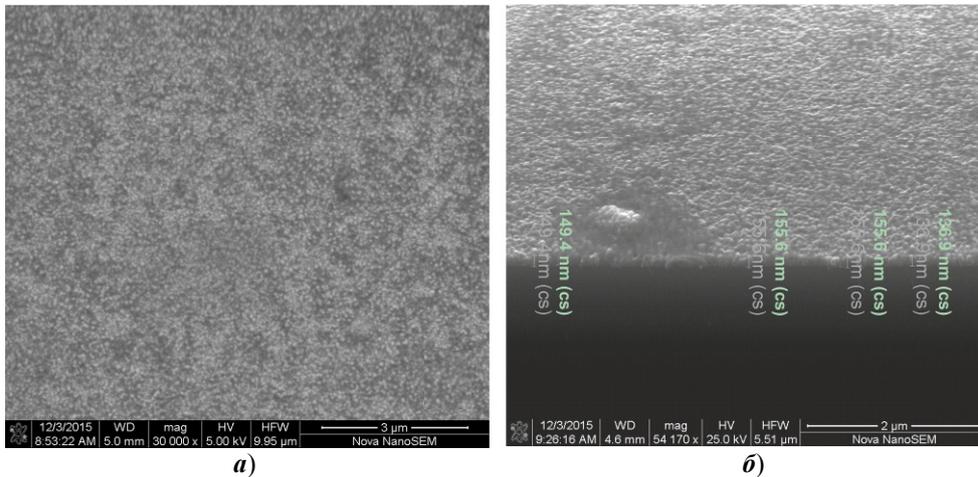


Рис. 5. СЭМ-изображения поверхности (а) и поперечного сечения (б) образца № 4 на кремнии

Таким образом, конвертный метод следует применять к любому спектру пропускания, демонстрирующему интерференционные полосы, при условии слабого поглощения тонкой пленкой и полностью прозрачной подложки, толщина которой намного больше толщины пленки.

Автор выражает огромную благодарность сотрудникам МИРЭА К. А. Воротилову и Д. С. Серегину за помощь в исследованиях.

Список литературы

1. Прозрачные проводящие покрытия на основе оксидов металлов. Технологии получения, свойства и области применения / В. И. Кондрашин, Н. О. Рыбакова, С. В. Ракша, А. А. Шамин, К. О. Николаев // Молодой ученый. – 2015. – № 13. – С. 128–132.
2. **Liu, H.** Transparent conducting oxides for electrode applications in light emitting and absorbing devices / H. Liu, V. Avrutin, N. Izyumskaya, Ü. Özgür // Superlattices Microstruct. – 2010. – Vol. 48, № 5. – P. 458–484.
3. **Tatar, D.** The relationship between the doping levels and some physical properties of SnO<sub>2</sub>: F thin films spray-deposited on optical glass / D. Tatar, B. Düzgün // Pramana – J. Phys. – 2012. – Vol. 79, № 1. – P. 137–150.
4. Physical properties of sprayed antimony doped tin oxide thin films: The role of thickness / A. R. Babar, S. S. Shinde, A. V. Moholkar, C. H. Bhosale, J. H. Kim, K. Y. Rajpure // Journal of Semiconductors. – 2011. – Vol. 32, № 5. – P. 053001-1 – 053001-8.
5. **Ремез, Л. М.** Обзор методов измерения толщин термоэлектрических нанопленок / Л. М. Ремез // Молодежный научно-технический вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – № 5. – URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/721985.html>
6. Влияние ионной обработки в процессе ВЧ магнетронного распыления на толщину и показатель преломления ИТО пленок / Е. А. Зайцева, Р. М. Закирова, П. Н. Крылов, К. С. Лебедев, И. В. Федотова // Вестник Удмуртского университета. – 2012. – Вып. 2 – С. 26–30.
7. **Нагибина, Н. Б.** Интерференция и дифракция света / Н. Б. Нагибина. – Л. : Машиностроение, 1985. – 332 с.
8. Формирование ультратонких пленок Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> на подложках из кварца / С. В. Зайцев, Ю. В. Герасименко, С. Н. Салтыков, Д. А. Ховив, А. М. Ховив // Неорганические материалы. – 2011. – Т. 47, № 4. – С. 468–472.
9. **Кротова, Г. Д.** Технология материалов и изделий электронной техники : лаб. практикум / Г. Д. Кротова, В. Ю. Дубровин, В. А. Титов, Т. Г. Шикова. – Иваново : ГОУ ВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т., 2007. – 156 с.
10. **Kerkache, L.** Physical properties of RF sputtered ITO thin films and annealing effect / L. Kerkache, A. Layadi, E. Dogheche, D. Remiens // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2006. – № 39. – P. 184–189.
11. **Manifacier, J. C.** A simple method for the determination of the optical constants n, h and the thickness of a weakly absorbing thin film / J. C. Manifacier, J. Gasiot, J. P. Fillard // J. Phys. E: Sci. Instrum. – 1976. – Vol. 9. – P. 1002–1004.
12. **Swanepoel, R.** Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon / R. Swanepoel // J. Phys. E: Sci. Instrum. – 1983. – Vol. 16. – P. 1214–1222.
13. Особенности оптических и электрических свойств поликристаллических пленок CdTe, изготовленных методом термического испарения / В. В. Брус, М. Н. Солован, Э. В. Майструк, И. П. Козьярский, П. Д. Марьянчук, К. С. Ульяницкий, J. Rappich // Физика твердого тела. – 2014. – Т. 56, вып. 10. – С. 1886–1890.
14. **Кондрашин, В. И.** Разработка лабораторного оборудования для получения и исследования материалов микро- и наноэлектроники / В. И. Кондрашин, С. В. Ракша, М. Ю. Шикин // Молодой ученый. – 2014. – № 6. – С. 169–173.
15. **Stockett, M.** Optical properties of thin transparent conducting oxide films on glass for photovoltaic applications. – URL: [http://new.oberlin.edu/arts-and-sciences/departments/physics/documents/projects/honors/Stockett\\_thesis.pdf](http://new.oberlin.edu/arts-and-sciences/departments/physics/documents/projects/honors/Stockett_thesis.pdf)
16. **Poelman, D.** Methods for the determination of the optical constants of thin films from single transmission measurements: a critical review / D. Poelman, P. F. Smet // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2003. – Vol. 36. – P. 1850–1857.
17. **Аскоченский, А. А.** Оптические материалы для инфракрасной техники / А. А. Аскоченский. – М. : Наука, 1995. – 310 с.

### References

1. Kondrashin V. I., Rybakova N. O., Raksha S. V., Shamin A. A., Nikolaev K. O. *Molodoy uchenyy* [The young scientist]. 2015, no. 13, pp. 128–132.
2. Liu H., Avrutin V., Izyumskaya N., Özgür Ü. *Superlattices Microstruct.* 2010, vol. 48, no. 5, pp. 458–484.
3. Tatar D., Düzgün B. *Pramana – J. Phys.* 2012, vol. 79, no. 1, pp. 137–150.
4. Babar A. R., Shinde S. S., Moholkar A. V., Bhosale C. H., Kim J. H., Rajpure K. Y. *Journal of Semiconductors.* 2011, vol. 32, no. 5, pp. 053001-1 – 053001-8.
5. Remez L. M. *Molodezhnyy nauchno-tehnicheskyy vestnik. MGTU im. N. E. Baumana* [Youth scientific technical bulletin. Bauman Moscow State Technical University]. 2014, no. 5. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/721985.html>
6. Zaytseva E. A., Zakirova R. M., Krylov P. N., Lebedev K. S., Fedotova I. V. *Vestnik Udmurtskogo universiteta* [Bulletin of Udmurtia University]. 2012, iss. 2, pp. 26–30.
7. Nagibina N. B. *Interferentsiya i difraktsiya sveta* [Light interference and diffraction]. Leningrad: Mashinostroenie, 1985, 332 p.
8. Zaytsev S. V., Gerasimenko Yu. V., Saltykov S. N., Khoviv D. A., Khoviv A. M. *Neorganicheskie materialy* [Non-organic materials]. 2011, vol. 47, no. 4, pp. 468–472.
9. Krotova G. D., Dubrovin V. Yu., Titov V. A., Shikova T. G. *Tekhnologiya materialov i izdeliy elektronnoy tekhniki: lab. praktikum* [Technology of materials and devices of electronic engineering: laboratory work]. Ivanovo: GOU VPO Ivan. gos. khim.-tekhmol. un-t., 2007, 156 p.
10. Kerkache L., Layadi A., Dogheche E., Remiens D. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2006, no. 39, pp. 184–189.
11. Manificier J. C., Gasiot J., Fillard J. P. *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 1976, vol. 9, pp. 1002–1004.
12. Swanepoel R. *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 1983, vol. 16, pp. 1214–1222.
13. Brus V. V., Solovan M. N., Maystruk E. V., Kozyarskiy I. P., Mar'yanchuk P. D., Ul'yaniyskiy K. S., Rappich J. *Fizika tverdogo tela* [Solid state physics]. 2014, vol. 56, iss. 10, pp. 1886–1890.
14. Kondrashin V. I., Raksha S. V., Shikin M. Yu. *Molodoy uchenyy* [The young scientist]. 2014, no. 6, pp. 169–173.
15. Stockett M. *Optical properties of thin transparent conducting oxide films on glass for photovoltaic applications.* Available at: [http://new.oberlin.edu/arts-and-sciences/departments/physics/documents/projects/honors/Stockett\\_thesis.pdf](http://new.oberlin.edu/arts-and-sciences/departments/physics/documents/projects/honors/Stockett_thesis.pdf)
16. Poelman D., Smet P. F. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003, vol. 36, pp. 1850–1857.
17. Askochenskiy A. A. *Opticheskie materialy dlya infrakrasnoy tekhniki* [Optical materials for infrared equipment]. Moscow: Nauka, 1995, 310 p.

---

**Кондрашин Владислав Игоревич**  
аспирант, Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: vlad\_kondrashin@mail.ru

---

**Kondrashin Vladislav Igorevich**  
Postgraduate student, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

---

УДК 535.243

**Кондрашин, В. И.**

**Определение толщины тонких оптически прозрачных пленок SnO<sub>2</sub> конвертным методом / В. И. Кондрашин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 93–101. DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-8**

А. К. Гришко

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ СИСТЕМЫ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ СОСТОЯНИЙ В УСЛОВИЯХ КОНФЛИКТА<sup>1</sup>

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Объектом исследования являются процессы функционирования радиоэлектронной системы, состоящие из множества различных радиоэлектронных средств, подвергающиеся в ходе работы непреднамеренным и преднамеренным помехам. Предметом исследования являются модели обеспечения электромагнитной совместимости совокупности радиоэлектронных средств. Цель работы состоит в том, чтобы выбрать оптимальный план работы множества различных радиоэлектронных средств с целью повышения эффективности их совместного функционирования путем перестройки параметров излучений.

*Материалы и методы.* Предложен вероятностный подход к анализу динамики состояний модели функционирования радиоэлектронных средств, построенной на основе теории полумарковских процессов.

*Результаты.* Получены модели для расчета и анализа эффективности функционирования радиоэлектронных средств, отличающиеся системным учетом всех факторов, влияющих на их совместную работу, и достоверностью формализации описания процесса.

*Выводы.* На основе предложенных моделей можно осуществлять оптимальное планирование частотного ресурса с целью уменьшения уровня помех для радиоэлектронных средств, а это значит сформировать эффективную радиоэлектронную систему, оснащенную разнотипными радиоэлектронными средствами. Предложенные модели позволяют не только анализировать эффективность функционирования системы радиоэлектронных средств, но и решать обратные задачи по совершенствованию их защищенности до необходимого уровня.

**Ключевые слова:** радиоэлектронная система, радиоэлектронные средства, помехи, электромагнитная совместимость.

А. К. Grishko

## OPTIMAL PARAMETER CONTROL IN RADIO-ELECTRONIC SYSTEMS ON THE BASIS OF THE ANALYSIS OF STATE DYNAMICS IN CONFLICT CONDITIONS

### Abstract.

*Background.* The research is focused on the process in radio-electronic systems consisting of multiple various radio devices that experience during their active use

---

<sup>1</sup> Статья подготовлена в рамках проектной части государственного задания выполнения государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок) «№8.389.2014/К» по теме «Информационные технологии анализа конструкций радиоэлектронных средств при воздействии внешних факторов».

intentional and unintentional interference. The object of the research is the models for ensuring electromagnetic compatibility of the total of radio-electronic devices. The research is aimed at finding the optimal plan for the operation of multiple radio-electronic devices so as to increase the efficiency of joint performance by means of readjusting the emittance parameters.

*Methods.* The probability approach is offered to be used for the analysis of state dynamics of the model of radio-electronic devices, built on the basis of the theory of semi-Markov processes.

*Results.* As a result the models were obtained allowing calculating and analyzing the system performance efficiency. These models consider the complex of factors influencing the joint operation and are characterized by reliable formalized process description.

*Conclusions.* The suggested models may help to perform optimal planning of the frequency resource so as to reduce the interference level for radio-electronic devices, and in this way to build an efficient radio-electronic system equipped with various types of radio-electronic devices. The suggested models do not only allow to analysis the efficiency of system operation, but to solve inverse problems aimed at improving their protection until it reaches the desired level.

**Key words:** radio-electronic system, radio-electronic devices, interference, electromagnetic compatibility.

## Введение

Анализ современных методов и моделей функционирования сложных радиоэлектронных систем, состоящих из множества радиоэлектронных средств, к тому же, как правило, разнотипных, во многих случаях является несовершенным [1–3]. Связано это с тем, что методика построения моделей не учитывает ряд особенностей и факторов, влияющих на эффективность функционирования.

Радиоэлектронные системы (РЭС) специального назначения имеют высокую плотность компоновки РЭС и их отдельных узлов, функционируют в тяжелых условиях, их эксплуатация должна учитывать одновременное использование и применение разнотипных РЭС различного назначения [3, 4].

Для обеспечения электромагнитной совместимости проводят определенные организационно-технические мероприятия:

1. Отключают одну из однотипных радиосистем или передачу информации разнотипными средствами, работающими в одном диапазоне частот, разносят во времени.

2. Ранжируют приоритеты РЭС по важности работы для возможного дальнейшего отключения менее важных из них в целях выполнения конкретных задач.

3. Ужесточают нормы частотно-территориального разнесения, в том числе увеличивают расстояния между группами и подразделениями, оснащенными РЭС.

4. Стараются применять радиосистемы, в которых автоматически блокируется прием или излучение конфликтного РЭС на время работы приоритетных.

Вышеперечисленные методы устранения проблем ЭМС достаточно эффективны в радиосистемах гражданского назначения и допустимы в специальных радиосистемах в период мирного времени. Во время чрезвычайных

ситуаций и военного противоборства решение проблемы ЭМС обычным отключением РЭС, снижающим боевую эффективность действий подразделений и групп, недопустимо.

### **Постановка задачи**

Методы и модели, которые используют в настоящее время, ориентируются в первую очередь на наличие большого статистического материала, низкую динамику смены состояний внешних воздействий, а также низкую динамику состояний самой радиоэлектронной системы. Поэтому разработка методик расчета оценки эффективности функционирования сложных радиоэлектронных систем в условиях деструктивных внешних воздействий и в реальном масштабе времени является важной и актуальной задачей.

Полумарковские процессы являются естественным и важным обобщением цепей и процессов Маркова, а также теории восстановления, что в свою очередь позволяет естественным образом моделировать широкий класс реальных систем. Задача оптимизации поведения построенного ориентированного графа в случайной среде заключается в варьировании переменных параметров, при которых минимизируется определенная заранее заданная величина.

### **1. Синтез модели обеспечения ЭМС**

Для расчета среднего времени успешной работы РЭС при воздействии радиопомех представим модель функционирования в виде полумарковской системы [5, 6]. Предположим, что РЭС с заданной эффективностью функционирует с момента  $t_0$  до момента времени  $t_1$ . Будем считать, что на этом временном интервале РЭС не подвергается воздействию преднамеренных помех.

В момент наступления времени  $t_2$  приемные тракты РЭС начинают подвергаться воздействию непреднамеренных или преднамеренных помех и с этого момента начинаются мероприятия по защите РЭС путем перестройки его параметров.

Для построения графа выделяем два состояния РЭС в условиях воздействия помех – это успешное выполнение поставленной задачи и отстройка РЭС от помех. Динамику состояний полумарковского процесса, описывающую процесс функционирования радиоэлектронной системы в условиях воздействия помех с возможностью управления параметрами сигнала излучения РЭС с целью снижения влияния радиопомех, представим в виде ориентированного графа на рис. 1.

Полумарковский процесс будет находиться в состоянии  $e_1$ , пока не наступит какое-нибудь из двух случайных событий: либо РЭС успешно выполнит поставленное задание до того, как появятся помехи и полумарковский процесс перейдет в состояние  $e_4$ , либо произойдет обнаружение помехи на входе РЭС в процессе его функционирования до выполнения задания и полумарковский процесс перейдет в состояние  $e_2$ . Полумарковский процесс также перейдет в состояние  $e_2$ , если мощность помехи превысит пороговое значение мощности полезного сигнала в приемном тракте РЭС и при совпадении частот работы РЭС и помехи.

Полумарковский процесс будет находиться в состоянии  $e_2$ , пока не будет достигнут требуемый уровень защищенности и работоспособность РЭС в условиях помех полностью восстановится. После чего полумарковский процесс перейдет в состояние  $e_3$ .

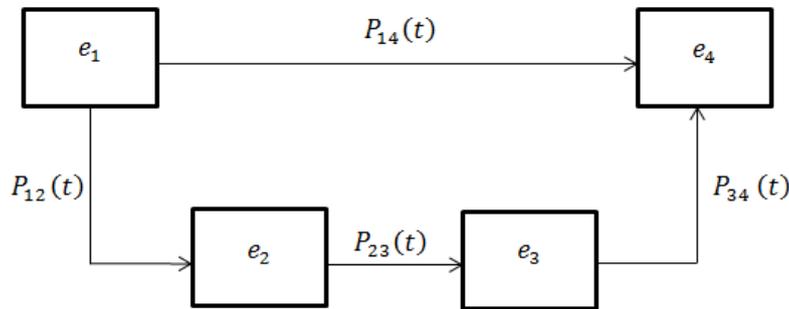


Рис. 1. Динамика состояний полумарковского процесса, описывающего функционирование радиоэлектронной системы в условиях воздействия помех:  $e_1$  – РЭС не подвергается воздействию помех; появление помех возможно;  $e_2$  – переход РЭС в защищенное состояние с восстановлением работоспособности в условиях воздействия преднамеренных помех;  $e_3$  – РЭС функционирует в защищенном (восстановленном) режиме;  $e_4$  – РЭС завершает выполнение поставленного задания

В состоянии  $e_3$  полумарковский процесс будет находиться, пока не будет решена поставленная задача РЭС после восстановления ее работоспособности в условиях помех. После этого полумарковский процесс перейдет в состояние  $e_4$ .

## 2. Система интегральных уравнений для расчета вероятностей выполнения задачи

Система интегральных уравнений для описания полумарковского процесса функционирования РЭС в условиях помех выглядит следующим образом [5, 6]:

$$\Psi_1(t) = \int_0^t \Psi_2(t-u) dP_{12}(u) + P_{14}(t), \quad i = 1, \dots, (n-1),$$

$$\Psi_2(t) = \int_0^t \Psi_3(t-u) dP_{23}(u), \quad \Psi_3(t) = P_{34}(t), \quad (1)$$

где  $\Psi_i(t)$  является функцией распределения времени успешного завершения процесса с условием его начала в состоянии  $e_i$  ( $i=1,2,3$ );  $P_{ij}$  – вероятности переходов полумарковского процесса из состояния  $e_i$  в состояние  $e_j$ , если полумарковский процесс в состоянии  $e_i$  находился в течение времени  $t$ .

Если численно или аналитически с помощью преобразования Лапласа решить систему интегральных уравнений относительно  $\Psi_i(t)$ , то можно получить функцию распределения времени успешной работы РЭС в условиях действия помех [7, 8], а значит, значение вероятности выполнения поставленной задачи за период времени не более  $t$ .

### **3. Система алгебраических уравнений для расчета среднего времени управления параметрами РЭС в условиях воздействия помех**

Для расчета среднего времени управления параметрами РЭС в условиях радиоэлектронного противодействия система алгебраических уравнений будет принимать следующий вид [1, 2, 9]:

$$\tau_1 = \zeta_1 + p_{12}\tau_2, \quad \tau_2 = \zeta_2 + p_{23}\tau_3, \quad \tau_3 = \zeta_3, \quad (2)$$

где  $\tau_i$  – значение среднего времени успешного завершения процесса с условием его начала в состоянии  $e_i$  ( $i=1,2,3$ );  $p_{ij}$  – вероятности переходов из состояния  $e_i$  в состояние  $e_j$ ;  $\zeta_i$  – математическое ожидание времени нахождения полумарковского процесса в состоянии  $e_i$ .

Если численно или аналитически решить систему алгебраических уравнений относительно  $\tau_1$ , то можно определить среднее время успешной работы РЭС в условиях воздействия помех.

### **4. Расчет вероятности совпадения частот и вероятности превышения мощности помехи над пороговым сигналом**

При определении вероятности перехода  $P_{12}(t)$  из состояния  $e_1$  в состояние  $e_2$  также необходимо учитывать дополнительно вероятность возможного совпадения частот РЭС и вероятность возможного превышения над пороговым сигналом мощности помех [1, 6].

Вероятность возможного совпадения частот РЭС, подчиненной нормальному закону с параметрами  $m$  и  $\sigma$ , можно рассчитать по формуле

$$\rho_f = \rho^* \left( (\tilde{f}_c - \tilde{f}_n) < \xi \right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{\xi} e^{-\frac{(u-m)^2}{2\sigma^2}} d(u),$$

$$m = (\overline{f_c} - \overline{f_n}), \quad \sigma = \frac{km}{3}, \quad (3)$$

где  $\rho_f$  – вероятность совпадения частот РЭС;  $\tilde{f}_c, \overline{f_c}$  – значение случайной величины частоты сигнала и среднее значение частоты полезного сигнала;  $\tilde{f}_n, \overline{f_n}$  – значение случайной величины частоты помехи и среднее значение частоты помехи;  $\xi$  – минимальное допустимое рассогласование частот РЭС, при котором сказывается влияние помехи;  $k$  – максимальное возможное рассогласование частот от  $m$ .

Вероятность превышения значения мощности помехи над пороговым значением мощности сигнала [1, 2, 6]:

$$\rho_P = \rho^* \left( \widetilde{P}_n \geq K_n \widetilde{P}_c \right) = \int_0^{\infty} G_{K_n C}(u) dG_n(u), \quad (4)$$

где  $\rho_P$  – вероятность превышения случайного значения мощности помехи  $\widetilde{P}_n$ , подчиненной нормальному закону распределения  $G_{K_n C}$ , над случайным значением мощности сигнала  $\widetilde{P}_c$  и умноженному на коэффициент подавления  $K_n$  (пороговое значение мощности сигнала) на входе РЭС;  $P_c$  и  $P_n$  – соответственно математические ожидания мощности полезного сигнала и помехи.

### 5. Расчет вероятностей перехода полумарковского процесса функционирования РЭС в условиях воздействия помех

Вероятности переходов рассчитываются по формулам полумарковского процесса [1, 2, 10–12]:

$$P_{12}(t) = \left[ 1 - (1 - \rho_f)(1 - \rho_P) \right] \int_0^t G_{II}(u) dG_P(t),$$

$$P_{14}(t) = \int_0^t G_P(u) dG_{II}(t) + (1 - \rho_f)(1 - \rho_P) \int_0^t G_{II}(u) dG_P(t), \quad (5)$$

$$P_{23}(t) = G_B(t), \quad P_{34}(t) = G_P(t),$$

где  $G_P$  – функция распределения времени работы РЭС;  $G_{II}$  – функция распределения времени до появления помехи;  $G_B$  – функция распределения времени восстановления работоспособности РЭС в условиях действия помех. Значения  $\rho_f$  и  $\rho_P$  берем из выражений (3) и (4). Подстановка выражений (5) в систему интегральных выражений (1) позволяет решить ее и определить функцию распределения времени выполнения поставленной перед РЭС задачи  $\Psi_i(t)$ .

При  $t = \infty$  из уравнений (5) получаются значения вероятностей перехода (6), которые подставляются в систему алгебраических уравнений полумарковского процесса (2):

$$p_{12} = P_{12}(t = \infty), \quad p_{14} = 1 - p_{12}, \quad p_{23} = P_{23}(t = \infty) = 1. \quad (6)$$

### 6. Определение значений математических ожиданий пребывания полумарковского процесса в состояниях $e_1$ и $e_2$

Математические ожидания времени пребывания полумарковского процесса в состояниях  $e_1$  и  $e_2$  рассчитываются по формулам [1, 2, 11, 12]:

$$\zeta_1 = \int_0^{\infty} [1 - G_P][1 - G_{II}]d(t), \quad \zeta_2 = \int_0^{\infty} [1 - G_B]d(t), \quad \zeta_3 = \int_0^{\infty} [1 - G_P]d(t), \quad (7)$$

их значения (7) также подставляются в систему алгебраических уравнений полумарковского процесса (2).

### 7. Определение среднего времени восстановления работоспособности РЭС и вероятности выполнения задания за время не более $t$

Система алгебраических уравнений имеет аналитическое решение, результирующее выражение которого относительно  $\tau_1$ , учитывая, что значение вероятности перехода полумарковского процесса из состояния  $e_2$  в состояние  $e_3$  равно единице (6), будет иметь следующий вид [1, 2, 6]:

$$\tau_1 = \zeta_1 + p_{12}(\zeta_2 + \zeta_3). \quad (8)$$

Для каждого конкретного образца РЭС существует определенный алгоритм, по которому осуществляется процесс восстановления его работоспособности в условиях воздействия помех и перестройка параметров его излучений [11, 12]. Случайное время, затрачиваемое на восстановление работоспособности РЭС, будет определяться электронными схемами, а также будет зависеть от входных случайных параметров помехи. При дальнейших расчетах функцию распределения случайного времени целесообразно аппроксимировать с помощью нормального закона. Функция распределения при условии успешного выполнения задания РЭС будет иметь следующее выражение [1, 2, 11]:

$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(u-\tau_1)^2}{2\sigma^2}} d(u), \quad (9)$$

где значение  $\tau_1$  находится по формуле (8).

Таким образом, выражения полученного математического аппарата позволяют оценивать эффективность функционирования РЭС – вероятность успешного выполнения поставленного задания за время не более  $t$ .

Соответственно дополнительно появляется возможность исследовать зависимости этого показателя эффективности от параметров процесса. Например, математического ожидания времени функционирования радиоэлектронного средства в процессе выполнения задания, математического ожидания времени до момента действия помех, математического ожидания времени восстановления работоспособности радиоэлектронного средства [6–8]. Также можно исследовать, как зависит показатель эффективности от того, что мощность помехи превысит порог значения над мощностью полезного сигнала и вероятность того, что совпадут частоты радиоэлектронных средств.

### 8. Построение оптимального управления параметрами РЭС с учетом ограничений

Построение системы оптимального управления параметрами РЭС возможно на основе любой подходящей методики [9, 11]. Метод переборных при-

менен для этих целей как самый простой и наглядный. Из множества возможных способов обеспечения эффективного функционирования каждого РЭС выбираются такие, которые будут обеспечивать [6, 9]:

$$\min \Delta = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{S_i} \Delta_{ij} \delta_{ij}, \quad \Delta_{ij} = \ln(P_{ij\text{НПП}}(t)P_{ij\text{ПП}}(t)),$$

$$P_{ij\text{НПП}}(t) = P^* \left( \left( \frac{P_c}{P_{n\text{НПП}}} \right) < K_{n\text{НПП}} \right) = \int_0^{K_{ij\text{НПП}}} g \left( \frac{P_c}{P_{n\text{НПП}}} \right) d \frac{P_c}{P_{n\text{НПП}}},$$

$$P_{ij\text{ПП}}(t) = P^* \left( \left( \frac{P_c}{P_{n\text{ПП}}} \right) < K_{n\text{ПП}} \right) = \int_0^{K_{n\text{ПП}}} g \left( \frac{P_c}{P_{n\text{ПП}}} \right) d \frac{P_c}{P_{n\text{ПП}}},$$

где  $\Delta$  – интегральный логарифмический показатель уровня помех РЭС;  $P_{n\text{НПП}}(t)$  – значение вероятности возникновения непреднамеренных помех;  $P_{n\text{ПП}}(t)$  – значение вероятности возникновения преднамеренных помех;  $g \left( \frac{P_c}{P_n} \right)$  – значение плотности вероятности отношения мощности сигнала к помехе;  $d \frac{P_c}{P_n}$  – дифференциал отношения мощности сигнала к помехе;

$K_n$  – коэффициент подавления;  $i$  – число РЭС;  $j$  – количество изменяемых параметров  $i$ -го РЭС;  $\delta_{ij}$  – способ изменения  $j$ -го параметра  $i$ -го РЭС.

Необходим учет определенных ограничений [6, 9, 11]. Таблица перебора формируется путем включения в нее номиналов рабочих частот для каждого РЭС и значений вероятностей появления помех на входных трактах РЭС для конкретного набора частот [6, 10, 12]. На основе заполненных данных таблицы переборов определяется оптимальный план функционирования каждого РЭС радиоэлектронной системы. Автоматизация предложенной методики расчета исходных данных и сама процедура перебора данных таблицы не будет занимать много времени.

### Заключение

Предложенные математические модели, построенные на основе теории полумарковских процессов, позволяют произвести расчет среднего времени эффективной работы РЭС в условиях помех, расчет вероятности успешного функционирования двух РЭС с учетом их взаимного влияния, а также позволяет оптимально управлять частотным ресурсом с целью уменьшения уровней помех для РЭС. Таким образом, методика построения оптимального плана функционирования совокупности радиоэлектронных средств будет формировать эффективную систему управления разнотипными РЭС.

Разработанный математический аппарат позволяет не только анализировать эффективность функционирования системы радиоэлектронных средств, но и решать обратные задачи по совершенствованию их защищенности до необходимого уровня.

**Список литературы**

1. **Вентцель, Е. С.** Теория вероятности / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 2005. – 576 с.
2. **Черноруцкий, И. Г.** Методы принятия решений / И. Г. Черноруцкий. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
3. **Гарькина, И. А.** Системные методологии, идентификация систем и теория управления: промышленные и аэрокосмические приложения / И. А. Гарькина, А. М. Данилов, Э. В. Лапшин, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 3–11.
4. ГОСТ РВ 20.39.304–2003. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам. – М., 2003.
5. **Куприянов, А. И.** Радиоэлектронная борьба. Основы теории / А. И. Куприянов, Л. Н. Шустов. – 2-е изд. – М. : Вузовская книга, 2015. – 800 с.
6. **Гришко, А. К.** Динамический анализ и синтез оптимальной системы управления радиоэлектронными средствами / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 141–147.
7. **Гришко, А. К.** Анализ математических моделей расчета электроакустических полей и дальности действия радиолокационных систем методом последовательного анализа / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Инженерный вестник Дона. – 2015. – Т. 35. № 2–1. С.16.
8. Математические и информационно-структурные модели эргатических систем / М. Ю. Михеев, Т. В. Жашкова, И. Ю. Семочкина, В. Р. Роганов, А. Б. Щербань. – Пенза : Изд-во ПензГТУ, 2015. – 161 с.
9. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, S. Brostilov, N. Yurkov // 2016XIII<sup>th</sup> International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET). – Lviv-Slavsko, Ukraine, 2016. – P. 214–218. DOI:10.1109/TCSET.2016.7452017.
10. Improvement of the Efficiency of Voice Control Based on the Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition / A. Alimuradov, P. Churakov, A. Tyckov, I. Artemov, A. Kuzmin // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Moscow, Russia, 2016. – P. 1–6. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491754.
11. **Grishko, A.** Dynamic Analysis and Optimization of Parameter Control in Radio Systems in Conditions of Interference / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, N. Yurkov // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Moscow, Russia, 2016. – P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491674.
12. **Grishko, A.** Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems / A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43842–43845.

**References**

1. Venttsel' E. S. *Teoriya veroyatnosti* [Probability theory]. Moscow: Nauka, 2005, 576 p.
2. Chernorutskiy I. G. *Metody prinyatiya resheniy* [Decision making methods]. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2005, 416 p.
3. Gar'kina I. A., Danilov A. M., Lapshin E. V., Yurkov N. K. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2009, no. 1, pp. 3–11.
4. *GOST RV 20.39.304–2003. Apparatura, pribory, ustroystva i oborudovanie voennogo naznacheniya. Trebovaniya stoykosti k vneshnim vozdeystvuyushchim faktoram* [State

- Standard RV 20.39.304-2003. Equipment, devices, apparatus for military purposes. External impact factor resistance requirements]. Moscow, 2003.
5. Kupriyanov A. I., Shustov L. N. *Radioelektronnaya bor'ba. Osnovy teorii* [Electronic warfare. Basic theory]. 2nd ed. Moscow: Vuzovskaya kniga, 2015, 800 p.
  6. Grishko A. K. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2015, no. 4 (26), pp. 141–147.
  7. Grishko A. K., Goryachev N. V., Yurkov N. K. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Don engineering bulletin]. 2015, vol. 35, no. 2–1, p.16.
  8. Mikheev M. Yu., Zhashkova T. V., Semochkina I. Yu., Roganov V. R., Shcherban' A. B. *Matematicheskie i informatsionno-strukturnye modeli ergaticheskikh sistem* [Mathematical and information-structured models of ergatic systems]. Penza: Izd-vo PenzGTU, 2015, 161 p.
  9. Grishko A., Goryachev N., Kochegarov I., Brostilov S., Yurkov N. *2016XIIIth International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET)*. Lviv-Slavsko, Ukraine, 2016, pp. 214–218. DOI:10.1109/TCSET.2016.7452017.
  10. Alimuradov A., Churakov P., Tychkov A., Artemov I., Kuzmin A. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Moscow, Russia, 2016, pp. 1–6. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491754.
  11. Grishko A., Goryachev N., Kochegarov I., Yurkov N. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Moscow, Russia, 2016, pp. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491674.
  12. Grishko A., Goryachev N., Yurkov N. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015, vol. 10, no. 23, pp. 43842–43845.

---

**Гришко Алексей Константинович**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

---

**Grishko Aleksey Konstantinovich**

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, sub-department of radio  
equipment design and production,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

---

УДК 517.977: 519.21: 621.396: 621.37

**Гришко, А. К.**

**Оптимальное управление параметрами системы радиоэлектронных средств на основе анализа динамики состояний в условиях конфликта / А. К. Гришко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 102–111. DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-9**

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ЧАСТОТНЫХ И ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ<sup>1</sup>

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Описаны методики обработки результатов измерений частотных и временных параметров операционных усилителей (ОУ).

*Материалы и методы.* На предварительном этапе пользователем создается база исходных данных, включающая минимально допустимые значения измеряемых частотных и временных параметров, с которыми сравниваются результаты измерений параметров ОУ. По результатам этого сравнения принимается решение о соответствии ОУ требованиям технических условий. С учетом исходных данных и измеренных параметров создается макромодель ОУ.

*Результаты.* Определены основные этапы методики обработки результатов измерений частотных и временных параметров ОУ. Составлен перечень исходных данных и измеряемых параметров ОУ, необходимых для составления паспорта и расчета макромодели ОУ. Получены расчетные соотношения, позволяющие выразить параметры элементов макромодели непосредственно через статические и динамические параметры ОУ.

*Выводы.* Разработана методика автоматизированной обработки результатов измерений частотных и временных параметров ОУ, все процедуры которой выполняются в программной среде LabVIEW National Instruments. Тестирование разработанной программной реализации предложенной методики показало ее работоспособность и эффективность.

**Ключевые слова:** операционный усилитель, частотные и временные параметры, измерение, методика, макромодель

М. Yu. Parshukov, E. V. Sapunov, A. V. Svetlov

## PROCESSING THE RESULTS OF MEASUREMENTS OF FREQUENCY AND TIME PARAMETERS OF OPERATIONAL AMPLIFIERS

### Abstract.

*Background.* The article describes a method of processing the results of measurements of frequency and time parameters of operational amplifiers (op amp).

*Materials and method.* A user creates a database of initial data, including the minimum allowable values of the measured frequency and time parameters with which the op amp parameters measurement results are compared at the preliminary stage. Upon the results of this comparison a decision is taken about the compliance to requirements of technical specifications. An op amp macromodel is created taking into account the initial data and the measured parameters.

*Results.* The main stages of the method of processing the results of measurements of frequency and time parameters of op amp were defined. The list of initial data and measured parameters of op amp necessary to produce datasheet and calcu-

---

<sup>1</sup> Работа поддержана Грантом Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 16-38-00233).

lation of macromodel op amp was compiled. Calculated ratios allowing to express the parameters of the macromodel elements directly through static and dynamic parameters of op amp were obtained.

*Conclusions.* The method of automated processing of the results of measurements of frequency and time parameters of op amp was developed. All procedures of the method were performed in the LabVIEW National Instruments software environment. Testing of the developed software implementation of the proposed method showed its efficiency and operability.

**Key words:** operational amplifier, frequency and time parameters measurement, method, macromodel.

## Введение

При построении электронных схем для преобразования широкополосных, в том числе импульсных, сигналов широко применяются интегральные операционные усилители (ОУ). Для оценки динамических характеристик схем необходимо иметь информацию об основных частотных и временных параметрах ОУ. Предлагается методика обработки результатов измерений частотных и временных параметров ОУ с применением разработанного авторами многофункционального аппаратно-программного комплекса (АПК) для измерения динамических параметров ОУ [1].

Методика позволяет:

- проводить математическую обработку результатов измерений;
- сопоставлять результаты измерений с требованиями технических условий, предварительно занесенными в базу исходных данных, и на основании этого принимать решение о соответствии или несоответствии исследованного экземпляра ОУ требованиям технических условий, а также выдавать сообщение о принадлежности данного ОУ к той или иной группе рассортировки по измеренным значениям параметров;
- создавать паспорт исследованного ОУ;
- создавать текстовое описание макромодели исследованного экземпляра ОУ в формате, принятом в Spice-совместимых программах схемотехнического моделирования (PSpice, OrCAD, Multisim и др.).

### 1. Основные этапы методики обработки результатов измерений частотных и временных параметров ОУ

Методика предусматривает следующие этапы:

1. Пользователем предварительно создается база исходных данных, содержащая:
  - наименование микросхемы и название фирмы-производителя;
  - конструктивные данные ОУ: тип корпуса и расположение выводов;
  - номинальные значения напряжения питания положительной  $V_{pwrp}$  и отрицательной  $V_{pwrm}$  полярности (здесь и далее используются наименования параметров, употребляемые в Spice-совместимых программах схемотехнического моделирования);
  - статические параметры ОУ, не измеряемые разработанным АПК:
  - типовое значение входного тока смещения  $I_b$ ;
  - типовые значения максимальных выходных напряжений положительной  $V_{outp}$  и отрицательной  $V_{outm}$  полярности;

- типовое значение потребляемой мощности в статическом режиме  $Pd$ ;
- типовое значение коэффициента усиления  $Avdc$ ;
- типовое значение коэффициента ослабления синфазного сигнала  $CMRR$ ;
- типовые значения выходных сопротивлений ОУ на низких  $R_{odc}$  и высоких  $R_{oac}$  частотах; если известно только полное сопротивление  $R_o$ , то принимается:  $R_{odc} = 2R_o/3$ ,  $R_{oac} = R_o/3$  [2];

- типовое значение максимального тока короткого замыкания  $I_{os}$ .

Указанные статические параметры ОУ, не измеряемые рассматриваемым АПК для измерения динамических параметров, могут быть найдены в технической литературе, на сайтах фирм-производителей микросхем либо определены с помощью других средств измерений, например с помощью АПК для измерения статических параметров ОУ [3].

2. В базу данных заносятся значения таких параметров макромоделей ОУ, которые не могут быть рассчитаны по заданным параметрам ОУ, а находятся из технической документации или из файлов текстовых описаний Spice-моделей ОУ данного типа. Значения этих параметров зависят от особенностей технологического процесса производства микросхем и поэтому различны у разных фирм-производителей. К числу таких параметров относится емкость внутренней частотной коррекции  $C_c$ , а также значения коэффициентов полинома, описывающего выходной ток нелинейного источника тока  $FB$ , управляемого током.

3. В базу данных заносятся минимально допустимые значения измеряемых частотных и временных параметров.

4. После выполнения измерений из аппаратной части АПК в программу обработки результатов передаются полученные значения частотных и временных параметров ОУ:

- максимальные скорости нарастания  $v_{U_{\text{вых max } \phi}}$  и спада  $v_{U_{\text{вых max } \text{сп}}}$  выходного напряжения ОУ; при передаче в программу составления макромоделей ОУ этим параметрам присваиваются употребляемые в Spice-совместимых программах схемотехнического моделирования наименования:  $SRp$  и  $SRm$ ;

- частота единичного усиления  $f_1$ ; при составлении макромоделей ОУ этому параметру присваивается наименование  $f_{0dB}$ ;

- запас устойчивости по фазе на частоте единичного усиления  $\phi_0$ ; при составлении макромоделей ОУ этому параметру присваивается наименование  $Phi$ .

Принимается также измеренное значение напряжения смещения  $U_{os}$ , которое указывается в паспорте ОУ.

5. По результатам сравнения измеренных и минимально допустимых значений динамических параметров ОУ программой принимается решение о соответствии (или несоответствии) исследуемого экземпляра ОУ требованиям технических условий, а в случае соответствия – также о принадлежности данного ОУ к той или иной группе рассортировки по измеренным значениям частотных и временных параметров.

6. Программой создается файл паспорта ОУ со списком типовых (или измеренных другими средствами) статических параметров и измеренных рассматриваемым АПК частотных и временных параметров.

7. Список статических и динамических параметров ОУ передается в программу оперативного автоматизированного создания макромодели исследуемого экземпляра ОУ в соответствии с разработанной авторами методикой. Отличительной особенностью предлагаемой версии методики является то, что получены расчетные соотношения не только для ОУ с полевыми транзисторами во входном дифференциальном каскаде (как это было в предыдущих версиях методики [4–6]), но и для ОУ с биполярными транзисторами.

## 2. Методика расчета макромодели ОУ с учетом результатов измерений динамических параметров ОУ

Предлагаемая методика позволяет рассчитать параметры элементов макромодели ОУ, построенных по топологии Бойла [7] в уточненной редакции [8]. В предлагаемой методике используются соотношения, позволяющие выразить параметры элементов макромодели непосредственно через статические и динамические параметры ОУ, без многоступенчатых подстановок для определения параметров одних элементов макромодели через параметры других элементов. Ниже приведены расчетные соотношения для макромодели ОУ с биполярными транзисторами во входном дифференциальном каскаде. Топология макромодели ОУ с *n-p-n*-транзисторами показана на рис. 1:

1. Емкость  $C1$ , позволяющая воспроизвести двухполюсный характер амплитудно-частотной характеристики ОУ:

$$C1 = \frac{C_c}{2} \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi \cdot (90 - \Phi)}{180} \right), \quad (1)$$

где  $\Phi$  – измеренное значение запаса устойчивости ОУ по фазе.

2. Емкость  $C2$  внутренней частотной коррекции,  $C2 = C_c$ .

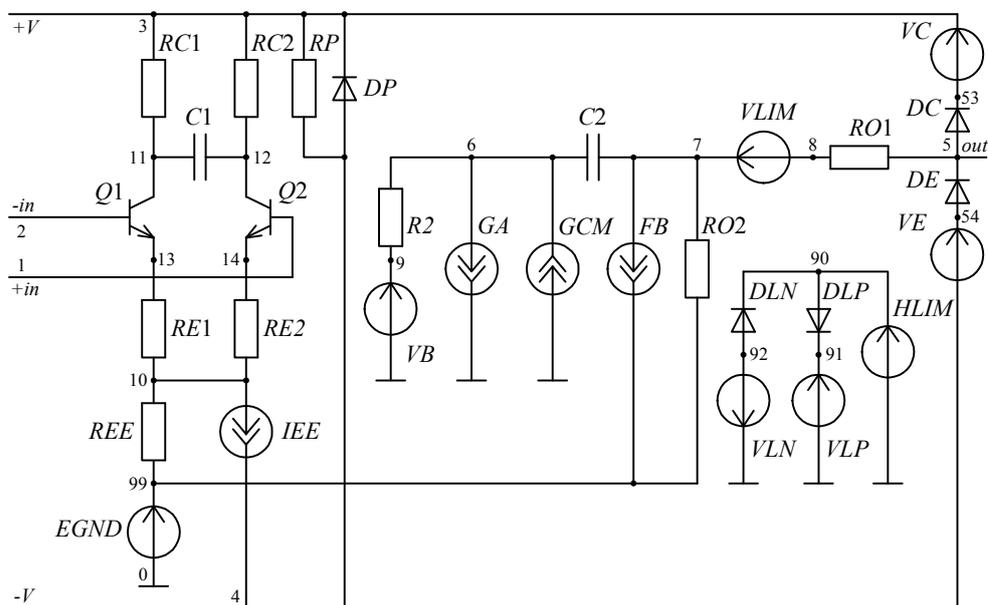


Рис. 1. Топология макромодели ОУ с биполярными *n-p-n*-транзисторами во входном дифференциальном каскаде

3. Диоды  $DC$ ,  $DE$ ,  $DLP$ ,  $DLN$  и  $DP$  представляются моделью  $dx$ , имеющей параметры, принятые по умолчанию для полупроводникового диода в программе PSpice, с единственным отличием: значение тока насыщения при температуре  $27^\circ\text{C}$  принимается равным  $I_s = 8 \cdot 10^{-16}$  А.

4. Выходное напряжение  $V_{EGND}$  нелинейного источника напряжения  $EGND$ , управляемого напряжением:

$$V_{EGND} = egnd1 \cdot V_{pwrp} + egnd2 \cdot V_{pwrm}, \quad (2)$$

где  $egnd1$ ,  $egnd2$  – коэффициенты передачи;  $egnd1 = egnd2 = 0,5$ ;  $V_{pwrp}$  и  $V_{pwrm}$  – номинальные значения напряжений питания положительной и отрицательной полярности, взятые из базы исходных данных.

5. Выходной ток  $I_{FB}$  нелинейного источника тока  $FB$ , управляемого током:

$$I_{FB} = fb0 + fb1 \cdot I_{VB} - fb2 \cdot I_{VC} + fb3 \cdot I_{VE} + fb4 \cdot I_{VLP} - fb5 \cdot I_{VLN}, \quad (3)$$

где  $fb0 = 0$ ;  $fb1$ ,  $fb2$ ,  $fb3$ ,  $fb4$ ,  $fb5$  – коэффициенты полинома, имеющие физический смысл коэффициентов передачи источника тока, управляемого токами  $I_{VB}$ ,  $I_{VC}$ ,  $I_{VE}$ ,  $I_{VLP}$ ,  $I_{VLN}$ , протекающими через источники напряжений  $VB$ ,  $VC$ ,  $VE$ ,  $VLP$  и  $VLN$ . Эти токи рассчитываются программой схемотехнического моделирования (Pspice, OrCAD, Multisim и т.п.) при использовании макромодели ОУ во время исследования электронных схем.

Значения коэффициентов  $fb2$ ,  $fb3$ ,  $fb4$ ,  $fb5$  берутся из базы исходных данных. Значение коэффициента  $fb1$  рассчитывается по формуле

$$fb1 = \frac{Avdc}{2\pi \cdot f_{0dB} \cdot Cc \cdot (R_{odc} - R_{oac})}, \quad (4)$$

где  $Avdc$  – типовое значение коэффициента усиления из базы данных;  $f_{0dB}$  – измеренное значение частоты единичного усиления ОУ;  $R_2 = 100 \cdot 10^3$  Ом – сопротивление, одинаковое для моделей всех ОУ;  $R_{odc}$  и  $R_{oac}$  – взятые из базы исходных данных типовые значения выходных сопротивлений ОУ на низких и высоких частотах.

6. Выходной ток  $I_{GA}$  линейного источника тока  $GA$ , управляемого напряжением:

$$I_{GA} = ga \cdot (V(11) - V(12)), \quad (5)$$

где  $ga$ , 1/Ом, – коэффициент передачи источника тока  $GA$ , управляемого напряжением,

$$ga = 2\pi \cdot f_{0dB} \cdot Cc; \quad (6)$$

$V(11)$ ,  $V(12)$  – напряжения в узлах 11 и 12 макромодели, рассчитываемые программой во время моделирования.

7. Выходной ток  $I_{GCM}$  линейного источника тока  $GCM$ , управляемого напряжением

$$I_{GCM} = g_{cm} \cdot (V(10) - V(99)), \quad (7)$$

где  $g_{cm}$ , 1/Ом, – коэффициент передачи источника тока  $GCM$ , управляемого напряжением,

$$g_{cm} = \frac{2\pi \cdot f_{0dB} \cdot Cc}{CMRR}, \quad (8)$$

здесь  $CMRR$  – типовое значение коэффициента ослабления синфазного сигнала;  $V(10), V(99)$  – напряжения в узлах 10 и 99 макромодели, рассчитываемые программой во время моделирования.

8. Выходной ток  $I_{ee}$  независимого источника постоянного тока  $IEE$ :

$$I_{ee} = 2Ib + Cc \cdot SRp, \quad (9)$$

где  $Ib$  – типовое значение входного тока смещения ОУ из базы данных;  $SRp$  – измеренное значение максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ.

Если измеренные значения скоростей нарастания  $SRp$  и спада  $SRm$  различны, то при создании макромоделей в рассматриваемой методике принимается условие равенства этих скоростей меньшей из них, т.е. за  $SRp$  принимается меньшее из значений скоростей. В случае необходимости адекватного воспроизведения асимметрии скоростей нарастания и спада выходного напряжения ОУ следует использовать модифицированную макромодель ОУ, предложенную в [9].

9. Выходное напряжение  $V_{HLIM}$  линейного источника напряжения  $HLIM$ , управляемого током:

$$V_{HLIM} = hlim \cdot I_{VLIM}, \quad (10)$$

где  $hlim = 10^3$  Ом – коэффициент передачи, одинаковый для моделей всех ОУ;  $I_{VLIM}$  – ток, протекающий через источник напряжения  $VLIM$  и рассчитываемый программой во время моделирования.

10. Транзисторы  $Q1$  и  $Q2$  представляются моделью  $qx$ , имеющей параметры, принятые по умолчанию для биполярного транзистора в программе PSpice, со следующими отличиями:

– значение тока насыщения при температуре 27 °С принимается равным  $I_s = 8 \cdot 10^{-16}$  А ;

– коэффициент усиления тока  $Bf$  рассчитывается по формуле

$$Bf = \frac{Cc \cdot SRp}{2 Ib}. \quad (11)$$

11. Сопротивление  $R2 = 100 \cdot 10^3$  Ом – одинаковое для всех моделей ОУ;

12. Сопротивления  $Rc1$ ,  $Rc2$  резисторов  $RC1$  и  $RC2$ :

$$Rc1 = Rc2 = \frac{1}{2\pi \cdot f_{0dB} \cdot Cc}. \quad (12)$$

13. Сопротивления  $Re1$ ,  $Re2$  резисторов  $RE1$  и  $RE2$ :

$$Re1 = Re2 = \frac{2Cc \cdot SRp \cdot Ib}{2Cc \cdot SRp \cdot Ib + 4Ib^2} \cdot \left( \frac{1}{2\pi f_{0dB} \cdot Cc} - \frac{2k \cdot T}{Cc \cdot SRp \cdot q} \right), \quad (13)$$

где  $k = 1,38065 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура, К;  $q = 1,60218 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона.

14. Сопротивление  $Re e$  резистора  $REE$ :

$$Re e = \frac{U_A}{2Ib + Cc \cdot SRp}. \quad (14)$$

где  $U_A = 200$  В – напряжение Эрли.

15. Сопротивления  $Ro1$ ,  $Ro2$  резисторов  $RO1$  и  $RO2$ :

$$Ro1 = Roac; Ro2 = Rodc - Roac. \quad (15)$$

16. Сопротивление  $Rp$  резистора  $RP$ :

$$Rp = \frac{(Vpwrp - Vpwrp)^2}{Pd - Vpwrp \cdot SRp \cdot Cc - Vpwrp \cdot (2Ib + Cc \cdot SRp)}, \quad (16)$$

где  $Pd$  – типовое значение потребляемой мощности, взятое из базы данных.

17. Выходные напряжения независимых источников постоянного напряжения  $VB$  и  $V_{LIM}$  равны нулю:  $Vb = 0$ ,  $V_{lim} = 0$ .

Эти источники напряжения выступают в качестве «датчиков токов», протекающих через них. Токи  $I_{VB}$  и  $I_{V_{LIM}}$ , которые протекают через эти источники, выступают в качестве управляющих токов для управляемого источника тока  $FB$  и управляемого источника напряжения  $HLIM$ .

18. Выходные напряжения  $Vc, Ve$  независимых источников постоянного напряжения  $VC$  и  $VE$ :

$$Vc = Vpwrp - Voutp; Ve = -(Vpwrp - Voutm). \quad (17)$$

19. Выходные напряжения  $Vlp, Vln$  независимых источников постоянного напряжения  $VLP$  и  $VLN$ :

$$Vlp = Vln = Ios \cdot h \lim. \quad (18)$$

В качестве примера рассмотрим расчет макромодели ОУ  $\mu A741$  [10].

Исходные данные, помещенные в базу данных:

$$Vpwrp = 15 \text{ В}; Vpwrp = -15 \text{ В}; Ib = 100 \cdot 10^{-9} \text{ А}; Voutp = 15 \text{ В};$$

$$Voutm = -15 \text{ В}; Pd = 0,05 \text{ Вт}; Avdc = 200 \cdot 10^3; CMRR = 100 \cdot 10^3;$$

$$Rodc = 75 \text{ Ом}; Roac = 50 \text{ Ом}; Ios = 20 \cdot 10^{-3} \text{ А};$$

$$Cc = 30 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}; fb2 = -40 \cdot 10^6; fb3 = 40 \cdot 10^6;$$

$$fb4 = 40 \cdot 10^6; fb5 = -40 \cdot 10^6; T = 300 \text{ К}.$$

Измеренные динамические параметры:

$$SRp = 0,5 \cdot 10^6 \text{ В/с}; f_{0dB} = 1 \cdot 10^6 \text{ Гц}; \Phi = 60^\circ.$$

Параметры макромодели:

$$C1 = 8,66 \cdot 10^{-12} \text{ Ф};$$

$$C2 = 30 \cdot 10^{-12} \text{ Ф};$$

$$I_s = 8 \cdot 10^{-16} \text{ А};$$

$$egnd1 = egnd2 = 0,5;$$

$$fb0 = 0; fb1 = 42,44 \cdot 10^6; fb2 = -40 \cdot 10^6; fb3 = 40 \cdot 10^6;$$

$$fb4 = 40 \cdot 10^6; fb5 = -40 \cdot 10^6;$$

$$ga = 188,5 \cdot 10^{-6}, 1/\text{Ом};$$

$$gcm = 1,885 \cdot 10^{-9}, 1/\text{Ом};$$

$$iee = 15,2 \cdot 10^{-6}, \text{ А};$$

$$hlim = 10^3 \text{ Ом};$$

$$Bf = 75;$$

$$R2 = 100 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$Rc1 = Rc2 = 5,305 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$Re1 = Re2 = 1,834 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$Ree = 13,16 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$Ro1 = 50 \text{ Ом};$$

$$Ro2 = 25 \text{ Ом};$$

$$Rp = 18,0 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$Vb = 0;$$

$$Vc = 2 \text{ В};$$

$$Ve = 2 \text{ В};$$

$$Vlim = 0;$$

$$Vlp = Vln = 20 \text{ В}.$$

Параметры макромодели ОУ uA741, полученные в результате расчета по данной методике, отличаются от параметров макромодели, полученной с помощью программы Parts пакета PSpice, не более чем на 1 %. При этом использование предложенной методики позволяет автоматизировать создание макромодели. Для составления полного текстового описания макромодели ОУ по результатам расчета параметров ее элементов создан бланк-файл, где курсивом обозначены вставляемые программой исходные данные, измеренные параметры, а также параметры макромодели, рассчитанные в соответствии с предложенной методикой.

Бланк-файл «Spice-модель ОУ с биполярными транзисторами во входном каскаде»:

```
* Spice-модель ОУ name Экземпляр # Дата
*Исходные данные: Vpwrp =; Vpwrn =; Ib =; Voutp =; Voutn =; Pd =; Avdc =;
CMRR =; Rodc =; Roac =; Ios =; Cc =; fb2 =; fb3 =; fb4 =; fb5 =; T =
*Измеренные параметры: SRp =; f0dB =; Phi =
*
* connections: non-inverting input
*               | inverting input
*               | | positive power supply
*               | | | negative power supply
*               | | | | output
*               | | | | |
.subckt name # 1 2 3 4 5
*
c1 11 12 C1
c2 6 7 C2
dc 5 53 dx
de 54 5 dx
dlp 90 91 dx
dln 92 90 dx
dp 4 3 dx
egnd 99 0 poly(2) (3,0) (4,0) 0 egnd1 egnd2
fb 7 99 poly(5) vb vc ve vlp vln fb0 fb1 fb2 fb3 fb4 fb5
ga 6 0 11 12 ga
gcm 0 6 10 99 gcm
iee 10 4 dc iee
hlim 90 0 vlim hlim=1K
q1 11 2 13 qx
q2 12 1 14 qx
r2 6 9 R2=100K
rc1 3 11 Rc1
rc2 3 12 Rc2
re1 13 10 Re1
re2 14 10 Re2
ree 10 99 Ree
ro1 8 5 Ro1
ro2 7 99 Ro2
rp 3 4 Rp
vb 9 0 dc 0
vc 3 53 dc Vc
ve 54 4 dc Ve
vlim 7 8 dc 0
vlp 91 0 dc Vlp
vln 0 92 dc Vln
.model dx D(Is=8.00E-16)
.model qx NPN(Is=8.00E-16 Bf)
.ends
```

Полученное текстовое описание макромодели ОУ с биполярными транзисторами во входном дифференциальном каскаде может использоваться для моделирования электронных схем с применением любых Spice-совместимых программ схемотехнического моделирования. Данная методика применима

также для ОУ с *p-n-p*-транзисторами во входном дифференциальном каскаде; отличается только топология макромодели. Аналогичным образом составлена методика для ОУ с полевыми транзисторами во входном дифференциальном каскаде.

### Заключение

Разработана методика автоматизированной обработки результатов измерений частотных и временных параметров ОУ, все процедуры которой выполняются в программной среде LabVIEW National Instruments. Для этого разработаны необходимые программы и виртуальные приборы [11]. Тестирование разработанной программной реализации предложенной методики показало ее работоспособность и эффективность.

### Список литературы

1. Измерители динамических параметров операционных усилителей / А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, В. В. Комаров // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 100–102.
2. OrCAD PSPICE A/D. User's Guide. Reference Manual. OrCAD, Inc., 1998. – URL: <http://users.ntua.gr/manias/PSPICE-4.pdf>.
3. Сапунов, Е. В. Автоматизированное измерение статических параметров операционных усилителей / Е. В. Сапунов // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. «Шлядинские чтения – 2014». – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – С. 126, 127.
4. Методика обработки результатов измерений параметров операционного усилителя / А. В. Светлов, С. Ю. Байдаров, В. В. Комаров, М. Ю. Паршуков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 4. – С. 128–140.
5. Сапунов, Е. В. Обработка результатов измерений параметров операционных усилителей / Е. В. Сапунов, А. В. Светлов // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments NIDays-2014 : сб. тр. XIII Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 19-20 ноября 2014 г. – М. : ДМК Пресс, 2014. – С. 369–371.
6. Sapunov, E. V. Processing the results of measurements of operational amplifier parameters / E. V. Sapunov, A. V. Svetlov // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings. – Omsk State Technical University Omsk; Russian Federation. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147326.
7. Boyle, G. Macromodeling of integrated circuit operational amplifiers / G. Boyle, B. Cohn, D. Pederson, J. Solomon // IEEE journal of solid state circuits. – 1974. – Vol. SC-9. – № 6. – P. 353–364.
8. Mark, A. SPICE-Compatible Op Amp Macro-Models / Alexander Mark, Derek F. Bowers // Application Note AN-138, Analog Devices. – 1990, February. – P. 155–170.
9. Андреев, А. Н. Макромодель операционного усилителя для моделирования измерительных цепей с импульсными сигналами / А. Н. Андреев, В. А. Казаков, А. В. Светлов // Измерительная техника. – 1999. – № 9. – С. 26–29.
10.  $\mu$ A741 General-Purpose Operational Amplifiers. – Texas Instruments, Inc., 2015. – URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ua741.pdf>.
11. Программа расчета и составления макромодели операционного усилителя в среде графического программирования LabVIEW / Е. В. Сапунов, А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, В. В. Комаров // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments – 2012 : сб. тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. – М. : ДМК Пресс, 2012. – С. 447–449.

References

1. Svetlov A. V., Parshukov M. Yu., Sapunov E. V., Komarov V. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International symposium "Reliability and Quality"]. 2014, vol. 2, pp. 100–102.
2. *OrCAD PSPICE A/D. User's Guide. Reference Manual*. OrCAD, Inc., 1998. Available at: <http://users.ntua.gr/manias/PSPICE-4.pdf>.
3. Sapunov E. V. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii: sb. nauch. st. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Shlyandinskie chteniya – 2014»* [Methods, means and technologies of measurement data acquisition and processing: proceedings of the International scientific and technical conference "Shlyandinskie readings 2014"]. Penza: Izd-vo PGU, 2014, pp. 126, 127.
4. Svetlov A. V., Baydarov S. Yu., Komarov V. V., Parshukov M. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2011, no. 4, pp. 128–140.
5. Sapunov E. V., Svetlov A. V. *Inzhenernye i nauchnye prilozheniya na baze tekhnologiy National Instruments NIDays-2014: sb. tr. XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Moskva, 19-20 noyabrya 2014 g.* [Engineering and scientific applications of National Instruments NIDays-2014: proceedings of XIII International scientific and practical conference, Moscow, 19-20 November 2014]. Moscow: DMK Press, 2014, pp. 369–371.
6. Sapunov E. V., Svetlov A. V. *International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings. – Omsk State Technical University Omsk; Russian Federation*. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147326.
7. Boyle G., Cohn B., Pederson D., Solomon J. *IEEE journal of solid state circuits*. 1974, vol. SC-9, no. 6, pp. 353–364.
8. Mark A., Bowers Derek F. *Application Note AN-138, Analog Devices*. 1990, February, pp. 155–170.
9. Andreev A. N., Kazakov V. A., Svetlov A. V. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment]. 1999, no. 9, pp. 26–29.
10. *µA741 General-Purpose Operational Amplifiers*. Texas Instruments, Inc., 2015. Available at: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ua741.pdf>.
11. Sapunov E. V., Svetlov A. V., Parshukov M. Yu., Komarov V. V. *Inzhenernye i nauchnye prilozheniya na baze tekhnologiy National Instruments – 2012: sb. tr. XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Engineering and scientific applications of National Instruments technologies-2012: proceedings of XI International scientific and practical conference]. Moscow: DMK Press, 2012, pp. 447–449.

---

**Паршуков Максим Юрьевич**

инженер, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: [rtech@pnzgu](mailto:rtech@pnzgu)

**Parshukov Maksim Yur'evich**

Engineer, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia )

**Сапунев Евгений Владимирович**

инженер, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: [rtech@pnzgu](mailto:rtech@pnzgu)

**Sapunov Evgeniy Vladimirovich**

Engineer, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia )

**Светлов Анатолий Вильевич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой радиотехники  
и радиоэлектронных систем, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu

**Svetlov Anatoliy Vil'evich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
head of sub-department of radio engineering  
and radio electronic systems, Penza  
State University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia )

---

УДК 621.317.3

**Паршуков, М. Ю.**

**Обработка результатов измерений частотных и временных параметров операционных усилителей / М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 112–123. DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-10**

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

---

УДК 621

DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-11

*Т. С. Будимилова, В. Я. Савицкий, А. Ю. Муйземнек, Р. С. Зиновьев*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ С ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ РЕЖИМАМИ НАГРУЖЕНИЯ

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Высокие эксплуатационные свойства и экономическая привлекательность способствуют широкому применению полимерных композиционных материалов (ПКМ) в изделиях различного функционального назначения. Конкурентоспособная технологичность изготовления подшипников скольжения (ПС) из ПКМ придает важность триботехническим исследованиям этих материалов. Предмет исследования составили закономерности изменения коэффициента трения ПС из ПКМ в зависимости от нагрузки и скорости в зоне трения. Цель работы – оценка возможности повышения фрикционно-износных характеристик тяжело нагруженных ПС из ПКМ при соблюдении условий бездефектности изготовления.

*Материалы и методы.* Дан анализ причин возникновения дефектов при изготовлении ПС методом намотки ленты из ПКМ на всех этапах технологического процесса. Обоснована важность теоретико-экспериментальных исследований изменения физико-механических характеристик изделий из ПКМ как на стадии производства, так и на стадии эксплуатации в экстремальных условиях.

*Результаты.* Приведены результаты моделирования поведения трибосопряжения «вал – втулка» при различных режимах нагружения в условиях сухого трения. Установлены пограничные значения давления и скорости, превышение которых приводит к схватыванию фрикционных поверхностей.

*Вывод.* Дальнейшее повышение смазывающих свойств ПС из ПКМ возможно путем их промасливания на заключительной операции изготовления.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, подшипник скольжения, условия бездефектности технологического процесса, физическое моделирование, «вал – втулка», фрикционное взаимодействие, режимы нагружения, триботехнические характеристики.

*T. S. Budimirova, V. Ya. Savitskiy, A. Yu. Muizemnek, R. S. Zinov'ev*

## STUDYING THE INTERRELATION BETWEEN THE TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING POLYMER SLIDING BEARINGS AND OPERATIONAL LOADING CONDITIONS

**Abstract.**

*Background.* High operating properties and economic attractiveness encourage the wide use of polymeric composite materials (PCM) for products of various applications. Competitive manufacturability of PCM sliding bearings (SB) production motivates tribological investigations of the materials. Patterns of friction coefficients changing with speed and loading intensity in a friction area of PCM SB is the subject of our research. The goal of the work is to estimate the possibility of increasing friction and wear characteristics of the heavily loaded sliding bearings made of PCM under the conditions of defect-free manufacture.

*Materials and methods.* The analysis of causes of manufacturing defects in sliding bearings production is given for the stages in technological process of PCM strip winding. The importance of theoretical and experimental studies of physical and mechanical properties of products made of PCM at the stages of production and operation at extreme conditions is substantiated.

*Results.* The results of modeling the behavior of «shaft-sleeve» tribological conjunction under different operational loading conditions in the presence of dry friction are shown. Critical values of pressure and speed are established. Exceeding critical values will lead to friction surfaces gripping.

*Conclusions.* A further increase of lubricating properties of sliding bearings made of PCM is possible through treating SB with oil at the final operation of manufacturing.

**Key words:** polymer composite materials, sliding bearing, defect-free manufacture conditions, physical modelling, «shaft-sleeve», frictional interrelation, loading modes, tribological characteristics.

**Введение**

Композиционные материалы, как известно, представляют собой гетерогенные среды, жесткость и прочность которых определяются армирующими элементами, а совместная работа этих элементов обеспечивается изотропной матрицей, чаще всего полимерной. Высокая прочность, легкость, стойкость к внешним воздействиям и технологичность полимерных композиционных материалов (ПКМ) обеспечивают в ряде случаев их общепризнанные преимущества по сравнению с традиционными конструкционными материалами. Особое место в ряду полимерных антифрикционных материалов занимают армированные реактопласты, образованные послойной намоткой непрерывных волокон, ленточных или тканых наполнителей. Возможность создания материала одновременно с образованием конструкции подшипника скольжения (ПС), избирательного формирования структурных, физических и механических характеристик открывает широкие перспективы внедрения в практику машиностроения нового класса антифрикционных материалов.

Применение ПКМ в тяжело нагруженных ПС, работающих без смазки, способствует решению многих технических и экономических проблем, основными из которых являются экономия дефицитных медьсодержащих сплавов, снижение стоимости, повышение износостойкости, увеличение срока эксплуатации машин и уменьшение расхода запасных частей. Для этого ПКМ должны обладать высокой прочностью, температурной стойкостью при фрикционном разогреве, хорошей технологичностью. Исходные компоненты для изготовления ПС из ПКМ должны быть отечественного производства и недефицитными.

Выполнение этих требований можно достичь созданием многофункционального материала, состоящего из ряда последовательно изготовленных слоев, где каждый слой несет определенную функциональную нагрузку, а соединенные все вместе образуют монолитную конструкцию, обеспечивая выполнение требований рационального проектирования. В основе технологической реализации такой конструкции ПС лежит минимизация производственных дефектов.

### **1. Основы реализации бездефектной технологии изготовления полимерных подшипников скольжения**

Технологический процесс (ТП) преобразования ПКМ в конструкцию ПС методом намотки можно представить эволюционной последовательностью этапов, приводящих к качественным структурным изменениям на границах переходов: входного контроля исходных компонентов; подготовки наполнителей и изготовления связующего; изготовления препрега; намотки трубчатой заготовки; отверждения трубчатой заготовки; механической обработки – изготовления подшипника; контроля качества готовой продукции.

В рамках такого подхода сформированы все теории [1–6], охватывающие процесс переработки ПКМ в целом. Они рассматривают процесс переработки как несколько характерных участков равновесного состояния структуры, которого невозможно достичь без изменения удельного объема материала. Изменению этого объема препятствуют различные внешние и внутренние факторы, вследствие чего в структуре возникают начальные напряжения, нередко приводящие к нарушению сплошности полимерной матрицы и кольцевой ориентации армирующего наполнителя. Такие участки равновесного состояния можно выделить на характерных этапах технологического процесса переработки ПКМ [7].

В рамках входного контроля важно не допустить несоответствие свойств исходных производственных материалов требованиям сертификатов, что обуславливает повышение дефектности ПКМ в готовом изделии.

Подготовка наполнителей во многом определяется качеством удаления текстильных замасливателей, аппретирования и сушки. Гидрофобно-адгезионная модификация поверхности стеклянных лент и тканей, включающая в себя термическую обработку с целью удаления парафиновой эмульсии (расшлихтовку), нанесение аппретов, способствующих химическому взаимодействию как с силанольными группами на поверхности волокон, так и со связующим, повышает прочностные свойства стеклопластиков на 25–30 % без снижения стабильности физико-механических характеристик [6]. Расшлихтовку проводят при температурах 400–500 °С в течение 2–4 ч до содержания замасливателя не более 0,25 %. Негативные последствия воздействия влаги в процессе переработки ПКМ проявляются в нарушении монолитности полимерной матрицы (повышенная пористость, неприклеи на границе раздела компонентов, трещины и межслоевые расслоения), эффективной пластификации связующего и снижении его температуры стеклования [4, 6, 8, 9].

На этапе изготовления связующего закладываются основы стабильности свойств материала в изделиях. Воспроизводимость физико-механических характеристик ПКМ во многом обеспечивается точностью дозировки, равномерностью смешения составляющих компонентов, отличающихся между со-

бой плотностью и вязкостью, отсутствием в приготовленном связующем воздушных пузырьков кавитационного происхождения и инородных включений.

Основные задачи операции пропитки наполнителя (изготовления препрега) – обеспечить полное заполнение связующим всех межволоконных пространств и получить требуемое соотношение армирующего и матричного материалов. При изготовлении препрега сушильная операция направлена на придание пропитанному наполнителю вязкопластичного состояния. Технологическая реализация операции изготовления препрега осуществляется протягиванием армирующего наполнителя через ванночку со связующим. Трубочатая заготовка заданной длины образуется путем послойного нанесения на вращающуюся технологическую оправку пропитанного наполнителя. С увеличением диаметра наматываемой заготовки обеспечивать необходимое давление формования становится проблематично из-за ограниченной прочности наносимого препрега. В таких случаях уплотнение создают прикаточным роликом в зоне контакта наматываемого препрега с поверхностью заготовки.

Предварительное уплотнение структуры, реализуемое на этом этапе, является обязательным для любого способа формования изделий. На этом этапе закладываются основы высокого качества изделия – требуемой формы и размеров, необходимых физико-химических и механических свойств. Преднамеренное создание в заготовке в процессе ее намотки полей деформаций и напряжений, обеспечиваемое предварительным уплотнением структуры и компенсирующее на всех последующих этапах возможные отрицательные последствия усадочных явлений, является эффективным средством для борьбы с образованием дефектов типа текстурной волнистости, расслоений, раковин, непроклеев и т.п. [7].

При отверждении заготовки в электропечах происходит уплотнение материала и, как следствие, падение предварительного натяжения армирующих элементов. Последующее охлаждение до температуры стеклования полимерной матрицы сопровождается развитием деформаций в неоднородной среде с нестабильными (зависящими от температуры) свойствами и возникновением усадочных явлений.

Механические явления, протекающие на отдельных этапах технологического процесса переработки, рассматриваются во многих работах: В. В. Болотина, Г. А. Ванина, В. В. Васильева, Н. С. Ениколопова, Ю. Н. Работнова, Ю. М. Тарнопольского, В. Т. Томашевского, В. С. Яковлева, В. Н. Шалыгина. Результаты исследований, изложенные в работах этих ученых, позволяют представить физическую сущность процессов на каждом из рассмотренных этапов ТП. Сложность получения практических рекомендаций по этим исследованиям обусловлена отсутствием физико-механических характеристик полуфабрикатов на каждом из этапов, необходимых для анализа механических явлений, а также специального оборудования и соответствующей аппаратуры для экспериментальной проверки процессов, происходящих в этих явлениях.

## **2. Экспериментальные исследования влияния режимов нагружения на работоспособность подшипника скольжения**

Выбор материала для разрабатываемой вновь конструкции ПС неизбежно связан с проведением сравнительной оценки его свойств. Чтобы отдать предпочтение какому-либо материалу, проводится комплексный анализ ме-

ханических, теплофизических и триботехнических свойств материалов, их зависимости от изменения условий эксплуатации. В этой связи сравнительную оценку материалов целесообразно проводить для конкретной конструкции узла трения и условий его эксплуатации. Каждый из анализируемых классов материалов занимает свое «поле», в пределах которого его использование наиболее эффективно, и задачей материаловедов и технологов является расширение границ этого поля. Значимость меры оценки каждого отдельно взятого материала подшипника скольжения для конкретной конструкции узла трения и условий эксплуатации может быть различной. Так, например, известен опыт успешного использования капроновых подшипников в катках опорно-поворотного устройства порталных кранов, блоков успокоителя грейфера и противовеса кабельного барабана [5]. Скорость скольжения в этих трибосопряжениях составляет 0,08–0,25 м/с, а давление не превышает 10 МПа. В то же время ограниченная теплостойкость и повышенная хрупкость при температурах ниже 253 К, повышенная склонность к естественному и искусственному старению и относительно низкая прочность при сжатии ограничивают применение этих материалов в тяжело нагруженных узлах трения, эксплуатация которых осуществляется в разнообразных климатических условиях. Нестабильность размеров подшипников из полиамидов в процессе эксплуатации, обусловленная повышенными значениями коэффициента линейного температурного расширения и изменением линейных размеров при изменении влажности окружающей среды, вызывает необходимость увеличения начального сборочного зазора в трибосопряжении, что не всегда желательно с точки зрения эксплуатации.

В последнее время из-за нарастающего дефицита и высокой стоимости цветных металлов становится актуальной проблема изыскания материалов-заменителей, не уступающих бронзам и латуням по прочностным характеристикам. И особенно остро эта проблема возникает в эксплуатирующих предприятиях при ремонте машин и восстановлении изношенных деталей. Известно, что ведущие зарубежные фирмы (*Caterpillar, Kamatsu, Marion*) достаточно широко используют ПКМ в конструкциях узлов трения горнодобывающей, дорожно-строительной, автомобильной техники. Именно ПКМ для ПС, работающих в условиях граничного и сухого трения, не уступающие по физико-механическим и антифрикционным свойствам медесодержащим сплавам, изготовленные из доступного и серийно выпускаемого сырья и экономически эффективные в изготовлении, могут найти широкое применение в узлах трения этих машин. Сравнительный анализ вновь разрабатываемых узлов трения на основе подшипников скольжения из ПКМ с подшипниками из цветных металлов, пределы совершенствования которых почти полностью исчерпаны, выявляет очевидные преимущества композитов, использование которых позволяет повысить технические характеристики узлов трения и агрегатов в целом [7].

В рамках рассмотренного ТП были изготовлены две партии ПС (табл. 1), у которых внутренний слой был изготовлен из двух слоев ленты ЛУ-П/0,2. При изготовлении ПС партии № 1 слои ленты ЛУ-П/0,2 наматывались под углом 90°, а при изготовлении партии № 2 – 45°. Корпус ПС изготавливался из стеклоткани марки Т-10НТ-14. Материал связующего в обоих случаях – эпоксифенолформальдегидная смола.

Таблица 1

## Характеристика изготовленных ПС

№ партии	Тип наполнителя	Количество слоев	Толщина монослоя, мм	Схема армирования
1	ЛУ-П/0,2	2	0,15	90/2
	стеклоткань	19	0,25	90/19
2	ЛУ-П/0,2	2	0,15	45/2
	стеклоткань	19	0,25	90/19

Схема модельного узла одностороннего трения типа «вал–втулка» (рис. 1) была реализована на специальной машине трения 2070 СМТ-1 с использованием камеры, воспроизводящей условия закрытого узла трения.

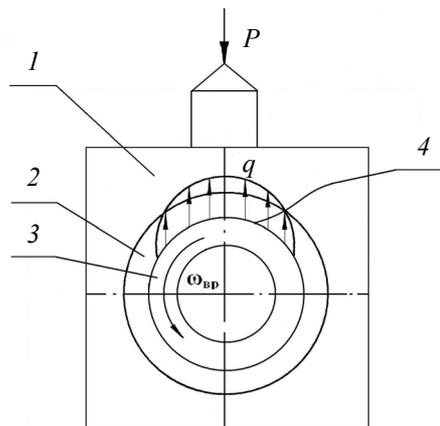


Рис. 1. Схема модельного узла трения

Расчет давления  $q$  на пятне контакта проводился при фиксированных значениях нормальной нагрузки  $P$ , определяющих режимы испытаний, по формуле

$$q = P/A_r, \quad (1)$$

где  $A_r$  – геометрическая площадь контакта.

Коэффициент трения  $f$  исследуемого материала рассчитывался по формуле

$$f = M_{\text{тр}}/FR, \quad (2)$$

где  $M_{\text{тр}}$  – момент трения на образце;  $R$  – радиус поверхности трения, равный 0,02 м.

Анализ совместного влияния эксплуатационных факторов  $[q, v]$ , определяющих экстремальный режим эксплуатации исследуемого узла трения, включал фиксацию давления  $q$  на определенном значении и изменение скорости трения  $v$  до такого значения, при котором еще обеспечивалась стабильность триботехнических характеристик.

Определение диапазонов рабочих режимов исследуемых ПС проводилось следующим образом:

1) устанавливались входные параметры: время испытаний для обоих образцов – 8 мин; нормальная нагрузка фиксировалась в семи точках;

2) определялись выходные параметры: момент трения (с помощью электронного потенциометра и самописца машины трения 2070 СМТ-1); контактное давление вычислялось по формуле (1); коэффициент трения – по формуле (2); измерялась площадь пятна контакта.

С использованием результатов экспериментальных исследований оценивалось семь значений  $(q \cdot v)$ -факторов на границе работоспособности трибосопряжений.

Методика испытаний состояла в следующем:

1. Поверхности образцов обезжиривались и просушивались.

2. Образец (втулка из ПКМ) и контрообразец (вал из стали 40Х) закреплялись в держателе машины трения 2070 СМТ-1 в соответствии с установленными требованиями [10].

3. Пуск машины производился в следующей последовательности: задавалась требуемая скорость вращения шпинделя испытательной установки, обеспечивающая необходимые параметры вращательного движения; нагрузка подавалась плавно от винта механизма нагружения через рычаг испытательной камеры, контроль значения требуемой нагрузки осуществлялся по встроенному миллиамперметру стойки управления машины трения; включался самописец стойки управления для записи значений момента трения.

4. После 8 мин испытаний или при достижении предельного момента трения (его значение резко возрастало) машина трения отключалась в обратной последовательности.

5. После каждого опыта проводился анализ состояния поверхностей трения и значений выходных параметров с соответствующими записями в журнал испытаний и обработкой результатов эксперимента по установленной форме.

6. Испытаниям подвергались образцы из двух партий (табл. 2, 3).

Таблица 2  
Исследование триботехнических характеристик ПС партии № 1

$P$ , Н	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$v$ , м/с	$M_{тр}$ , Нм	$f_{тр}$	$A_r$ , см <sup>2</sup>	$q$ , МПа	$q \cdot v$ , МПа·м/с
3000	57	0,12	14,3	0,24	–	2,44	0,29
2000	72	0,15	11,2	0,27	12,24	1,63	0,24
1500	96	0,2	8,6	0,28	–	1,22	0,24
1000	96	0,2	7,0	0,35	–	0,81	0,16
500	125	0,25	5,2	0,52	–	0,40	0,1
200	150	0,3	3,6	0,9	–	0,16	0,05

Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рис. 2, 3, из которых видно, что предельное значение давления в зоне трения, при котором исследуемые узлы трения сохраняют работоспособность, составляет 2,44–3,16 МПа. Предельное значение линейной скорости трения не превышает 0,3 м/с.

Как следует из рис. 2, при малых скоростях трения (до 0,2 м/с) наибольшую зону работоспособности имеет втулка из партии № 2, у которой схема армирования углеродной ЛУ-П/0,2 была 45/2. При увеличении скорости

трения свыше 0,2 м/с картина меняется – лучшую работоспособность проявляет втулка партии № 1, у которой схема армирования углеленты ЛУ-П/0,2 была 90/2. Из анализа рис. 3 следует, что исследуемые трибосопряжения в режиме сухого трения сохраняют работоспособность при удельной нагрузке 1,5...3,0 МПа, которой соответствуют значения коэффициента трения от 0,3 до 0,2.

Таблица 3

Исследование триботехнических характеристик ПС партии № 2

$P$ , Н	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$v$ , м/с	$M_{тр}$ , Нм	$f_{тр}$	$A_r$ , см <sup>2</sup>	$q$ , МПа	$q \cdot v$ , МПа·м/с
3000	57	0,12	12	0,2	–	3,16	0,38
2000	72	0,15	10,4	0,26	9,46	2,11	0,32
1500	84	0,175	9,0	0,3	–	1,58	0,29
1000	96	0,2	7,4	0,37	–	1,05	0,2
500	110	0,22	6,6	0,66	–	0,53	0,11
200	125	0,25	3,9	0,97	–	0,21	0,05

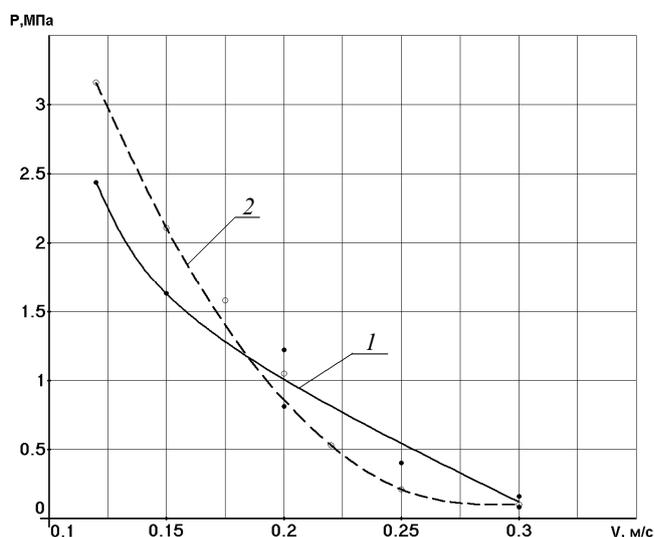


Рис. 2. Граничные значения работоспособности исследуемых трибосопряжений: 1 – партия № 1, 2 – партия № 2

Более объективное описание процессов, происходящих в зоне трения, возможно при совместном учете влияния давления и скорости в зоне трения на изменение коэффициента трения. Рисунок 4 наглядно показывает преимущества ПС из партии № 2. Очевидно, что зона работоспособности этого ПС будет ограничиваться в точке перегиба графика при значении  $f = 0,45$ . При этом  $(q \cdot v)$ -фактор может варьироваться в пределах 0,15–0,38 МПа·м/с.

### Заключение

Как показывает мировой опыт, широкое применение ПКМ в конструкциях изделий различного функционального назначения обусловлено снижением массы создаваемых изделий, снижением затрат, повышением прочности, безотказности и других эксплуатационных характеристик. Вместе с тем

из анализа проведенных исследований видно, что прямое заимствование технологии изготовления и последующая эксплуатация сопровождаются рядом проблем. Так, наработка на отказ тяжело нагруженных узлов трения может быть снижена из-за наличия в конструкциях ПС производственных дефектов. Превышение предельных скоростей и нагрузок вызывает скачкообразный рост коэффициента трения, что неизбежно приводит к фрикционному разогреву и последующему разрушению ПС. Наряду с приведенными рекомендациями по бездефектному производству ПС необходимо усовершенствование ТП по повышению смазывающих свойств применяемых ПКМ.

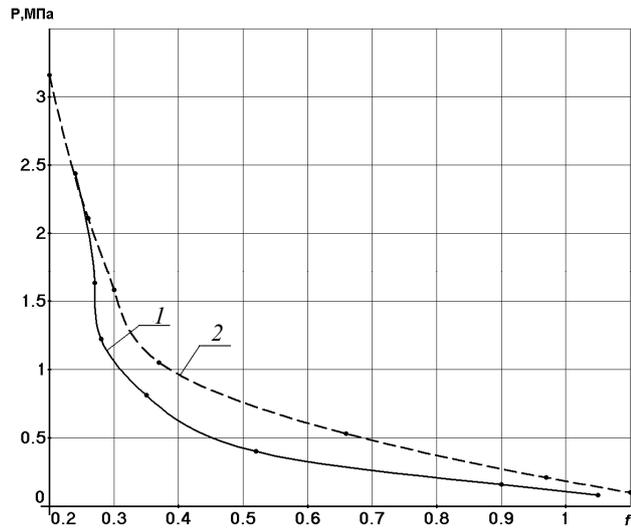


Рис. 3. Влияние давления  $q$  на изменение коэффициента трения  $f$ .  
1 – партия № 1; 2 – партия № 2

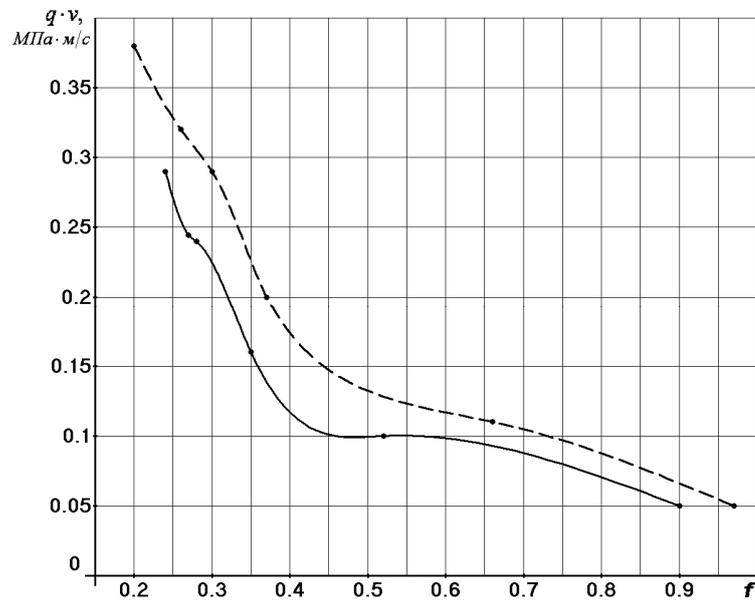


Рис. 4. Влияние  $(q \cdot v)$ -фактора на изменение коэффициента трения  $f$

Анализ результатов проведенных исследований показал, что для достижения этой цели не достаточно применения в ПС антифрикционного слоя, например из графитосодержащей ленты ЛУ-П/0,2 с определенной схемой армирования волокон. Необходима разработка такой структуры ПКМ, которая бы поддерживала в зоне трения ПС режим самосмазывания в течение заданного периода эксплуатации.

### Список литературы

1. **Болотин, В. В.** Влияние технологических факторов на механическую надежность конструкций из композитов / В. В. Болотин // *Механика полимеров*. – 1972. – № 3. – С. 529–540.
2. **Болотин, В. В.** Анализ технологических напряжений в намоточных изделиях на протяжении всего процесса изготовления / В. В. Болотин, А. Н. Воронцов, Р. Х. Мурзаханов // *Механика композитных материалов*. – 1980. – № 3. – С. 500–508.
3. **Тарнопольский, Ю. М.** Проблемы механики намотки толстостенных конструкций из композитов / Ю. М. Тарнопольский // *Механика композитных материалов*. – 1992. – № 5. – С. 618–626.
4. **Томашевский, В. Т.** Теория и методы обеспечения бездефектной макроструктуры армированных полимеров при переработке в конструкции специальной техники / В. Т. Томашевский, В. И. Смыслов, В. Н. Шалыгин, В. С. Яковлев. – М. : ЦНИИинформации, 1984. – 316 с.
5. **Исаков, Ю. А.** Расчет контактных давлений при опрессовке канатом цилиндрической пластмассовой оболочки, подверженной действию нестационарного температурного поля / Ю. А. Исаков, А. А. Филипенко, В. Д. Протасов // *Механика полимеров*. – 1977 – № 2. – С. 220–224.
6. **Томашевский, В. Т.** Научные основы технологических процессов переработки композиционных материалов в конструкции бездефектной структуры / В. Т. Томашевский и др. – Л. : Румб, 1980. – Ч. 1. – 170 с.
7. **Мережко, Ю. А.** Подшипники скольжения из армированных реактопластов. Кн. 1. Исследования и конструкторская отработка подшипников из полимерных композиционных материалов / Ю. А. Мережко, Р. С. Зиновьев. – Екатеринбург : Межрегиональный совет по науке и технологиям, 2002. – 249 с.
8. **Томашевский, В. Т.** Прогнозирование технологических дефектов и способы их предотвращения в намоточных армированных полимерах / В. Т. Томашевский и др. // Тезисы докладов I Всесоюзн. конф. по композиционным полимерным материалам и их применению в народном хозяйстве. – Ташкент : Изд-во ТПИ, 1980. – Т. III. – С. 40.
9. Исследование влияния микроструктуры полимерных композитов на эксплуатационные свойства подшипников скольжения импульсных тепловых машин / А. И. Богомолов, В. М. Голощапов, В. Я. Савицкий, А. Ю. Муйземнек, Р. С. Зиновьев // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2014. – № 4 (32). – С. 158–176.
10. Техническое описание и инструкция по эксплуатации машины для испытаний на трение и износ 2070 СМТ-1. – М. : ВЦИО, 1980. – 71 с.

### References

1. Bolotin V. V. *Mekhanika polimerov* [Polymer mechanics]. 1972, no. 3, pp. 529–540.
2. Bolotin V. V. et al. *Mekhanika kompozitnykh materialov* [Composite material mechanics]. 1980, no. 3, pp. 500–508.
3. Tarnopol'skiy Yu. M. *Mekhanika kompozitnykh materialov* [Composite material mechanics]. 1992, no. 5, pp. 618–626.

4. Tomashevskiy V. T., Smyslov V. I. et al. *Teoriya i metody obespecheniya bezdefektnoy makrostruktury armirovannykh polimerov pri pererabotke v konstruksii spetsial'noy tekhniki* [Theory and methods of defect-free makrostructure ensuring in reinforced polymers at processing into constructions of special machinery]. Moscow: TsNII-informatsii, 1984, 316 p.
5. Isakov Yu. A., Filipenko A. A., Protasov V. D. *Mekhanika polimerov* [Polymer mechanics]. 1977, no. 2, pp. 220–224.
6. Tomashevskiy V. T. et al. *Nauchnye osnovy tekhnologicheskikh protsessov pererabotki kompozitsionnykh materialov v konstruksii bezdefektnoy struktury* [Scientific basis of technological processes of composite material processing into defect-free constructions]. Leningrad: Rumb, 1980, part 1, 170 p.
7. Merezhko Yu. A., Zinov'ev R. S. *Podshipniki skol'zheniya iz armirovannykh reaktoplastov. Kn. 1. Issledovaniya i konstruktorskaya otrabotka podshipnikov iz polimernykh kompozitsionnykh materialov* [Slider bearings made of reinforced thermosetting plastics. Book 1. Research and design testing of bearings made of polymer composite materials]. Ekaterinburg: Mezhhregional'nyy sovet po nauke i tekhnologiyam, 2002, 249 p.
8. Tomashevskiy V. T. et al. *Tezisy dokladov I Vsesoyuzn. konf. po kompozitsionnym polimernym materialam i ikh primeneniyu v narodnom khozyaystve* [Proceedings of I All-USSR conference on composite polymer materials and application thereof in the national economy]. Tashkent: Izd-vo TPI, 1980, vol. III, p. 40.
9. Bogomolov A. I., Goloshchapov V. M., Savitskiy V. Ya., Muiyemnek A. Yu., Zinov'ev R. S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2014, no. 4, pp. 158–176.
10. *Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii mashiny dlya ispytaniy na trenie i iznos 2070 SMT-1* [Technical specifications and operationg instructions for tension and wear testing 2070 SMT-1]. Moscow: VTsIO, 1980, 71 p.

---

***Будимирова Татьяна Сергеевна***

преподаватель, кафедра  
общепрофессиональных дисциплин,  
Пензенский артиллерийский  
инженерный институт (Россия,  
г. Пенза-5)

E-mail: demeshoffa@mail.ru

***Budimirova Tat'yana Sergeevna***

Lecturer, sub-department of professional  
disciplines, Penza Artillery Engineering  
Institute (Penza-5, Russia)

***Савицкий Владимир Яковлевич***

доктор технических наук, профессор,  
кафедра № 11, Пензенский  
артиллерийский инженерный институт  
(Россия, г. Пенза-5)

E-mail: W.savis@gmail.com

***Savitskiy Vladimir Yakovlevich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department №11, Penza Artillery  
Engineering Institute (Penza-5, Russia)

***Муиземнек Александр Юрьевич***

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой теоретической  
и прикладной механики и графики,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: muiyemnek@yandex.ru

***Muiyemnek Aleksandr Yur'evich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
head of sub-department of theoretical  
and applied mechanics and graphics,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

**Зиновьев Радий Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент,  
технический директор группы  
научно-промышленных компаний  
«Полидор» (Россия, г. Челябинск,  
ул. Федорова, 1а)

E-mail: zinoviev@polidor.ru

**Zinov'ev Rادیy Sergeevich**

Candidate of engineering sciences,  
associate Professor, technical director  
of the «Polydor» research and production  
group (1a Fyodorova street, Chelyabinsk,  
Russia)

---

УДК 621

**Будими́рова, Т. С.**

**Исследование взаимосвязи технологии изготовления полимерных подшипников скольжения с эксплуатационными режимами нагружения / Т. С. Будими́рова, В. Я. Савицкий, А. Ю. Муйземнек, Р. С. Зиновьев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 124–135. DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-11**

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ЭПЮРЫ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ГЛУБИНЕ  
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ  
ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ  
ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ**

**Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Объектом исследования являются детали, изготовленные из высокопрочной конструкционной стали марки 30ХГСН2А. Предметом исследования является распределение остаточных напряжений (ОН) по глубине поверхности деталей в результате упрочняющей обработки дробью. Цель работы – аналитическая оценка распределения ОН по глубине поверхностного слоя деталей из высокопрочных сталей после поверхностного пластического деформирования при производстве и после эксплуатации.

*Материалы и методы.* Аналитическая оценка формирования ОН по глубине поверхностного слоя проводилась на основании классической теории упругости, а также посредством проведения ряда многофакторных экспериментов с применением методов неразрушающего контроля и обработки полученных данных при помощи методов регрессионного анализа.

*Результаты.* Результатом проведенных исследований стало получение аналитической зависимости для оценки распределения эпюры остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя деталей.

*Выводы.* Полученная модель адекватна реальным процессам в поверхности детали. Сопоставление с экспериментальными данными показало отклонение не более 20 %.

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, поверхностный слой, обработка дробью, неразрушающие методы контроля, теория упругости.

Е. Н. Зык, В. В. Плешаков

**ANALYTICAL ESTIMATION OF RESIDUAL STRESS  
DISTRIBUTION IN DEPTH OF THE FACIAL LAYER  
OF DETAILS MADE OF HIGH-STRENGTH STEELS  
AT SURFACE PLASTIC DEFORMATION**

**Abstract.**

*Background.* The object of the research is details made of the high-test constructional steel brand 30HGSN2A. The subject of the research is distribution of residual stress in depth of the facial layer as a result of work-hardening treatment by shot. The purpose of the research is to analytically estimate distribution of residual stress in depth of the facial layer of details made of high-strength steels during manufacturing and repairing.

*Materials and methods.* The analytical estimation of residual stress distribution in depth of the facial layer was carried out on the basis of the classical theory of elasticity and with the help of multifactorial experiments with application of non-

destructive testing methods. The research findings were processed by methods of regressive analysis.

*Results.* The research resulted in obtainment of an analytical dependence for analytical estimation of residual stress distribution in depth of the facial layer.

*Conclusions.* The resulting model is adequate to real processes in the surface of details. A comparison with the experimental data has revealed a deviation of not more than 20 %

**Key words:** residual stress, surface layer, treatment by shot, nondestructive control methods, theory of elasticity.

## Введение

В настоящее время одной из основных задач, стоящих перед машиностроением, является повышение надежности изделий из высокопрочных сталей, увеличение их ресурса как на этапе производства, так и после эксплуатации при проведении процедур восстановления.

В настоящее время в конструкциях машин различного типа большое применение находят детали типа пальцев, осей, болтов, втулок, кривошипов, изготовленных из высокопрочных сталей марок 30ХГСНА, 30ХГСН2А, 25Х2ГНТА, ВНС, ВНЛ и др. С целью повышения прочностных характеристик таких деталей, увеличения надежности и долговечности широкое распространение получили методы поверхностного пластического деформирования (ППД).

Одним из основных способов упрочнения, относящихся к ППД, является обработка деталей дробью. Дробеметная обработка является одним из наиболее действенных и эффективных методов поверхностного пластического деформирования, поскольку есть возможность обработки поверхностей деталей различного сложного профиля и размеров при высокой производительности метода.

## 1. Цели исследования

При обработке деталей методами ППД в поверхностном слое происходит множество различных процессов, оказывающих большое влияние на его конечные характеристики. В частности, происходит явление наклепа – изменения под воздействием внешних сил свойств материала. Явление наклепа неразрывно связано с понятием остаточных напряжений (ОН).

Остаточные напряжения – это напряжения, существующие в деталях при отсутствии каких-либо внешних воздействий (как силовых, так и температурных) [1]. Различают растягивающие и сжимающие ОН, причем установлено, что только сжимающие улучшают прочностные свойства деталей [2].

По причине связи упрочненного слоя и остаточных напряжений можно сделать вывод, что на конечные характеристики обработанной детали прямое воздействие оказывает глубина залегания ОН. Основными параметрами, влияющими на усталостную прочность деталей, являются величина остаточных напряжений, их знак, а также глубина распространения ОН с сохранением максимальной величины [3].

С учетом вышесказанного вопрос оценки распределения эпюры ОН по глубине поверхностного слоя деталей имеет исключительно важное значение.

## 2. Исходная зависимость для расчета

Согласно общепринятым представлениям [4, 5] схематично процесс формирования ОН в поверхностном слое деталей при производстве и при восстановлении можно представить в следующем виде (рис. 1):

1. Процессы упруго-пластической деформации формируют линию 1 эпюры, которая отражает возникшие максимальные остаточные сжимающие напряжения в поверхностном слое.

2. Тепловые процессы, происходящие при ударе, формируют линию 2 эпюры, которая отражает возникшие у поверхности остаточные растягивающие напряжения.

3. Сумма двух веток (1 и 2) представляет собой эпюру распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя при обработке детали методами ППД.

4. Окончательный вид эпюры формируется после применения поправочного коэффициента, который учитывает процессы, происходящие в поверхностном слое детали при эксплуатации.

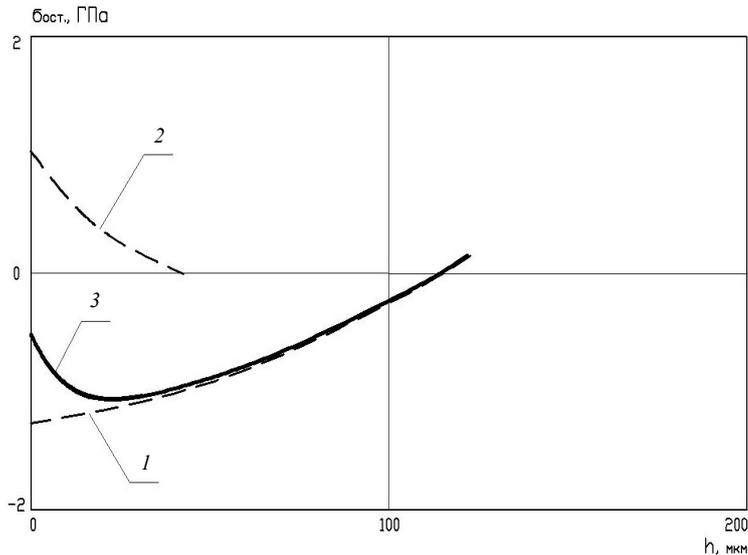


Рис. 1. Схема формирования остаточных напряжений в поверхностном слое детали после эксплуатации: 1 – упруго-пластическая составляющая; 2 – термопластическая составляющая; 3 – суммарная линия распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей

Таким образом, с учетом вышесказанного выражение для определения суммарных остаточных напряжений в поверхностном слое после эксплуатации приобретает вид

$$\sigma_{\text{ост}} = K_{\text{экспл}} (\sigma_{\text{пласт}}(h) + \sigma_{\text{тепл}}(h)), \text{ ГПа}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{пласт}}(h)$  – сжимающие остаточные напряжения, возникающие вследствие упруго-пластической деформации материала в ходе обработки;  $\sigma_{\text{тепл}}(h)$  – растягивающие остаточные напряжения, возникающие вслед-

ствии тепловых процессов в ходе обработки;  $K_{\text{экспл}}$  – поправочный коэффициент, который учитывает процессы, произошедшие в материале в ходе эксплуатации.

### 3. Остаточные напряжения в результате деформирования поверхности

Примем условие, что внешняя сила от дроби воздействует строго перпендикулярно к поверхности материала, а непосредственно дробинка представляет собой абсолютно жесткое тело. Таким образом, деформационная составляющая остаточных напряжений определяется по уравнению, описывающему напряженное состояние в полубесконечном теле при вдавлении шара:

$$\sigma_{\text{пласт}}(h) = -\sigma_z \cdot \left(1 - \frac{h}{H}\right), \text{ Па}, \quad (2)$$

где  $\sigma_z$  – напряжения на плоскости, Па;  $H$  – глубина упрочненного слоя, м.

Согласно представлениям классической теории упругости [6] удар дроби о поверхность детали – воздействие мгновенного сосредоточенного источника силы на участок неограниченно упругой среды.

Приложение силы создает некое напряженное состояние, которое можно определить при помощи тензора  $\hat{T}$ , зависящего от технических констант материала (так как обрабатываемая сталь является изотропным материалом):

$$\hat{T} = \frac{2GC}{R^3} \left[ (1 - 2\nu) (\hat{E} - i_3 R - R i_3) - \frac{3z}{R^2} RR \right], \quad (3)$$

где  $G$  – модуль сдвига;  $\hat{E}$  – модуль упругости;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\hat{R}$  – радиус-вектор распределения нагрузки;  $C$  – коэффициент пропорциональности.

Определение коэффициента пропорциональности  $C$  возможно из уравнения равновесия выделенного из среды полушара произвольного радиуса  $R$  с центром в точке приложения силы  $P$ , в итоге получаем

$$C = \frac{P}{4\pi G}. \quad (4)$$

Пользуясь решением частной задачи Буссинека и принимая во внимание исходную схему распределения напряжений под нагрузкой, принимаем  $x = y = 0$ , а  $z = R$ , что позволяет уточнить полученные уравнения для определения напряжений:

$$\sigma_z = -\frac{3P}{2\pi R^2}, \text{ Па}. \quad (5)$$

Из условия пластичности следует, что пластическая деформация возможна только при выполнении соотношения  $\sigma_z \geq \sigma_{0,2}$ , и, следовательно, зависимость для оценки глубины упрочненного слоя  $H$  принимает следующий вид:

$$H = R = \sqrt{\frac{3P}{2\pi\sigma_{0.2}}}, \text{ м.} \quad (6)$$

Показатель нелинейности  $n$  в данном случае равен 1,25–1,35.  
В результате исходное уравнение (2) сводится к следующему виду:

$$\sigma_{\text{пласт}}(h) = -\sigma_{0.2} \cdot \left( 1 - \frac{h}{\sqrt{\frac{3P}{2\pi\sigma_{0.2}}}} \right)^n, \text{ Па.} \quad (7)$$

#### 4. Остаточные напряжения в результате нагрева поверхности

В процессе дробеметной обработки в зоне контакта дроби с поверхностью материала происходит выделение большого количества энергии в виде тепла. Согласно различным исследованиям, мгновенная температура, выделяющаяся при ударе дроби, составляет от 300 до 1500 °С [7, 8].

Исходная зависимость, наиболее полно отображающая термопластическую составляющую для расчета остаточных напряжений в поверхностном слое деталей, основывается на законе Гука для относительного растяжения (сжатия) и зависимостях, определяющих относительную деформации и коэффициент линейного теплового расширения [9]:

$$\sigma_{\text{тепл}} = E\alpha\Delta T. \quad (8)$$

Изменение температуры  $\Delta T$  можно оценить при помощи решения Кельвина дифференциального уравнения теплопроводности (второго главного уравнения теплофизики):

$$\Delta T = T = \frac{Q}{\lambda_T \sqrt{\omega} (4\pi t)^{\frac{3}{2}}} \exp\left[-\frac{R^2}{4\omega t}\right]; \quad (9)$$

где  $T$  – температура любой точки тела, к которому было приложено тепловое воздействие;  $Q$  – количество тепла, внесенное в тело источником, Дж;  $R$  – расстояние от источника теплоты до рассматриваемой точки, см;  $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности;  $\omega$  – коэффициент температуропроводности;  $t$  – временной интервал воздействия источника тепла на тело, с.

Количество тепла, которое вносит дробинка в обрабатываемый материал, можно оценить при помощи энергии соударения:

$$Q = \chi \cdot E, \text{ Дж,} \quad (10)$$

где  $\chi$  – коэффициент распределения тепловых потоков;  $E$  – энергия соударения.

Коэффициент  $\chi$  распределения тепловых потоков зависит от основных тепловых характеристик материала и определяется по следующей формуле:

$$\chi = \frac{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}}{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}}; \quad (11)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности материала и дроби соответственно;  $c_1$  и  $c_2$  – коэффициенты теплоемкости материала и дроби соответственно;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотность материала и дроби соответственно.

Энергия соударения определяется разностью кинетических энергий внедрения и отлета дроби от поверхностного слоя материала и оценивается при помощи общеизвестных зависимостей:

$$E = E_{k1} - E_{k2} = \frac{mV_1^2}{2} - \frac{mV_2^2}{2} = \frac{mV_1^2 - mV_2^2}{2}; \quad (12)$$

где  $m$  – масса дроби, кг;  $V_1$  – скорость дроби до удара (при внедрении), м/с;  $V_2$  – скорость дроби после удара (при отлете), м/с.

Введем скоростной коэффициент  $K_1$ :

$$K_1 = \frac{V_2}{V_1}. \quad (13)$$

Выразив из формулы (13) скорость  $V_2$  отлета дроби и подставив полученные выражения в зависимость (10), получим окончательный вид зависимости для определения количества тепла  $Q$ :

$$Q = \frac{\chi m V_1^2}{2} (1 - K_1^2), \text{ Дж.} \quad (14)$$

Время воздействия источника тепла на обрабатываемый материал можно рассчитать следующим образом:

$$t = t_1 + t_2, \text{ с,} \quad (15)$$

где  $t_1$  – время внедрения дроби в материал, с;  $t_2$  – время отлета дроби от материала, с.

Определение слагаемых  $t_1$  и  $t_2$  из зависимости (15) возможно из условия равноускоренности движения источника тепла (дроби) в процессе удара по поверхности обрабатываемого материала. Таким образом, выражения для определения времени внедрения и времени отлета рабочего тела выглядят следующим образом:

$$t_1 = \frac{2H}{V_1}, \text{ с; } t_2 = \frac{2h_y}{V_2}, \text{ с,} \quad (16)$$

где  $H$  – глубина полного внедрения рабочего тела в поверхность материала, м;  $h_y$  – глубина упругого внедрения рабочего тела в поверхность материала, м.

По аналогии со скоростным коэффициентом  $K_1$  (13) введем поверхностный коэффициент  $K_2$ :

$$K_2 = \frac{h_y}{H}. \quad (17)$$

Выразим из скоростного коэффициента  $K_1$  скорость  $V_2$  отлета дроби, из поверхностного коэффициента  $K_2$  – глубину упругого внедрения  $h_y$  дроби, получим уточненный вариант записи формулы для определения временного интервала отлета дроби:

$$t_2 = \frac{2 \cdot H \cdot K_2}{V_1 \cdot K_1}, \text{ с.} \quad (18)$$

В итоге получаем предварительный вид зависимости для определения времени воздействия источника тепла на обрабатываемый материал:

$$t = \frac{2H}{V_1} \left( \frac{K_1 + K_2}{K_1} \right), \text{ с.} \quad (19)$$

Введем обобщенный коэффициент упругого восстановления поверхности  $K_{\text{пов}}$ , который позволит в полной мере отражать физико-механические изменения в материале при его обработке, учитывая факторы обработки и свойства материала [10, 11]:

$$K_{\text{пов}} = K_1 = \frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\frac{h_y}{H}} = \sqrt{1 - \frac{h_{\text{пл}}}{H}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{V_1}{2F_0} \sqrt{\frac{\rho(1-2\mu)}{E}}}}. \quad (20)$$

Таким образом, зависимость (19) для определения времени воздействия источника тепла на обрабатываемый материал (мм) принимает следующий вид:

$$t = \frac{2H}{V_1} (1 + K_{\text{пов}}), \text{ с.} \quad (21)$$

Также следует уточнить выражение (14) для определения количества тепла  $Q$ , которое вносит источник (дробинка) в обрабатываемый материал:

$$Q = \frac{\chi m V_1^2}{2} (1 - K_{\text{пов}}^2), \text{ Дж.} \quad (22)$$

В итоге, подставляя получившиеся выражения в исходную формулу (8), получим окончательный вид выражения для определения термопластической составляющей остаточных напряжений в поверхностном слое деталей:

$$\sigma_{\text{тепл}} = \frac{E \alpha \chi m V_1^2 (1 - K_{\text{пов}})}{2 \lambda_T \sqrt{\omega} \left[ 8 \pi H \frac{(1 - K_{\text{пов}})}{V_1} \right]^{3/1}} \cdot \exp \left[ - \frac{R^2 V_1}{8 H \omega (1 + K_{\text{пов}})} \right], \text{ Па.} \quad (23)$$

### 5. Определение эксплуатационного коэффициента

В процессе эксплуатации на деталь происходит воздействие множества разноплановых сил, включающих в себя большое количество разнообразных

факторов, в связи с чем расчет поправочного коэффициента аналитически не представляется возможным. Поэтому для определения данного коэффициента был использован магнитошумовой метод контроля деталей.

Были проведены экспериментальные исследования по магнитошумовому контролю деталей с различным уровнем наработки, с измерением частотных характеристик сигнала. Частота перемагничивания составила 1 Гц, амплитуда поля 4 кА/м, уровень селекции – 0,3 В. Нарботка представляла собой нагружение деталей посредством ротационного изгиба при амплитудном напряжении  $\sigma_a = 0,9$  ГПа. По результатам эксперимента была составлена графическая зависимость частотных характеристик сигнала от величины относительной наработки деталей, которая является искомой функцией, характеризующей процесс изменения параметров исследуемой детали в зависимости от величины наработки. Наиболее точно полученную кривую возможно описать при помощи степенной функции, а именно полинома шестой степени (рис. 2):

$$N_{\text{отн}} = -662,79 \cdot Z_{\text{отн}}^6 + 1793,4 \cdot Z_{\text{отн}}^5 - 1834,6 \cdot Z_{\text{отн}}^4 + 853,52 \cdot Z_{\text{отн}}^3 - 161,83 \cdot Z_{\text{отн}}^2 + 8,01 \cdot Z_{\text{отн}} + 0,9914. \quad (24)$$

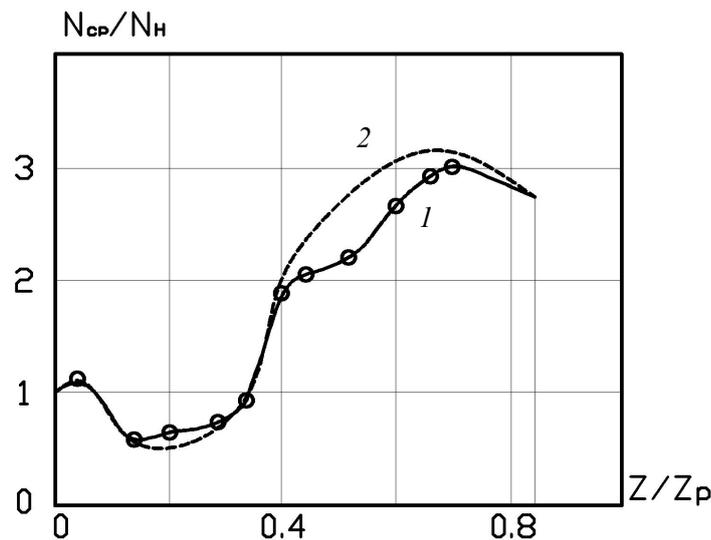


Рис. 2. Зависимость среднего относительного числа выбросов ЭДС от СБ от относительной наработки образцов: 1 – экспериментально полученная кривая; 2 – аппроксимированная кривая

Частотный показатель процесса магнитошумового контроля  $N$  обратно пропорционален величине остаточных напряжений в поверхностном слое деталей. Для описания статистической связи вышеуказанных параметров возможно использование следующей зависимости, полученной экспериментально, и согласующейся с зависимостью, полученной В. В. Плешаковым [12]:

$$\sigma_o = 0,01 + \frac{0,48}{0,452 \cdot N_{\text{отн}}}. \quad (25)$$

Таким образом, подставляя в соотношение (25) вместо текущих дискретных значений  $N$  расчетную зависимость  $N_{\text{отн}}$  (24), получим выражение для определения поправочного коэффициента  $K_{\text{эспл}}$  остаточных напряжений, позволяющего учесть изменения параметров поверхностного слоя детали в ходе эксплуатации:

$$K_{\text{эспл}} = 0,01 + 0,48 \left[ 0,452 \cdot (-662,79 \cdot Z_{\text{отн}}^6 + 1793,4 \cdot Z_{\text{отн}}^5 - 1834,6 \cdot Z_{\text{отн}}^4 + 853,52 \cdot Z_{\text{отн}}^3 - 161,83 \cdot Z_{\text{отн}}^2 + 8,01 \cdot Z_{\text{отн}} + 0,9914) \right]^{-1}. \quad (26)$$

### 6. Итоговая формула оценки распределения ОН по глубине поверхностного слоя

В итоге, определив сжимающие остаточные напряжения, возникающие вследствие упруго-пластической деформации материала (7), растягивающие остаточные напряжения, возникающие вследствие тепловых процессов в ходе обработки (23), а также поправочный коэффициент, учитывающий процессы, произошедшие в материале в ходе эксплуатации (26), выражение для определения суммарных остаточных напряжений в поверхностном слое после эксплуатации (1) приобретает следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ост}} = & \left( 0,01 + 0,48 \cdot \left[ 0,452 \cdot (-662,79 \cdot Z_{\text{отн}}^6 + 1793,4 \cdot Z_{\text{отн}}^5 - 1834,6 \cdot Z_{\text{отн}}^4 + \right. \right. \\ & \left. \left. + 853,52 \cdot Z_{\text{отн}}^3 - 161,83 \cdot Z_{\text{отн}}^2 + 8,01 \cdot Z_{\text{отн}} + 0,9914) \right]^{-1} \right) \times \\ & \times \left( -\sigma_{0,2} \cdot \left( 1 - \frac{h}{\sqrt{\frac{3P}{2\pi\sigma_{0,2}}}} \right)^n + \right. \\ & \left. + \frac{E\alpha\chi m V_1^2 (1 - K_{\text{пов}}^2)}{2\lambda_T \sqrt{\omega} \left[ 8\pi H \frac{(1 + K_{\text{пов}})}{V_1} \right]^{3/2}} \cdot \exp \left[ -\frac{R^2 V_1}{8H\omega(1 + K_{\text{пов}})} \right] \right), \text{ Па}. \quad (27) \end{aligned}$$

### Заключение

С целью оценки точности прогноза формирования ОН в поверхностном слое деталей были проведены экспериментальные исследования. По их результатам составлена регрессионная модель зависимости распределения остаточных напряжений от технологических факторов дробеметной обработки:

$$\begin{aligned} \sigma(h) = & -1,444 + 4,838P_2 - 0,000125h^2 + 0,5273D_1P_1 + 0,003D_2h + \\ & + 0,088D_2P_2 + 0,0022D_1h + 0,012h - 0,417D_1P_2 - 0,53D_2P_1 + \\ & + 0,01P_1h - 7,25P_1P_2 - 0,09D_1D_2 + 0,2D_2 + 2,6P_1 + 0,5D_1, \text{ Па}. \quad (28) \end{aligned}$$

Также была получена регрессионная модель определения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из стали 30ХГСН2А в зависимости от глубины поверхностного слоя и частотных параметров магнитошумового сигнала:

$$\begin{aligned} \sigma(h) = & 185,86 - 4,68h + 0,0449h^2 - 0,0349N_{0,45}h + \\ & + 0,0458N_{0,85}h - 12,66N_{0,85} + 0,12N_{0,45}N_{0,85} - \\ & - 0,0295N_{0,45}^2 - 0,0616N_{0,85}^2, \text{ Па,} \end{aligned} \quad (29)$$

где  $N_{0,45}$  – частота магнитошумового сигнала при стробировании  $t_i/T_H$ , равном 0,45;  $N_{0,85}$  – частота магнитошумового сигнала при стробировании  $t_i/T_H$ , равном 0,85.

Полученные модели являются информативными ( $F_{\text{инф}} = 5,7$ ) и адекватны экспериментальным данным при уровне доверительной вероятности 95 %.

При сопоставлении результатов экспериментальных и теоретических исследований разница эпюр составила не более 20 %, что укладывается в погрешность для инженерных расчетов.

#### Список литературы

1. **Биргер, И. А.** Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – М. : Машгиз, 1963.
2. **Иванов, С. М.** Влияние остаточных напряжений и наклепа на усталостную прочность / С. М. Иванов, Ф. П. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – № 5. – С. 25
3. **Папшев, Д. Д.** Отделочно-упрочняющая обработка поверхности пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. – М. : Машиностроение, 1978. – 152 с.
4. **Торбило, В. М.** Алмазное выглаживание / В. М. Торбило. – М. : Машиностроение, 1972. – 105 с.
5. **Смелянский, В. М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – М. : Машиностроение, 2002. – 299 с.
6. **Лурье, А. И.** Теория упругости / А. И. Лурье. – М. : Наука, 1970. – Ч. 1. – С. 223–225.
7. **Петросов, В. В.** Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента / В. В. Петросов. – М. : Машиностроение, 1977. – 166 с.
8. **Саверин, М. М.** Дробеструйный наклеп / М. М. Саверин. – М. : Машгиз, 1955. – 312 с.
9. **Корсков, В. Д.** Справочник мастера по штампам / В. Д. Корсаков. – Л. : Машиностроение, 1972. – 191 с.
10. **Плешаков, В. В.** Программное поверхностное пластическое деформирование деталей высокопрочных сталей / В. В. Плешаков, А. Г. Схиртладзе, Т. В. Никифорова, В. А. Долгов. – М. : ИНТС, 2002.
11. **Серебряков, В. И.** Повышение качества поверхности и долговечности деталей летательных аппаратов комбинированным упрочнением : дис. ... д-ра. техн. наук / В. И. Серебряков. – М., 1990. – (Для служебного пользования).
12. **Плешаков, В. В.** Неразрушающий контроль транспортных систем : учеб. пособие / В. В. Плешаков, Е. А. Егорушкин, В. И. Серебряков. – М. : Изд-во МГУПИ, 2012. – 112 с.

### References

1. Birger I. A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stress]. Moscow: Mashgiz, 1963.
2. Ivanov S. M., Pavlov F. P. *Problemy prochnosti* [Strength problems]. 1976, no. 5, p. 25
3. Papshev D. D. *Otdelochno-uprochnyayushchaya obrabotka poverkhnosti plasticheskim deformirovaniem* [Finishing reinforcing treatment of surfaces by plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 152 p.
4. Torbilo V. M. *Almaznoe vyglazhivanie* [Diamond smoothing]. Moscow: Mashinostroenie, 1972, 105 p.
5. Smelyanskiy V. M. *Mekhanika uprochneniya detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics of detail reinforcing by plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 2002, 299 p.
6. Lur'e A. I. *Teoriya uprugosti* [Elasticity theory]. Moscow: Nauka, 1970, part 1, pp. 223–225.
7. Petrosov V. V. *Gidrodobestruynoe uprochnenie detaley i instrumenta* [Hydraulic shot reinforcing of details and tools]. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 166 p.
8. Saverin M. M. *Drobestrुynnyy naklep* [Hydraulic shot hardening]. Moscow: Mashgiz, 1955, 312 p.
9. Korskov V. D. *Spravochnik мастера по shtampam* [Punch expert's reference book]. Leningrad: Mashinostroenie, 1972, 191 p.
10. Pleshakov V. V., Skhirtladze A. G., Nikiforova T. V., Dolgov V. A. *Programmnoe poverkhnostnoe plasticheskoe deformirovanie detaley vysokoprochnyykh staley* [Program surface plastic deformation of details made of high-strength steels]. Moscow: INTS, 2002.
11. Serebryakov V. I. *Povyshenie kachestva poverkhnosti i dolgovechnosti detaley letatel'nykh apparatov kombinirovannym uprochneniem: dis. d-ra. tekhn. nauk* [Improving surface quality and durability of aircraft details by combined hardening: dissertation to apply for the degree of the doctor of engineering sciences]. Moscow, 1990.
12. Pleshakov V. V., Egorushkin E. A., Serebryakov V. I. *Nerazrushayushchiy kontrol' transportnykh sistem: ucheb. posobie* [Nondestructive check of transport systems: tutorial]. Moscow: Izd-vo MGUPI, 2012, 112 p.

---

#### **Зык Евгений Николаевич**

аспирант, Московский государственный университет приборостроения и информатики (Россия, г. Москва, ул. Стромынка, 20)

E-mail: zyk.eugene@gmail.com

#### **Zyk Evgeniy Nikolaevich**

Postgraduate student, Moscow State University of Informatics and Instrument Engineering (20 Stromynka street, Moscow, Russia)

#### **Плешаков Виктор Викторович**

кандидат технических наук, профессор, кафедра ВТ-12, Московский государственный университет приборостроения и информатики (Россия, г. Москва, ул. Стромынка, 20)

E-mail: pleshakovvv@yandex.ru

#### **Pleshakov Viktor Viktorovich**

Candidate of engineering sciences, professor, sub-department VT-12, Moscow State University of Informatics and Instrument Engineering (20 Stromynka street, Moscow, Russia)

УДК 621.7.09

Зык, Е. Н.

**Аналитическая оценка распределения эпюры остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя деталей из высокопрочных сталей при поверхностном пластическом деформировании / Е. Н. Зык, В. В. Плешаков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 136–147. DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-12**

## ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЛИЗА НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ СПЛАВОМ МЕДЬ-ОЛОВО

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Объектом исследования является покрытие сплавом медь-олово, полученное электрохимическим методом; предметом исследования – процессы электроосаждения покрытий сплавом медь-олово на стационарных и нестационарных режимах осаждения, таких как вибрация катода и наложение на электролит переменного магнитного поля. Цель работы – изучение влияния различных режимов электролиза (вибрация катода и наложение на электролит переменного магнитного поля) на физико-механические, электрические и коррозионные свойства покрытий сплавом медь-олово.

*Материалы и методы.* Состав получаемых покрытий исследовали методами спектрофотометрии и гравиметрии. Эксплуатационные свойства покрытий, такие как адгезионная прочность, микротвердость, износостойкость, переходное электрическое сопротивление, паяемость, коррозионная стойкость в различных средах, исследовали с использованием стандартных и общепринятых методов.

*Результаты.* Выявлена взаимосвязь эксплуатационных свойств покрытия сплавом медь-олово (микротвердость, паяемость, переходное сопротивление, коррозионная стойкость) и режимов стационарного и нестационарного электролиза, позволяющая формировать покрытия с заданным комплексом свойств. Получены результаты коррозионных испытаний, определяющие область применения сплава медь-олово.

*Выводы.* В результате исследования установлено, что нестационарные режимы электролиза, такие как вибрация катода и наложение на электролит переменного магнитного поля, способствуют формированию гальванических покрытий сплавом медь-олово с широким диапазоном содержания олова в сплаве, оказывая, таким образом, значительное влияние на их свойства. Экспериментально доказано, что вибрация катода и наложение на электролит переменного магнитного поля приводит к формированию покрытий сплавом медь-олово, обладающих низким и стабильным во времени переходным сопротивлением, хорошей паяемостью и высокой коррозионной стойкостью. Это позволяет использовать данные покрытия в качестве покрытий слаботочных контактов, а также покрытий под пайку, в том числе для производства печатных плат.

**Ключевые слова:** сплав медь-олово, нестационарные режимы электролиза, вибрация катода, магнитное поле, эксплуатационные свойства, микротвердость, паяемость, переходное электросопротивление, коррозионная стойкость.

М. В. Glebov, S. Yu. Kireev

## INFLUENCE OF NON-STATIONARY ELECTROLYSIS MODES ON COPPER-TIN ALLOY COATINGS' PROPERTIES

### Abstract.

*Background.* The research object is copper-tin alloy coatings, obtained by the electrochemical method; the research subject is the processes of copper-tin alloy

coating electrodeposition at stationary and non-stationary deposition modes, such as cathode vibration and alternating magnetic field application over an electrolyte. The aim of the work is to study the influence of various modes of electrolysis (cathode vibration and alternating magnetic field application over an electrolyte) on physical-mechanical, electrical and corrosion properties of copper-tin alloy coatings.

*Materials and methods.* The obtained coatings' composition was researched by the methods of spectrophotometry and gravimetry. Operating properties of coatings, such as adhesion strength, microhardness, wear resistance, transient electric resistance, solderability, corrosion resistance in various media, were investigated using standard and generally recognized methods.

*Results.* The authors revealed an interrelation of operation properties of the copper-tin alloy coating (microhardness, solderability, transient resistance, corrosion resistance) and stationary and non-stationary electrolysis modes, allowing to form coatings with a set combination of properties. The researchers obtained results of corrosion tests determining a range of application of the copper-tin alloy.

*Conclusions.* The research has established that non-stationary electrolysis modes, such as cathode vibration and alternating magnetic field application over an electrolyte promote formation of copper-tin alloy galvanic coatings with a wide range of tin content in the alloy, therefore impacting the properties thereof. It has been experimentally proved that cathode vibration and alternating magnetic field application over an electrolyte leads to formation of copper-tin alloy coatings that feature low and time-stable transient resistance, good solderability and high corrosion resistance. These allow to use the given coating as low-level contact coatings, as well as solder coatings, including for printed circuit board production.

**Key words:** copper-tin alloy, non-stationary electrolysis modes, cathode vibration, magnetic field, operating properties, microhardness, solderability, transient electric resistance, corrosion resistance.

### Введение

Физико-механические свойства покрытий: микротвердость, прочность сцепления с основой, переходное электросопротивление, паяемость, коррозионная стойкость, – являются важной характеристикой качества гальванических осадков и определяют область применения данного покрытия при тех или иных условиях эксплуатации [1].

Сплав медь-олово применяется в качестве защитного (для деталей из стали, эксплуатирующихся в пресной воде при температурах до 100 °С), антифрикционного, декоративного покрытия, а также в качестве покрытия под пайку и подслоя при нанесении покрытия хромом [1].

В радиоэлектронной промышленности в качестве покрытия печатных плат применяется сплав ПОС-61 (припой оловянно-свинцовый). Однако в связи с Директивой Европейского Союза по экологической безопасности RoHS, которая с середины 2006 г. ограничивает содержание свинца (не более 0,01 %) в каждом гомогенном материале нового электронного оборудования [2], актуальными являются работы, направленные на замену свинецсодержащих покрытий на бессвинцовые [3]. Учитывая хорошую паяемость сплава медь-олово, а также стабильность данного свойства в условиях атмосферы можно рекомендовать покрытия с высоким содержанием олова (более 30 %) в качестве альтернативы ПОС-61.

Для покрытий деталей радиоэлектронной аппаратуры важным свойством является величина переходного электрического сопротивления, а также стабильность ее при эксплуатации.

В литературе имеются сведения о возможности управления эксплуатационными свойствами покрытий металлами с помощью нестационарных режимов (в частности, при вибрации катода и наложении на электролит магнитного поля) [4]. Таким образом, **цель исследования** – изучение влияния различных режимов электролиза (вибрация катода и наложение на электролит переменного магнитного поля) на физико-механические, электрические и коррозионные свойства покрытий сплавом медь-олово, является актуальной. Полученные результаты исследования позволят создать технологию, позволяющую формировать покрытия указанным сплавом с заданным комплексом эксплуатационных свойств.

### **Методы исследования**

Микротвердость покрытий измерялась на микротвердомере ПМТ-3, четырехгранная алмазная пирамидка индентора с углом при вершине  $136^\circ$  внедрялась перпендикулярно слою покрытия с нагрузкой от 0,1 до 1 Н. При расчетах применялась следующая формула:

$$H = \frac{1,854P}{d^2},$$

где  $P$  – нагрузка на алмазную пирамидку, Н;  $d$  – длина диагонали отпечатка, м;  $H$  – число твердости, Па.

Для исключения влияния подложки образец покрывался на толщину 8–10 мкм [5].

Переходное сопротивление ( $R_{\Pi}$ ) является комплексной функцией различных свойств поверхности (электрических, механических и условий измерения). Теория переходного сопротивления основана на том, что контакт реальных тел с шероховатой поверхностью происходит по отдельным «контактным пятнам», число которых зависит от шероховатости образца и величины механической нагрузки на контакт [6–8]. «Электрическая» составляющая переходного сопротивления включает электрические характеристики поверхности (наличие продуктов коррозии на поверхности и их электропроводность, тип проводимости, величина запретной зоны). Изучение переходного электросопротивления покрытий сплавом медь-олово производилось косвенным путем измерения падения напряжения на контактной паре при различной нагрузке [9]:

$$R_{\Pi} = \frac{\Delta E}{I},$$

где  $R_{\Pi}$  – переходное электросопротивление, Ом;  $\Delta E$  – падение напряжения на контакте, В;  $I$  – ток в цепи, А.

Эталонным контактом служил позолоченный сферический контакт с диаметром сферического закругления 1,5 мм. Нагрузка на контактную пару при измерении изменялась от 0,5 до 2,0 Н. Ток в цепи контакта при измерении составлял 10 мА.

Поскольку для покрытий сплавом медь-олово важным показателем является способность их к пайке, то методика определения данного показателя является необходимым условием определения их качества.

Определение способности покрытия к пайке позволяет своевременно вносить коррективы в технологический процесс нанесения покрытия и тем самым оказывать влияние на качество соединения деталей методом пайки [10].

В качестве показателя паяемости принимается величина коэффициента растекания ( $K_{\text{раст}}$ ) [11–14].

$$K_{\text{раст}} = \frac{D-H}{D} \cdot 100\%,$$

где  $D$  – диаметр гипотетической капли припоя;  $H$  – высота капли припоя.

Диаметр гипотетической сферической капли рассчитывался по формуле [14]:

$$D = \sqrt[3]{\frac{1,9m}{\rho}},$$

где  $m$  – масса припоя;  $\rho$  – плотность припоя.

При проведении эксперимента использовался припой ПОС-61 (61 % – Sn, 39 % – Pb, температура плавления – 190 °С) и активный флюс марки Ф-38Н [15].

Для оценки паяемости по величине коэффициента растекания использовалась шкала (табл. 1).

Таблица 1

Критерии паяемости покрытий

$K_{\text{раст}}, \%$	Паяемость	$K_{\text{раст}}, \%$	Паяемость
до 60	плохая	80–90	хорошая
60–70	недостаточная	90 и более	очень хорошая
70–80	удовлетворительная		

Основной характеристикой защитных покрытий является их коррозионная стойкость. Одна из главных целей нанесения защитных покрытий состоит в повышении коррозионной долговечности. Защитные свойства и коррозионную стойкость покрытий сплавом медь-олово оценивали по результатам климатических испытаний в камере влаги. Испытания в камере влаги проводили при относительной влажности  $93 \pm 3\%$  и температуре  $40 \pm 2$  °С [16].

Прочность сцепления гальванического покрытия сплавом медь-олово с основой определяли методом изгиба и риск [1].

Метод изгиба рекомендуется для покрытий на деталях, изготовленных из материала толщиной или диаметром не более 3 мм. Образец изгибают под углом 90° в обе стороны до излома. В месте излома не должно быть отслаивания покрытия, растрескивание покрытия не учитывается [1].

Метод риск рекомендуется для покрытий толщиной не более 10 мкм. На поверхность покрытия острием наносят не менее трех параллельных рисков с расстоянием между ними 2–3 мм и перпендикулярно к ним также не менее трех рисков. Риски наносят в одном направлении глубиной до основно-

го металла. После испытаний не должно быть отслаивания покрытия между линиями и в сетке квадратов [1].

Для оценки коррозионной устойчивости гальванических покрытий сплавом медь-олово были проведены климатические испытания в камере влаги. Климатические испытания в камере влаги при относительной влажности  $93 \pm 3\%$  и температуре  $40 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$  проводили в течение 28 сут, а оценку коррозионной стойкости покрытий проводили «оценочным баллом коррозионной стойкости» ( $K_D$ ) [17]. Коррозионным испытаниям подвергались стальные образцы размером  $20 \times 30$  мм, покрытые гальваническими покрытиями сплавами медь-олово. Одновременно в камеру влаги для сравнительной оценки коррозионной стойкости покрытий сплавами медь-олово были завешены образцы, покрытые медью [18].

### Результаты исследования

Зависимость микротвердости покрытий сплавом медь-олово от состава сплава имеет максимум, соответствующий содержанию олова в сплаве 20–25 % (рис. 1). Микротвердость покрытий изменяется от 0,78 ГПа для чистой меди до 0,55 ГПа для сплава с содержанием олова 45 %. Максимум микротвердости 1,75 ГПа соответствует сплаву с содержанием олова 23 %, что превосходит микротвердость чистой меди более чем в 2 раза. Зависимость микротвердости от состава гальванического осадка подобна аналогичной зависимости металлургического сплава [1].

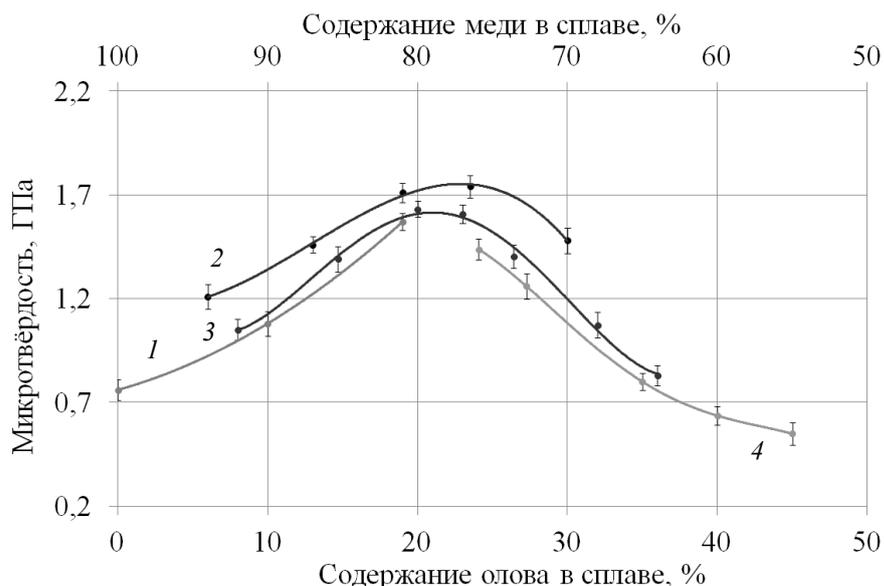


Рис. 1. Зависимость микротвердости покрытия сплавом медь-олово от состава:  
 1 – литейные сплавы; 2 – покрытия, полученные на стационарном режиме;  
 3 – покрытия, полученные при наложении переменного магнитного поля;  
 4 – покрытия, полученные при вибрации катода

Микротвердость осадков, полученных в нестационарных режимах электролиза, таких как вибрация катода и наложение на электролит пере-

менного магнитного поля примерно на 0,2–0,3 ГПа ниже, чем при использовании стационарного режима. Однако их микротвердость близка к микротвердости сплава медь-олово, полученного литьем. Это связано с различием в структуре сплава, полученного при разных режимах электролиза. В стационарном режиме осаждается сплав с мелкокристаллической структурой, при вибрации катода – кристаллы более крупные и при наложении на электролит переменного магнитного поля – кристаллы вытянуты по линиям магнитного поля.

Исследования паяемости покрытий сплавом медь-олово показали, что величина коэффициента растекания зависит от состава сплава (рис. 2) и для сплава, содержащего 45 % олова, равна 98,3 %. Это соответствует очень хорошей паяемости (по таблице критериев паяемости). Паяемость данных образцов после климатических испытаний в камере влажности и камере соляного тумана практически не отличается от первоначальных значений.

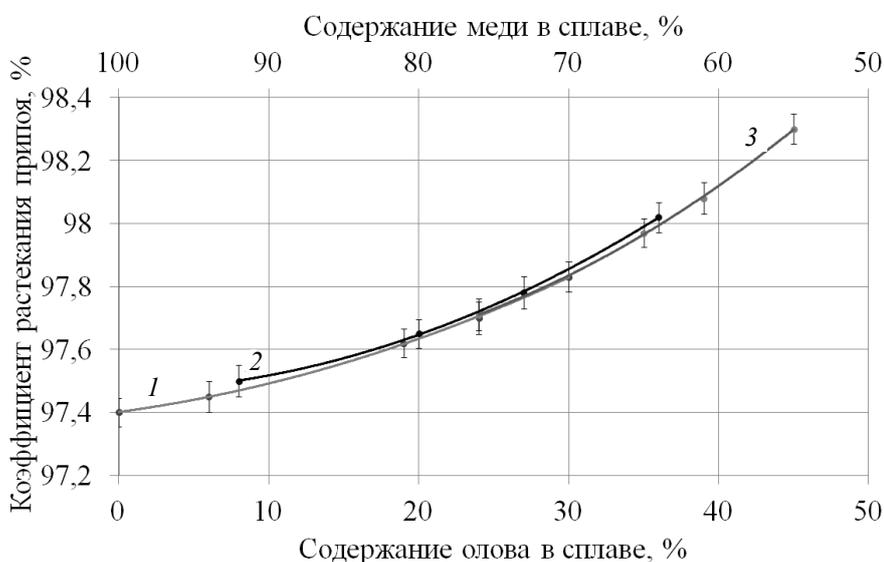


Рис. 2. Зависимость коэффициента растекания от содержания олова в сплаве:

- 1 – покрытия, полученные на стационарном режиме; 2 – покрытия, полученные при наложении на электролит переменного магнитного поля; 3 – покрытия, полученные при вибрации катода

Закономерное повышение паяемости с ростом содержания олова позволяет применять сплав с содержанием олова 40–45 % в качестве финишного покрытия печатных плат.

Сплав медь-олово с содержанием олова в сплаве 17–22 % характеризуется низким и стабильным во времени значением переходного электросопротивления (рис. 3, 4). Компоненты сплава медь и олово не обладают такими характеристиками. Свежеосажденное покрытие медью обладает низким значением переходного электросопротивления (рис. 3), но оно резко возрастает со временем (рис. 4) в связи с образованием на поверхности металла продуктов коррозии.

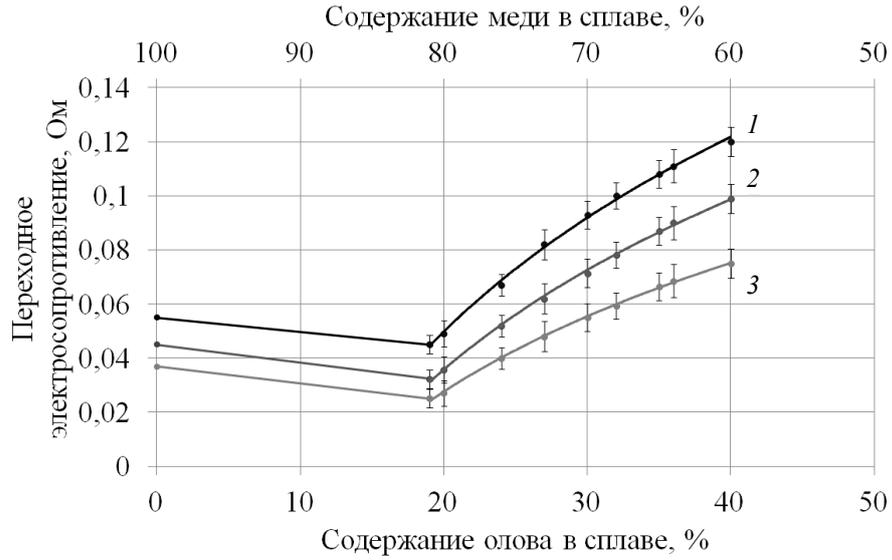


Рис. 3. Зависимость переходного электросопротивления покрытия сплавом медь-олово от состава сплава и нагрузки на контакт: 1 – 0,49 Н; 2 – 0,98 Н; 3 – 1,96 Н

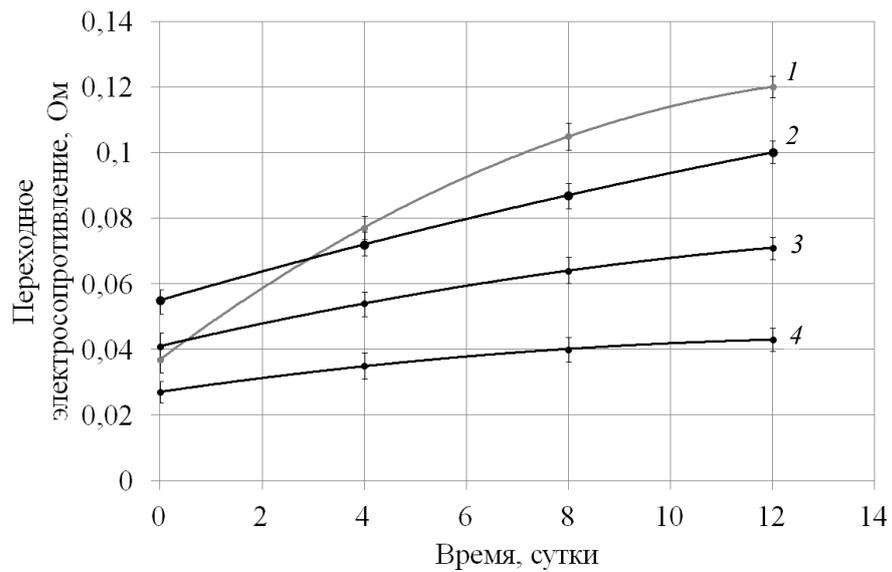


Рис. 4. Зависимость переходного электросопротивления покрытия сплавом медь-олово от времени в камере влаги: 1 – медь; 2 – 30 % Sn; 3 – 25 % Sn; 4 – 20 % Sn

Как известно, удельное электросопротивление меди –  $0,017 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ , а олова –  $0,143 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ . Значительное повышение удельного электросопротивления сплава медь-олово закономерно, так как обычно электросопротивление сплавов выше, чем составляющих их чистых металлов [19].

На рис. 3 приведены зависимости переходного электросопротивления меди, а также покрытий сплавом медь-олово от содержания олова в сплаве при различных нагрузках на контакт. Как видно, наименьшим переходным сопротивлением характеризуется сплав медь-олово с содержанием олова 20 %. Сплавы с содержанием олова более 25 % обладают большим переходным электросопротивлением, чем медь. Высокооловянное покрытие изначально характеризуется повышенными значениями электрического переходного электросопротивления, что исключает в принципе его применение в качестве материала для коммутационных электрических контактов.

Значение переходного сопротивления и изменение его во времени определяется состоянием поверхности и коррозионной стойкостью [7]. Надежность работы радиоэлектронной аппаратуры во многом зависит от срока службы разъемных электрических слаботочных контактов. Сплав медь-олово благодаря повышенной коррозионной стойкости обладает довольно стабильным переходным электросопротивлением (рис. 4).

После коррозионных испытаний в течение небольшого промежутка времени в камере влаги измерения переходного электросопротивления показали, что сплав медь-олово разного состава обладает довольно стабильным значением переходного сопротивления. В то же время переходное сопротивление меди повысилось в 2–3 раза.

Стабильность низкого переходного электросопротивления сплава медь-олово объясняется повышенной его коррозионной стойкостью.

Таким образом, измеренные значения переходных электросопротивлений сплавов медь-олово показывают возможность их применения для электрических слаботочных контактов, работающих в данных условиях, а также с целью снижения расхода благородных металлов и повышения надежности и долговечности радиоэлектронной аппаратуры.

В ходе испытаний медное покрытие приобрело темный цвет, полностью потеряв блеск. Коррозионное поведение сплава медь-олово с содержанием олова 20 % по внешнему виду более схоже с медью. Покрытия сплавами с содержанием олова от 20 до 30 % потускнели, и на их поверхности появился питтинг. Надо отметить, что потемнение и потеря блеска не столь значительны по сравнению с медью и в конце испытаний на образце наблюдается частичный блеск. Покрытия сплавом медь-олово с содержанием олова от 30 до 40 % практически не подверглись коррозионному разрушению и сохранили блестящий внешний вид и лишь частично покрылись цветами побежалости. Режим электролиза (вибрация и наложение на электролит переменного магнитного поля) практически не оказывает влияния на коррозионную устойчивость, в большей степени данные режимы влияют на состав сплава. Вибрация катода, а также переменное магнитное поле способствуют увеличению содержания олова в сплаве.

Оценочный балл коррозионной стойкости  $K_D$  для сплавов медь-олово составил от 5 до 9, в то время как для медного покрытия – 3. Оценочный балл коррозионной стойкости  $K_D$ , равный от 5 до 10, соответствует успешному прохождению коррозионного испытания.

На основании анализа результатов коррозионных испытаний можно сделать вывод, что гальванические покрытия сплавом медь-олово обладают

высокой коррозионной устойчивостью за счет образования на их поверхности плотной коррозионной пленки, защищающей материал от дальнейшего коррозионного разрушения.

### **Заключение**

Таким образом, нестационарные режимы электролиза, такие как вибрация катода и наложение на электролит переменного магнитного поля, способствуют формированию гальванических покрытий сплавом медь-олово с широким диапазоном содержания олова в сплаве, оказывая, таким образом, значительное влияние на их свойства.

Установлено, что вибрация катода и наложение на электролит переменного магнитного поля приводит к формированию покрытий сплавом медь-олово, обладающих низким и стабильным во времени переходным сопротивлением, хорошей паяемостью и высокой коррозионной стойкостью. Это позволяет использовать данные покрытия в качестве покрытий слаботочных контактов, а также покрытий под пайку, в том числе для производства печатных плат.

### **Список литературы**

1. **Ковенский, И. М.** Металловедение покрытий : учеб. для вузов / И. М. Ковенский, В. В. Поветкин. – М. : СП Интермет Инжиниринг, 1999. – 296 с.
2. Разработка и исследование бессвинцовых припоев для пайки кристаллов силовых полупроводниковых приборов / В. Зенин, В. Бойко, А. Кастрблев, А. Ткаченко, О. Хишко // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – № 8. – С. 52–56.
3. **Киреев, С. Ю.** Формирование и исследование свойств финишных покрытий печатных плат сплавом олово-цинк взамен покрытий сплавом олово-свинец / С. Ю. Киреев // Коррозия: материалы, защита. – 2015. – № 8. – С. 7–12.
4. **Наумов, Л. В.** Закономерности электроосаждения сплава кобальт-никель при различных режимах электролиза / Л. В. Наумов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 1 (25). – С. 76–84.
5. **Киреев, С. Ю.** Микротвердость гальванических покрытий / С. Ю. Киреев, Ю. П. Перелыгин // Мир гальваники. – 2010. – № 2 (15). – С. 42–45.
6. **Гамбург, Ю. Д.** Электрохимическая кристаллизация металлов и сплавов / Ю. Д. Гамбург. – М. : Янус-К, 1997. – 384 с.
7. **Киреев, С. Ю.** Теория, методы измерения и область применения переходного сопротивления гальванических покрытий / С. Ю. Киреев, Ю. П. Перелыгин // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2010. – Т. 28, № 4. – С. 19–26.
8. Переходное сопротивление гальванических покрытий как «структурно-чувствительное» свойство / С. Ю. Киреев, Ю. П. Перелыгин, В. В. Липовский, Н. В. Ягниченко, Ю. Н. Кубенко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 1 (13). – С. 134–145.
9. ГОСТ 24606.3–82. Изделия коммутационные, установочные и соединители электрические. Методы измерения сопротивления контакта и динамической и статической нестабильности переходного сопротивления контакта. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 8 с.
10. **Киреев, С. Ю.** Экспресс-методика определения паяемости / С. Ю. Киреев, С. Н. Киреева, Ю. П. Перелыгин, Marian Jaskula // Покрытия и обработка поверхности : сб. ст. – М., 2011. – С. 35–36.
11. ГОСТ 9.302–88. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 65 с.

12. ГОСТ 20.57.406–81. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытания. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 216 с.
13. ГОСТ 28235–89. Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Ч. 2. Испытания. Пайка. Испытание на паяемость методом баланса смачивания. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 12 с.
14. **Киреев, С. Ю.** Методы определения паяемости покрытий / Ю. П. Перельгин, С. Ю. Киреев // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2011. – № 2 (19). – С. 52–57.
15. Справочник по пайке / под ред. С. Н. Лоцманова, И. Е. Петрунина, И. Е. Фролова. – М. : Машиностроение, 1975. – 407 с.
16. ГОСТ 9.905–82. Методы коррозионных испытаний. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 5 с.
17. ГОСТ 27597–88. Изделия электронной техники. Метод оценки коррозионной стойкости. – М. : Стандартиформ, 2006. – 21 с.
18. ГОСТ 9.308–85. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 22 с.
19. **Федотьев, Н. П.** Электролитические сплавы / Н. П. Федотьев, Н. Н. Бибииков, П. М. Вячеславов, С. Я. Грилихес. – М. : Машгиз, 1962. – 312 с.

### References

1. Kovenskiy I. M., Povetkin V. V. *Metallovedenie pokrytiy: ucheb. dlya vuzov* [Coating materials science textbook for universities]. Moscow: SP Internet Inzhiniring, 1999, 296 p.
2. Zenin V., Boyko V., Kastrblev A., Tkachenko A., Khishko O. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti* [Technologies in electronic industry]. 2008, no. 8, pp. 52–56.
3. Kireev S. Yu. *Korroziya: materialy, zashchita* [Corrosion: materials, protection]. 2015, no. 8, pp. 7–12.
4. Naumov L. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskieskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2013, no. 1 (25), pp. 76–84.
5. Kireev S. Yu., Perelygin Yu. P. *Mir gal'vaniki* [Galvanic world]. 2010, no. 2 (15), pp. 42–45.
6. Gamburg Yu. D. *Elektrokhimicheskaya kristallizatsiya metallov i spлавov* [Electrochemical crystallization of metals and alloys]. Moscow: Yanus-K, 1997, 384 p.
7. Kireev S. Yu., Perelygin Yu. P. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti* [Galvanic technology and surface treatment]. 2010, vol. 28, no. 4, pp. 19–26.
8. Kireev S. Yu., Perelygin Yu. P., Lipovskiy V. V., Yagnichenko N. V., Kubenko Yu. N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskieskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2010, no. 1 (13), pp. 134–145.
9. *GOST 24606.3-82. Izdeliya kommutatsionnye, ustanovochnye i soediniteli elektricheskieskie. Metody izmereniya soprotivleniya kontakta i dinamicheskoy i staticheskoy nestabil'nosti perekhodnogo soprotivleniya kontakta* [State standard 24606.3-82. Commutation, wiring and connecting electrical devices. Measurement methods of contact resistance and dynamic and static instability of contact transient resistance]. Moscow: Izd-vo standartov, 1984, 8 p.
10. Kireev S. Yu., Kireeva S. N., Perelygin Yu. P., Jaskula Marian *Pokrytiya i obrabotka poverkhnosti: sb. st.* [Coatings and surface treatment collected papers]. Moscow, 2011, pp. 35–36.
11. *GOST 9.302-88. Pokrytiya metallicheskie i nemetallicheskie neorganicheskie. Metody kontrolya* [State standard 9.302-88. Metallic and non-metallic non-organic coatings. Monitoring procedures]. Moscow: Izd-vo standartov, 1988, 65 p.

12. GOST 20.57.406–81. *Izdeliya elektronnoy tekhniki, kvantovoy elektroniki i elektrotekhnicheskie. Metody ispytaniya* [State standard 20.57.406–81. Devices of electronic technology, quantum electronics and electrotechnical devices. Testing methods]. Moscow: Izd-vo standartov, 1991, 216 p.
13. GOST 28235–89. *Osnovnye metody ispytaniy na vozdeystvie vneshnikh faktorov. Ch. 2. Ispytaniya. Payka. Ispytanie na payaemost' metodom balansa smachivaniya* [State standard 28235–89. Basic external factor impact testing. Part 2. Testing. Solder. Solderability testing by the moistening balance method]. Moscow: Izd-vo standartov, 1989, 12 p.
14. Kireev S. Yu., Perelygin Yu. P. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti* [Galvanic technology and surface treatment]. 2011, no. 2 (19), pp. 52–57.
15. *Spravochnik po payke* [Soldering reference book]. Eds. S. N. Lotsmanov, I. E. Petrunin, I. E. Frolov. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 407 p.
16. GOST 9.905–82. *Metody korrozionnykh ispytaniy* [State standard 9.905–82. Corrosion testing methods]. Moscow: Izd-vo standartov, 1983, 5 p.
17. GOST 27597–88. *Izdeliya elektronnoy tekhniki. Metod otsenki korrozionnoy stoykosti* [State standard 27597–88. Electronic devices. Method of corrosion resistance estimation]. Moscow: Standartinform, 2006, 21 p.
18. GOST 9.308–85. *Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Pokrytiya metallicheskie i nemetallicheskie neorganicheskie. Metody uskorennykh korrozionnykh ispytaniy* [State standard 9.308–85. The unified system of corrosion and aging protection. Metallic and non-metallic non-organic coatings. Methods of accelerated corrosion testing]. Moscow: Izd-vo standartov, 1987, 22 p.
19. Fedot'ev N. P., Bibikov N. N., Vyacheslavov P. M., Grilikhes S. Ya. *Elektroliticheskie splavy* [Electrolytic alloys]. Moscow: Mashgiz, 1962, 312 p.

---

**Глебов Максим Владимирович**

заведующий лабораториями, кафедра технологии машиностроения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: mac-simka@mail.ru

**Glebov Maksim Vladimirovich**

Head of laboratories, sub-department of mechanical engineering technology, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Киреев Сергей Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент, кафедра химии, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: Sergey58\_79@mail.ru

**Kireev Sergey Yur'evich**

Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of chemistry, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

УДК 621; 66.087.7

**Глебов, М. В.**

**Влияние нестационарных режимов электролиза на свойства покрытия сплавом медь-олово / М. В. Глебов, С. Ю. Киреев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 148–158. DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-13**

### **Вниманию авторов!**

Редакция журнала «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» приглашает специалистов опубликовать на его страницах оригинальные статьи, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники, управления, электроники, измерительной техники, радиотехники, машиностроения, машиноведения, а также обзорные статьи по тематике журнала.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows (тип файла – RTF, DOC).

Необходимо представить статью в электронном виде (VolgaVuz@mail.ru) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах. Оптимальный объем рукописи 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt через полупотурный интервал. Статья **обязательно** должна содержать индекс УДК, ключевые слова и развернутую аннотацию объемом от 100 до 250 слов, имеющую четкую структуру **на русском** (Актуальность и цели. Материал и методы. Результаты. Выводы) **и английском языках** (Background. Materials and methods. Results. Conclusions).

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисовочными подписями.

**Формулы** в тексте статьи **обязательно** должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Word Equation (версия 3.0) или MathType. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

В списке литературы **нумерация источников** должна соответствовать **очередности ссылок** на них в тексте ([1], [2], ...). Номер источника указывается в квадратных скобках. **Требования к оформлению списка литературы** на русские и иностранные источники: **для книг** – фамилия и инициалы автора, название, город, издательство, год издания, том, количество страниц; **для журнальных статей, сборников трудов** – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала или сборника, серия, год, том, номер, страницы; **для материалов конференций** – фамилия и инициалы автора, название статьи, название конференции, город, издательство, год, страницы.

К материалам статьи **должна** прилагаться следующая информация: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, место и юридический адрес работы (на русском и английском языках), e-mail, контактные телефоны (желательно сотовые).

Обращаем внимание авторов на то, что перевод имен собственных на английский язык в списке литературы осуществляется автоматически с использованием программы транслитерации в кодировке BGN (сайт translit.ru). Для обеспечения единообразия указания данных об авторах статей во всех реферируемых базах при формировании авторской справки при подаче статьи необходимо предоставить перевод фамилии, имени, отчества каждого автора на английский язык, или он будет осуществлен автоматически в программе транслитерации в кодировке BGN.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается. Рукопись, полученная редакцией, не возвращается. Редакция оставляет за собой право проводить редакторскую и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

**Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.**

### ***Уважаемые читатели!***

Для гарантированного и своевременного получения журнала «**Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки**» рекомендуем вам оформить подписку.

Журнал выходит 4 раза в год по тематике:

- ***информатика***
- ***вычислительная техника***
- ***управление***
- ***электроника***
- ***измерительная техника***
- ***радиотехника***
- ***машиностроение***
- ***машиноведение***

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс/тел. (841-2) 36-84-87. E-mail: [VolgaVuz@mail.ru](mailto:VolgaVuz@mail.ru)

Подписку можно также оформить по объединенному каталогу «Пресса России» тематические разделы «Компьютеры. Информатика. Программные продукты», «Машиностроение», «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов». Подписной индекс – 36949.

---

### **ЗАЯВКА**

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 20\_\_ г.

№ 1 – \_\_\_\_\_ шт., № 2 – \_\_\_\_\_ шт., № 3 – \_\_\_\_\_ шт., № 4 – \_\_\_\_\_ шт.

Наименование организации (полное) \_\_\_\_\_

ИНН \_\_\_\_\_ КПП \_\_\_\_\_

Почтовый индекс \_\_\_\_\_

Республика, край, область \_\_\_\_\_

Город (населенный пункт) \_\_\_\_\_

Улица \_\_\_\_\_ Дом \_\_\_\_\_

Корпус \_\_\_\_\_ Офис \_\_\_\_\_

ФИО ответственного \_\_\_\_\_

Должность \_\_\_\_\_

Тел. \_\_\_\_\_ Факс \_\_\_\_\_ E-mail \_\_\_\_\_

Руководитель предприятия \_\_\_\_\_  
(подпись) (ФИО)

Дата «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.